
**ACQUISITION DE CONNAISSANCES
SUR LES EAUX SOUTERRAINES DES TERRITOIRES MUNICIPALISÉS
DE CHARLEVOIX, DE CHARLEVOIX-EST ET DE LA HAUTE-CÔTE-NORD**

Rapport scientifique

**Résultats du programme d'acquisition de connaissances
sur les eaux souterraines des territoires municipalisés
de Charlevoix, de Charlevoix-Est et de La Haute-Côte-Nord.**

CERM / UQAC
Mars 2015



ÉQUIPE PACES-CHCN

COORDONNATEURS : Alain Rouleau et Réal Daigneault

PROFESSIONNELS EN HYDROGÉOLOGIE : Denis Germaneau, Marie-Line Tremblay et Julien Walter

PROFESSIONNELLE EN GÉOMATIQUE : Mélanie Lambert

PROFESSEURS-CHERCHEURS : Romain Chesnaux et Marie-Amélie Boucher

ÉQUIPE GÉOPHYSIQUE : Patrick Simard et David Noël

GRAPHISME : Claude Dallaire

CITATION

CERM-PACES, 2015. Résultats du programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines des territoires municipalisés de Charlevoix, de Charlevoix-Est et de La Haute-Côte-Nord. Centre d'études sur les ressources minérales, Université du Québec à Chicoutimi. 294 p.

RÉSUMÉ

Le Centre d'études sur les ressources minérales (CERM) de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) a réalisé un projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines pour le territoire municipalisé des MRC de Charlevoix, de Charlevoix-Est et de La Haute-Côte-Nord (CHCN). Ce projet s'inscrit dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES) géré par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). En plus du MDDELCC, des intervenants régionaux ont été impliqués et représentent les trois MRC visées par le projet et les organismes de bassins versants Charlevoix-Montmorency et de la Haute-Côte-Nord.

Le PACES-CHCN s'est effectué entre 2012 et 2015 suivant trois étapes dont : 1) l'acquisition et l'archivage des données existantes auprès d'organismes gouvernementaux et municipaux, 2) l'acquisition de nouvelles données par des travaux d'investigation ciblés sur le territoire CHCN, et 3) l'analyse et l'interprétation des données.

La phase 1 a permis d'acquérir de nombreuses données géologiques et hydrogéologiques provenant principalement de 155 rapports de consultant appartenant aux municipalités et dont l'information n'était pas du domaine public avant le PACES-CHCN. De ces rapports ont notamment été extraits 649 descriptions stratigraphiques en forage, 337 rapports d'essai de pompage sur des puits de pompage et des puits d'observation et leurs propriétés hydrauliques associées, 101 courbes granulométriques, 239 rapports d'analyses chimiques, 19 essais de perméabilité, 12 rapports de sondage au piézocône, 13 545 affleurements et d'autres données pertinentes comme des coupes stratigraphiques, des levés sismiques, des aires d'alimentation et des cartes piézométriques. L'ensemble de ces données ont été numérisées et intégrées dans une base de données spatiales implantée dans une *file geodatabase* d'ESRI qui contient 86 tables. Cette base de données inclut également des données publiques provenant de ministères, dont les données du Système d'information hydrogéologique (SIH) du MDDELCC et les données du Système d'informations géominières (SIGÉOM) du MERN.

La phase 2 avait comme principal objectif d'acquérir de nouvelles données à caractères géologique et hydrogéologique sur l'ensemble du territoire à l'étude. Ainsi, plusieurs travaux d'investigation ont été réalisés dont 172 levés géophysiques, 13 sondages par rotoperçusion et au piézocône dont 2 ont été aménagés en piézomètre, 133 stations pour lesquelles la fracturation du roc a été appréciée d'un point de vue qualitatif. De plus, une campagne d'échantillonnage d'eau souterraine a permis de prélever 133 échantillons d'eau souterraine sur 116 stations, ce qui permet d'une part de décrire les signatures hydrogéochimiques du territoire et d'autre part d'apprécier la qualité de l'eau souterraine. Lors des prélèvements d'eau souterraine, 40 essais de pompage de courte durée ont été effectués. Ces données additionnelles ont également été intégrées à la base de données spatiales.

La phase 3 a consisté à l'analyse des données dont les résultats sont présentés dans le rapport scientifique, sur 29 cartes thématiques et dans un atlas hydrogéologique. Les principaux résultats correspondent à :

- La cartographie des dépôts de surface pour 12 feuilles 1 : 50 000 réalisée en collaboration avec le MERN et l'Université Laval.
- La carte géologique révisée à l'échelle 1 : 225 000 incluant la précision des limites des roches ordoviciennes dans le secteur de l'astrolème de Charlevoix.
- L'interprétation de 147 coupes stratigraphiques à l'échelle régionale qui sont utilisées pour tracer les limites des unités hydrogéologiques enfouies et pour modéliser l'épaisseur des dépôts meubles qui est maximale dans les vallées du Gouffre et de La Malbaie ainsi que dans les basses terres de la Haute-Côte-Nord.
- La cartographie hydrogéologique de 27 aquifères perméables, 40 aquifères semi-perméables et 18 aquitards représentée sur deux cartes, soit les limites des unités hydrogéologiques perméables et imperméables, et les limites des unités hydrogéologiques semi-perméables.
- La représentation cartographique des sept contextes hydrogéologiques identifiés sur le territoire de CHCN dont les trois contextes principaux en termes de superficie :

- le contexte hydrogéologique A correspond à un aquifère semi perméable en milieu fracturé caractéristique des hautes terres du territoire d'étude;
- le contexte hydrogéologique C correspond à deux aquifères superposés en milieux poreux et fracturés caractéristique de la zone de collines de l'astrolème de Charlevoix et des vallées qui sillonnent les hautes terres de CHCN;
- le contexte hydrogéologique E correspond à deux aquifères superposés, libre et captif, perméables en milieu poreux caractéristique des basses terres de la Haute-Côte-Nord.
- La valeur moyenne de la conductivité hydraulique pour les dépôts perméables correspond à $6,3 \times 10^{-4}$ m²/s et à $1,0 \times 10^{-6}$ pour les milieux semi-perméables.
- La caractérisation hydrogéochimique de l'eau souterraine suggère 4 groupes d'eau. Le groupe 1 correspond à des eaux souterraines douces dont la signature géochimique est la moins évoluée et s'apparente aux eaux de recharge, le groupe 4 correspond aux eaux souterraines les plus évoluées et sont généralement salées, les groupes 2 et 3 correspondent à des eaux intermédiaires pouvant être issues de mélanges entre des eaux provenant d'aquifères granulaires et d'aquifères fracturés.
- La profondeur de l'eau souterraine présente une valeur moyenne de 38 mètres. La piézométrie varie le plus dans le secteur de Charlevoix dus aux reliefs accidentés. L'écoulement de l'eau souterraine s'effectue régionalement du nord-ouest vers le sud-est.
- Les zones les plus favorables à la recharge se localisent sur les basses terres sur la Haute-Côte-Nord et dans les vallées de Charlevoix. Le territoire présente également plusieurs zones favorables aux résurgences sous forme de sources ou de zones de suintement.
- Des 21 municipalités présentes sur le territoire, 17 alimentent leur population en eau potable à partir d'eau souterraine dont 4 captent des résurgences. Des 17 municipalités, 10 captent leur eau dans des milieux perméables, 5 dans des milieux semi-perméables et 2 dans ces deux milieux.
- La quantité totale d'eau consommée (surface et souterraine) est évaluée à 19 679 318 m³/année dont le tiers correspond à de l'eau souterraine. 52% de la quantité totale d'eau souterraine est destinée à un usage domestique.
- La qualité de la ressource en eau souterraine est généralement bonne pour la potabilité avec environ 10% des échantillons qui présentent des dépassements pour les fluorures et ou l'uranium et ne respectent pas les concentrations maximales acceptables selon le RQEP. Toutefois, la qualité de l'eau souterraine pour les objectifs esthétiques (OE) recommandés par Santé Canada, la qualité est plutôt passable avec 45% des échantillons qui présentent des dépassements pour ces OE.
- La vulnérabilité selon l'indice DRASTIC de l'aquifère situé le plus près de la surface indique que les aquifères localisés sur les hautes terres du territoire ont des indices de vulnérabilité faibles tandis que les aquifères en milieu poreux localisés dans la zone de collines de l'astrolème et dans le secteur des basses terres de la Haute-Côte-Nord ont des indices de vulnérabilité moyens à élevés.

REMERCIEMENTS

Ce projet a été rendu possible par la contribution financière du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), et des organismes partenaires suivants : l'Université du Québec à Chicoutimi, les municipalités régionales de comté (MRC) de Charlevoix, de Charlevoix-Est et de La Haute-Côte-Nord, ainsi que les organismes de bassins versants (OBV) de Charlevoix-Montmorency et de la Haute-Côte-Nord. Ces organismes sont représentés sur le comité de gestion du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire de Charlevoix, de Charlevoix-Est et de La Haute-Côte-Nord (PACES-CHCN) par Madame France Lavoie et Messieurs Kevin Bédard, Stéphane Chaîné, Yves Demers et Jean Landry. Ils ont contribué par leur participation et leur collaboration active au bon déroulement de ce projet.

Toutes les municipalités présentes sur le territoire ont gracieusement contribué à ce projet en fournissant leur rapport d'étude hydrogéologique. Nous remercions les élus, les directeurs généraux et les inspecteurs municipaux pour leur générosité.

Nous remercions sincèrement l'ensemble des propriétaires qui sur une base volontaire nous ont permis d'accéder à leur propriété pour effectuer des levés géophysiques ou encore des essais de pompage et le prélèvement d'échantillons d'eau souterraine à partir de leur puits d'alimentation en eau potable. Leur collaboration pour la réalisation des travaux de terrain est nécessaire et leur enthousiasme à participer a été très apprécié.

Un grand nombre de données existantes ont été fournies par des organismes gouvernementaux et paragouvernementaux, notamment les ministères des Transports (MTQ) et de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN), ainsi que par l'Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA).

Les auteurs de ce rapport tiennent à souligner la collaboration du professeur Denis W. Roy et l'assistance apportée par Madame Sonia Dorval. Nous remercions les étudiants qui ont participé à la collecte des données : Mesdames Marie-Odile Chartier, Anouck Ferroud, Ombeline Ghesquière, Maryline Huet, Julie Lavoie et Catherine Prince, et Messieurs Léo Poignant-Molina et Pierre-Yves Gobeil.

Nous soulignons l'excellente collaboration de l'équipe de cartographie des dépôts de surface d'origine quaternaire dont font partie : Madame Brigitte Poirier et Messieurs Étienne Brouard, Pierre Cousineau, Mohamed El Amrani et Patrick Lajeunesse.

Nous remercions Messieurs Jean-Marc Ballard et Xavier Malet du Centre Eau Terre Environnement de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS-ETE) pour la réalisation de travaux de forage sur le territoire CHCN.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	III
REMERCIEMENTS	V
TABLE DES MATIÈRES	VI
LISTE DES FIGURES	XI
LISTE DES TABLEAUX	XVII
LISTE DES ANNEXES	XIX
1 INTRODUCTION	1
1.1 PROGRAMME D'ACQUISITION DE CONNAISSANCES SUR LES EAUX SOUTERRAINES	1
1.2 TERRITOIRE À L'ÉTUDE	2
1.3 ÉQUIPE DE RÉALISATION ET PARTENAIRES	3
1.4 LIVRABLES ÉMIS DANS LE CADRE DU PROJET PACES-CHCN	5
2 ACQUISITION, ARCHIVAGE ET CENTRALISATION DES DONNÉES	8
2.1 COLLECTE DES DONNÉES EXISTANTES	9
2.1.1 DONNÉES NUMÉRIQUES STRUCTURÉES	9
2.1.2 DONNÉES NON NUMÉRIQUEMENT STRUCTURÉES	11
2.2 ACQUISITION DE DONNÉES COMPLÉMENTAIRES	14
2.2.1 LEVÉS GÉOPHYSIQUES	14
2.2.2 SONDAGES PAR ROTOPERCUSION ET AU PIÉZOCÔME, ET INSTALLATIONS PIÉZOMÉTRIQUES	21
2.2.3 ESSAIS DE POMPAGE ET LEVÉS PIÉZOMÉTRIQUES	24
2.2.4 ÉCHANTILLONNAGE HYDROGÉOCHIMIQUE	26
2.2.5 CARACTÉRISATION DE LA FRACTURATION	29
2.3 SAISI, ARCHIVAGE ET UNIFORMISATION DES DONNÉES	31
2.3.1 UNIFORMISATION DES DONNÉES EXISTANTES	31
2.3.2 SAISIE ET ARCHIVAGE DES NOUVELLES DONNÉES ACQUISES SUR LE TERRAIN	37
2.3.3 TRANSFERT DES DONNÉES DANS LA BASE DE DONNÉES DU MINISTÈRE	39
2.4 INTÉGRATION ET CENTRALISATION DANS UNE BASE DE DONNÉES SPATIALES	39
2.4.1 FIABILITÉ ET VALIDATION DES DONNÉES PONCTUELLES	40
2.4.2 MODÈLE D'IMPLANTATION	40
2.4.3 LES MÉTADONNÉES	42

3	DESCRIPTION DU TERRITOIRE À L'ÉTUDE	43
3.1	ASPECT PHYSIQUE	43
3.1.1	TOPOGRAPHIE ET PENTES DU SOL	43
3.1.2	HYDROGRAPHIE ET BASSINS VERSANTS	45
3.1.3	PÉDOLOGIE	48
3.1.4	COUVERTURE VÉGÉTALE ET MILIEUX HUMIDES	48
3.2	ASPECT HUMAIN	50
3.2.1	SUPERFICIES ET DÉCOUPAGES ADMINISTRATIFS	50
3.2.2	VOIES DE COMMUNICATION	51
3.2.3	ACTIVITÉS HUMAINES	52
3.2.4	AFFECTATIONS DU TERRITOIRE	52
3.2.5	OCCUPATION DU TERRITOIRE	53
3.2.6	ACTIVITÉS POTENTIELLEMENT POLLUANTES	54
4	PORTRAIT GÉOLOGIQUE	59
4.1	GÉOLOGIE DU SOCLE ROCHEUX	59
4.1.1	PROVINCE DE GRENVILLE	61
4.1.2	PLATE-FORME-DU-SAINT-LAURENT	63
4.1.3	PROVINCE DES APPALACHES	64
4.1.4	ÉVÈNEMENTS GÉOLOGIQUES ET STRUCTURES	64
4.1.5	PARTICULARITÉS GÉOLOGIQUES ASSOCIÉES À L'ASTROBLÈME DE CHARLEVOIX	65
4.2	COMPLÉMENT D'INFORMATIONS GÉOLOGIQUES OBTENUES PAR LE PACES	67
4.2.1	ANALYSE DE LINÉAMENTS TOPOGRAPHIQUES	67
4.2.2	RÉVISION DE LA CARTE GÉOLOGIQUE	69
4.2.3	LEVÉS DE TERRAIN POUR LA FRACTURATION	71
4.2.4	OBSERVATIONS LIÉES À L'ASTROBLÈME DE CHARLEVOIX	76
4.3	GÉOLOGIE DU QUATERNAIRE	78
4.3.1	LES SÉDIMENTS GLACIAIRES (Tc, Tm)	81
4.3.2	LES SÉDIMENTS FLUVIOGLACIAIRES (Gx, Gxt, Go)	82
4.3.3	LES SÉDIMENTS GLACIOLACUSTRES (LGB)	84
4.3.4	LES SÉDIMENTS GLACIOMARINS (MGA, MGB, MGD)	85
4.3.5	LES SÉDIMENTS MARINS (MA, MB)	89
4.3.6	LES SÉDIMENTS ALLUVIAUX (AX, AP)	91
4.3.7	LES SÉDIMENTS ÉOLIENS (ED)	93
4.3.8	LES SÉDIMENTS ORGANIQUES INDIFFÉRENCIÉS (O)	94
4.3.9	LES DÉPÔTS DE VERSANT (C, Ce, Cr, Cg)	94
4.4	RÉSULTATS STRATIGRAPHIQUES DES TRAVAUX D'INVESTIGATION	95
4.4.1	COLOMBIER	96
4.4.2	FORESTVILLE	98
4.4.3	PORTNEUF-SUR-MER	101
4.4.4	LONGUE-RIVE	104

4.4.5	LES ESCOUMINS	106
4.4.6	LES BERGERONNES	108
4.4.7	SACRÉ-COEUR	110
4.4.8	SAINT-SIMÉON	114
4.4.9	LA MALBAIE	116
4.4.10	SAINT-URBAIN	118
4.4.11	ISLE-AUX-COUDRES	119
4.5	COUPES STRATIGRAPHIQUES	122
4.5.1	SIMPLIFICATION DE L'INFORMATION STRATIGRAPHIQUE	123
4.5.2	IDENTIFICATION DES DONNÉES SOURCES	123
4.5.3	PROJECTION DES STATIONS DANS UNE VUE EN COUPE	124
4.5.4	INTERPRÉTATION DES COUPES STRATIGRAPHIQUES	125
4.5.5	MISE EN FORME FINALE DES COUPES STRATIGRAPHIQUES	126
4.5.6	CRÉATION DES DIAGRAMMES BARRIÈRES	127
4.5.7	CONTEXTES STRATIGRAPHIQUES RÉGIONAUX	128
4.6	ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS ET TOPOGRAPHIE DU ROC	129
4.6.1	ÉPAISSEUR ESTIMÉE DES DÉPÔTS MEUBLES	129
4.6.2	TOPOGRAPHIE DU ROC	141
5	BILAN HYDROLOGIQUE	145
5.1	RÉSEAU DE MESURES ET DONNÉES CLIMATIQUES	145
5.1.1	DONNÉES CLIMATOLOGIQUES FOURNIES PAR LE CEHQ	146
5.1.2	DONNÉES CLIMATOLOGIQUES SÉLECTIONNÉES SUR LE TERRITOIRE DE CHCN	147
5.1.3	LIMITES ET DISCUSSION	147
5.2	PRÉCIPITATIONS : PLUVIOMÉTRIE ET APPORTS VERTICAUX	149
5.3	ÉVAPOTRANSPIRATION	151
5.3.1	MÉTHODE D'ESTIMATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION	151
5.3.2	ETR ESTIMÉE POUR LE TERRITOIRE DE CHCN	152
5.3.3	LIMITES ET DISCUSSION	152
5.4	RUISSELLEMENT	154
5.4.1	MÉTHODE D'ESTIMATION DE L'EMMAGASINEMENT (HS)	154
5.4.2	RELATIONS GÉNÉRALES DU RUISSELLEMENT	157
5.4.3	RUISSELLEMENTS ESTIMÉS POUR LE TERRITOIRE DE CHCN	160
5.4.4	LIMITES ET DISCUSSION	160
5.5	INFILTRATION ET RECHARGE DES AQUIFÈRES	162
5.5.1	MÉTHODES DE CALCULS	162
5.5.2	RECHARGE ESTIMÉE POUR LE TERRITOIRE DE CHCN	163
5.5.3	LIMITES ET DISCUSSION	164

6	ÉTAT DES CONNAISSANCES HYDROGÉOLOGIQUES	166
6.1	NOTIONS D'HYDROGÉOLOGIE	167
6.1.1	NOTIONS DE PROPRIÉTÉS DU MILIEU GÉOLOGIQUE	167
6.1.2	NOTIONS DE PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES DU MILIEU GÉOLOGIQUE	170
6.1.3	NOTIONS DE PIÉZOMÉTRIE	173
6.2	MÉTHODE DE CARTOGRAPHIE HYDROGÉOLOGIQUE	176
6.2.1	LIMITES HYDROGÉOLOGIQUES INTERPRÉTÉES (CARTOGRAPHIE EXISTANTE ET INTERPRÉTÉE)	176
6.2.2	RÉFÉRENTIEL HYDROGÉOLOGIQUE : PRINCIPES ET RÈGLES DE DÉCOUPAGE ET D'ASSEMBLAGE	181
6.3	CARTES HYDROGÉOLOGIQUES DU TERRITOIRE DE CHCN	186
6.3.1	LES CONTEXTES HYDROGÉOLOGIQUES RÉGIONAUX	187
6.3.2	CARTOGRAPHIE HYDROGÉOLOGIQUE RÉGIONALE	191
6.3.3	CARTOGRAPHIE HYDROGÉOLOGIQUE LOCALES : FICHES HYDROGÉOLOGIQUES	192
6.4	ÉTATS DES CONNAISSANCES HYDROGÉOLOGIQUES QUANTITATIVES	199
6.4.1	PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES DES MILIEUX AQUIFÈRES DU TERRITOIRE CHCN	200
6.4.2	CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE	207
6.4.3	PIÉZOMÉTRIE ET ÉCOULEMENTS DU TERRITOIRE DE CHCN	220
6.4.4	ZONES DE RECHARGE ET DE RÉSURGENCE DU TERRITOIRE DE CHCN	224
7	ÉTAT DE LA RESSOURCE EN EAUX	228
7.1	PRÉLÈVEMENTS D'EAU	228
7.1.1	ORIGINES DE L'EAU PRÉLEVÉE ET DISTRIBUÉE DANS LES RÉSEAUX MUNICIPAUX	228
7.1.2	AQUIFÈRES EXPLOITÉS PAR LES MUNICIPALITÉS POUR L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE	234
7.2	ESTIMATION DES QUANTITÉS D'EAU PRÉLEVÉE PAR MRC	240
7.2.1	EAU DE SURFACE	240
7.2.2	EAU SOUTERRAINE PAR CATÉGORIES D'USAGE	241
7.2.3	EAU SOUTERRAINE ET EAU DE SURFACE	245
7.3	QUALITÉ DE LA RESSOURCE	249
7.3.1	CONCENTRATIONS MAXIMALES ACCEPTABLES SELON LE RQEP	249
7.3.2	OBJECTIFS ESTHÉTIQUES	252
7.4	VULNÉRABILITÉ ET PROTECTION DE LA RESSOURCE	262
7.4.1	VULNÉRABILITÉ DES AQUIFÈRES SELON L'INDICE DRASTIC	262
7.4.2	PROTECTION DE LA RESSOURCE EN EAU	272
8	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	275
8.1	CONCLUSIONS ET FAITS SAILLANTS DU PROJET PACES-CHCN	275
8.1.1	BASE DE DONNÉES SPATIALES	276
8.1.2	DESCRIPTION DU TERRITOIRE	277
8.1.3	PORTRAIT GÉOLOGIQUE	277
8.1.4	BILAN HYDROLOGIQUE	279

8.1.5	ÉTAT DES CONNAISSANCES HYDROGÉOLOGIQUES	279
8.1.6	RESSOURCE EN EAUX	280
8.2	LIMITES ET RECOMMANDATIONS POUR L'UTILISATION DES LIVRABLES DU PACES-CHCN	282
8.2.1	BASE DE DONNÉES SPATIALES	282
8.2.2	AVERTISSEMENT ET MISE EN GARDE APPLICABLE À TOUTES LES CARTES	282
8.2.3	COUPES STRATIGRAPHIQUES	283
8.2.4	CARTES #15 – ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS MEUBLES ET #16 – TOPOGRAPHIE DU ROC	283
8.2.5	CARTES #17 – CONTEXTES HYDROGÉOLOGIQUES ET #18 – LIMITES DES AQUIFÈRES RÉGIONAUX	284
8.2.6	CARTE #19 – PIÉZOMÉTRIE	284
8.2.7	CARTE #21 – PARAMÈTRES HYDROGÉOLOGIQUES	284
8.2.8	CARTE #22 – VULNÉRABILITÉ DES AQUIFÈRES SELON LA MÉTHODE DRASTIC	285
8.2.9	CARTE #23 – ACTIVITÉS POTENTIELLEMENT POLLUANTES	285
8.2.10	CARTES #24 – QUALITÉ (CRITÈRES EAU POTABLE) ET #25 – QUALITÉ (OBJECTIFS ESTHÉTIQUES)	285
8.2.11	CARTE #26 – UTILISATION DE L'EAU	286
8.2.12	CARTE #28 – ZONES DE RECHARGE PRÉFÉRENTIELLES ET DE RÉSURGENCE	286
8.3	RECOMMANDATIONS POUR L'AMÉLIORATION DES CONNAISSANCES HYDROGÉOLOGIQUES POUR LE TERRITOIRE CHCN	286
8.3.1	ESTIMATIONS ET SUIVI DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES	286
8.3.2	ESTIMATION ET SUIVI DE LA QUANTITÉ DES EAUX SOUTERRAINES	287
8.4	RECOMMANDATIONS POUR UNE MEILLEURE GESTION RÉGIONALE DE LA RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE	289
8.4.1	LES PRODUCTEURS DE DONNÉES	289
8.4.2	LES GESTIONNAIRES DE DONNÉES	289
8.4.3	LES DIFFUSEURS DE LA DONNÉE	289
8.4.4	LA GOUVERNANCE	289
8.4.5	LA CONCERTATION	289
	RÉFÉRENCES	291

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Localisation des projets PACES 1, 2 et 3 (MDDEFP, 2012).	2
Figure 1-2 : Territoire à l'étude dans le cadre du projet PACES montrant les MRC de Charlevoix, de Charlevoix-Est et de La Haute-Côte-Nord.	3
Figure 1-3 : Structure organisationnelle du projet PACES-CHCN.	4
Figure 2-1 : Processus d'acquisition et de centralisation des données.	8
Figure 2-2 : L'appareil NanoTEM NT32 est petit et léger, ce qui permet de l'utiliser dans des contextes forestiers.	16
Figure 2-3 : Le résistivimètre avec 48 électrodes peut sonder les sols jusqu'à environ 45 m de profondeur.	17
Figure 2-4 : Localisation des levés géophysiques. Les levés TDEM réalisés au cours de l'été 2013 sont représentés sous forme de ligne tandis que ceux réalisés au cours de l'été 2014 sont représentés en points.	20
Figure 2-5 : Foreuse Geotech 605D en opération.	21
Figure 2-6 : Localisation des sondages par rotopercussion et au piézocône sur le territoire de la Haute-Côte-Nord.	24
Figure 2-7 : Mesure du niveau d'eau dans le puits pendant l'essai de pompage.	25
Figure 2-8 : Localisation des essais de pompage effectués lors des campagnes de terrain réalisées en 2013 et 2014 pour le projet PACES-CHCN.	26
Figure 2-9 : Le prélèvement d'échantillon d'eau souterraine se fait dans des bouteilles approuvées par le laboratoire d'analyse.	27
Figure 2-10 : Localisation des échantillons hydrogéochemiques (roc fracturé et dépôts granulaires).	29
Figure 2-11 : Localisation des stations visitées pour caractériser la fracturation dans le secteur de l'astroblème de Charlevoix en 2013 et 2014.	31
Figure 2-12 : Formulaire #4 qui permet la saisie des couches stratigraphiques dans la base de données de saisie.	35
Figure 2-13 : Formulaire numérique de saisie Access; exemple de la campagne d'échantillonnage hydrogéochemique.	39
Figure 2-14: Modèle d'implantation de la base de données spatiales.	41
Figure 3-1 : Éléments de la topographie du territoire de Charlevoix et de la Haute-Côte-Nord.	44
Figure 3-2 : Principaux bassins versants de niveau 1 du territoire de Charlevoix et de la Haute-Côte-Nord.	46
Figure 3-3 : Pédologie du territoire de Charlevoix.	48
Figure 3-4 : Types de couvert végétal et milieux humides cartographiés sur le territoire de CHCN.	49
Figure 3-5 : Découpage municipal montrant les MRC et les municipalités présentes sur le territoire.	50
Figure 3-6 : Affectations du territoire pour le territoire de CHCN.	53
Figure 3-7 : Occupation du sol pour le territoire de CHCN.	54
Figure 3-8 : Densité des impacts potentiels des activités anthropiques.	58
Figure 4-1 : Localisation du territoire à l'étude situé dans les provinces de Grenville et des Appalaches et sur une partie de la Plate-Forme du Saint-Laurent.	60
Figure 4-2 : Le territoire de Charlevoix et de la Haute-Côte-Nord qui se localise dans le Grenville, correspond selon Rivers et al. (1989) à l'allochtone polycyclique (tiré de Hocq, 1994).	61
Figure 4-3 : Carte géologique présentant l'information géologique disponible à l'échelle 1 : 250 000 dans le SIGEOM (2012).	62
Figure 4-4 : Séquence stratigraphique correspondant à la séquence ordovicienne observée dans la région de Charlevoix (tiré de Lemieux et al., 2003).	63
Figure 4-5 : Localisation de la Faille du Saint-Laurent et de la Faille Logan. Seul le territoire de Charlevoix est illustré puisque ces failles ne se prolongent pas sur le territoire de la Haute-Côte-Nord.	65
Figure 4-6 : a) Topographie et domaines annulaires caractérisant l'astroblème de Charlevoix, les limites des domaines sont schématisées par des lignes courbes. b) Figure tirée de la thèse de D.W. Roy (1979) montrant a) les limites de l'astroblème de Charlevoix en trait gras, b) les autres fractures en trait régulier, 1) les failles normales, 2) les fractures, 3) les failles inverses.	66
Figure 4-7 : Principales failles fragiles, linéaments majeurs et mineurs interprétés.	68

Figure 4-8 : Carte géologique du territoire résultant de l'intégration par le CERM de l'information géologique disponible à l'échelle 1 : 250 000 dans le SIGÉOM (MERN 2012) provenant majoritairement des travaux de Rondot (1979, 1986, 1989) et de Morin (1987).	69
Figure 4-9 : Représentation cartographique des lambeaux de roches ordoviciennes dans le secteur de l'astroblème de Charlevoix.	71
Figure 4-10 : La densité de fracturation observée sur environ 80 affleurements localisés dans le secteur de l'astroblème de Charlevoix est représentée par un indice d'intensité allant de 1 à 5, soit peu à très fracturé. La légende des lithologies est présentée à la figure 4-8.	72
Figure 4-11 : a) Estimation du degré de fracturation dans le secteur de Saint-Urbain et b) Estimation du degré de fracturation pour le secteur du Hameau du Cap Blanc à Saint-Irénée.	73
Figure 4-12 : Quartzite observée au Hameau du Cap Blanc, l'indice de fracturation est de 5 (photo AFF068-2).	74
Figure 4-13 : Affleurement observé en bordure de la rivière du Gouffre à la hauteur de la fosse Antonien montrant la fracturation importante de l'anorthosite de Saint-Urbain avec un indice de fracturation de 5 (photo AFF002-3).	74
Figure 4-14 : Calcaire observé dans une carrière de La Malbaie dont l'indice de fracturation est de 3 (photo AFF014-3). La présence d'une faille et de crochons de plis sont notables.	75
Figure 4-15 : Charnockite observée dans une carrière à La Malbaie (photo AFF018A-3).	75
Figure 4-16 : <i>Shatter cones</i> observés sur un affleurement de charnockite dans une carrière localisée aux Éboulements (photo identifiée AFF023-2).	76
Figure 4-17 : Pseudotachylite sous forme a) de veinules (photo AFF055A-10) et b) d'amas (photo AFF055B-2) observées dans le secteur du chemin de la Seigneurie aux Éboulements.	77
Figure 4-18 : Dyke bréchiq polygénique d'environ 40 cm d'épaisseur injecté dans une fracture des paragneiss observés en bordure de route dans le chemin du Hameau du Cap Blanc à Saint-Irénée.	77
Figure 4-19 : Cartographie des dépôts de surface du territoire de CHCN (Cousineau et al., 2014; légende à la page suivante).	79
Figure 4-20 : Till mince en alternance avec le roc affleurant, secteur de Forestville au nord-est de la rivière Sault-aux-Cochons (photo EB06210037a).	81
Figure 4-21 : Till en couverture continue d'une épaisseur de 8 mètres au nord-ouest de la municipalité de Portneuf-sur-Mer.	82
Figure 4-22 : Moraine de Saint-Narcisse observée dans la municipalité de Saint-Hilarion (photo EB07220202a).	83
Figure 4-23 : Sédiments de plaine d'épandage subaérien observés dans le Parc national des Grands-Jardins, région de Charlevoix (photo JB07310300a).	84
Figure 4-24 : Sédiments littoraux et sublittoraux (LGb) observés au sud de Saint-Hilarion (photo JB07230218a).	85
Figure 4-25 : Coupe de dépôts glaciomarins argileux, MGa (photo BP06250075d) observée dans la municipalité de Colombier.	86
Figure 4-26 : Sédiments littoraux et pré-littoraux glaciomarins, MGb (photo EB06190013a) observé dans la municipalité de Forestville.	87
Figure 4-27 : Sédiments glaciomarins littoraux et pré-littoraux oxydés correspondant à une ferricroûte (photo BP06260087b), observés au nord de la municipalité de Colombier.	88
Figure 4-28 : Sédiments glaciomarins deltaïques, MGd (photo BP07020111a) observés le long du Fleuve Saint-Laurent dans la municipalité de Portneuf-sur-Mer.	89
Figure 4-29 : Sédiments marins profonds observés à l'Isle-aux-Coudres (photo BP08090470b).	90
Figure 4-30 : Sédiments marins composés de sable moyen stratifié (photo BP06250078b) observés à l'est de la municipalité de Colombier.	91
Figure 4-31 : Alluvions des terrasses fluviales anciennes montrant un horizon de sédiments grossiers de la rivière Sainte-Marguerite à Sacré-Cœur (photo BP06270097b).	92
Figure 4-32 : Alluvions actuels de la rivière Portneuf (photo BP06200059a).	93

Figure 4-33 : Dunes de Tadoussac, sédiments éoliens (photo BP07080151a).	94
Figure 4-34 : Tablier d'éboulis (photo BP06210070g) dans le secteur de Baie-Saint-Paul.	95
Figure 4-35 : Localisation des données ponctuelles existantes totales (a) et des données ponctuelles existantes atteignant le roc (b).	96
Figure 4-36 : Localisation des deux sections géoélectriques (COLNTL1 et COLNTL2) et du sondage par rotoperçusion (RPSS-COL1).	97
Figure 4-37 : Sections géoélectriques COLNTL1 (a) et COLNTL2 (b).	98
Figure 4-38 : Localisation des cinq sections géoélectriques (FORNTL1, FORNTL2, FORNTL3, FORNTL4 et FORNTL5) et des trois sondages par rotoperçusion (RPSS-FOR1, RPSS-FOR2 et RPSS-FOR3).	99
Figure 4-39 : Sections géoélectriques FORNTL1 (a), FORNTL3 (b), FORNTL4 (c) et FORNTL5 (d).	100
Figure 4-40 : Localisation des seize levés géophysiques ponctuels (PORL0ST1 à PORL0ST16) et des sondages par rotoperçusion (RPSS-PSM1, RPSS-PSM2 et RPSS-PSM3).	101
Figure 4-41 : Résistivité électrique correspondant aux levés géophysiques ponctuels PORL0ST3 (a), PORL0ST5 (b) et PORL0ST12 (c). La profondeur se trouve sur l'axe horizontal.	103
Figure 4-42 : Localisation des cinq levés géophysiques ponctuels (LONNTL0ST1 à LONNTL0ST5).	104
Figure 4-43 : Résistivité électrique correspondant aux levés géophysiques ponctuels LONNTL0ST3 (a) et LONNTL0ST4 (b). La profondeur se trouve sur l'axe horizontal.	105
Figure 4-44 : Localisation des quatre sections géoélectriques (LESNTL1, LESNTL2, LESNTL3 et LESNTL4).	106
Figure 4-45 : Sections géoélectriques LESNTL1 (a), LESNTL2 (b), LESNTL4 (c) et LESNTL5 (d).	107
Figure 4-46 : Localisation des trois levés géophysiques ponctuels (BERNTL1ST1, BERNTL1ST2 et BERNTL1ST3) et des trois sondages par rotoperçusion (RPSS-BER1, RPSS-BER3, RPSS-BER4) et d'un sondage au piézocône (RPSS-BER2).	108
Figure 4-47 : Coupe stratigraphique orientée NW-SE présentant la stratigraphie obtenue à partir des sondages par rotoperçusion.	109
Figure 4-48 : Résistivité électrique correspondant au levé géophysique ponctuel BERNTL1ST1.	110
Figure 4-49 : Localisation des neuf levés géophysiques ponctuels (SACNTL0ST1, SACNTL0ST2, SACNTL2ST1 à SACNTL2ST4, SACNTL3ST1 à SACNTL3ST3), de la section géoélectrique (SACNTL1) et des deux sondages par rotoperçusion (RPSS-SC1 et RPSS-SC2).	111
Figure 4-50 : Résistivité électrique correspondant aux levés géophysiques ponctuels SACNTL0ST1 (a), SACNTL2ST2 (b) et SACNTL3ST1 (c).	112
Figure 4-51 : Section géoélectrique SACNTL1.	113
Figure 4-52 : Localisation des trois sections géoélectriques (STSNTL1, STSNTL2 et STSNTL3) et des deux profils de résistivité électrique (STSREL1 et STSREL2).	114
Figure 4-53 : Sections géoélectriques STSNTL2 (a) et STSNTL3 (b).	115
Figure 4-54 : Localisation des quatre sections géoélectriques pour les secteurs La Malbaie (LAMNTL1) et Kane (KANNTL1, KANNTL2 et KANNTL3).	116
Figure 4-55 : Sections géoélectriques LAMNTL1 (a), KANNTL2 (b) et KANNTL3 (c).	117
Figure 4-56 : Localisation des quatre sections géoélectriques pour le secteur de Saint-Urbain (STUTL1, STUNTL2, STUNTL3 et STUNTL4).	118
Figure 4-57 : Section géoélectrique STUNTL3.	119
Figure 4-58 : Localisation de la section géoélectrique pour le secteur de l'Isle-aux-Coudres (IACNTL1) et de la ligne de résistivité électrique (IACREL1).	120
Figure 4-59 : Section géoélectrique IACNTL1 (a) et tomographie de résistivité électrique IACREL1 (b).	121
Figure 4-60 : Localisation des 147 coupes stratigraphiques interprétées sur l'ensemble du territoire d'étude.	122
Figure 4-61 : Gabarit utilisé pour l'interprétation des coupes stratigraphiques.	125
Figure 4-62 : Coupes stratigraphiques #512, secteur de la rivière du Gouffre.	127
Figure 4-63 : Représentation des 147 coupes stratigraphiques sous forme de diagrammes barrières.	128

Figure 4-64 : (a) Répartition des stations possédant une valeur d'épaisseur de dépôts et (b) Densité des stations possédant une valeur d'épaisseur de dépôts.	130
Figure 4-65 : Localisation des affleurements pour le territoire de CHCN.	131
Figure 4-66 : Forages virtuels créés le long d'une coupe stratigraphique (exagération verticale de 30x).	132
Figure 4-67 : Quadrillage de points créés sur les dépôts minces ou nuls.	133
Figure 4-68 : Les quatre secteurs d'interpolation avec leurs sous-domaines.	134
Figure 4-69 : Type de données sources utilisées par secteur : (a) secteurs de Charlevoix, de l'astroblème et de l'Isle-aux-Coudres, (b) secteur de la Haute-Côte-Nord.	135
Figure 4-70 : Effet de l'ajout des forages n'atteignant pas le roc sur la modélisation de l'épaisseur des dépôts. Modifié de Dugrain (2011).	137
Figure 4-71 : Fonctionnement du filtre passe-bas.	138
Figure 4-72 : Épaisseur des dépôts dans l'astroblème de Charlevoix.	139
Figure 4-73 : Épaisseur des dépôts sur le territoire de la MRC de La Haute-Côte-Nord.	140
Figure 4-74 : Modélisation de la topographie du roc par l'application de la <i>Méthode 1</i> .	142
Figure 4-75 : Comportement des deux méthodes d'interpolation aux points d'élévation connus.	143
Figure 4-76 : Topographie du roc obtenu avec la méthode TIN.	144
Figure 5-1 : Bilan hydrologique.	145
Figure 5-2 : Maillage des données climatologiques (TM, Tm, P, Av) fournies par le CEHQ.	146
Figure 5-3 : Points de données climatologiques (TM, Tm, P, Av) sélectionnés pour le calcul de la recharge.	147
Figure 5-4 : Les stations météorologiques (DÉEE – SIMAT, MDDELCC) actives de 2005 à 2009.	147
Figure 5-5 : Artéfacts d'interpolations des données climatologiques fournies par le CEHQ.	148
Figure 5-6 : Exemple des variations pluviométriques et d'apports verticaux pour l'année 2009.	149
Figure 5-7 : Les apports verticaux (Av) pour l'année 2009.	150
Figure 5-8 : L'évapotranspiration réelle (ETr) pour l'année 2009.	153
Figure 5-9 : Couverture territoriale des CNI.	156
Figure 5-10 : Classes de condition d'humidité moyenne en fonction des indices API et de la saison.	157
Figure 5-11 : Impacts du rapport hia/hs sur le nombre de jours de ruissellements effectifs.	159
Figure 5-12 : Le ruissellement (hRu) pour l'année 2009.	161
Figure 5-13 : Mobilité de l'eau dans le sol et le sous-sol.	162
Figure 5-14 : Méthode géomatique d'estimation de la recharge annuelle.	163
Figure 5-15 : La recharge annuelle (moyenne des années 2005 à 2009).	165
Figure 6-1: Cycle d'optimisation continue des connaissances hydrogéologiques régionales.	166
Figure 6-2 : Porosité primaire et porosité secondaire (modifiée de Banton et Bangoy, 1999).	167
Figure 6-3 : Mobilité de l'eau.	168
Figure 6-4 : Nappe libre et nappe captive.	170
Figure 6-5 : Valeurs moyennes de conductivité hydraulique pour différentes entités géologiques (Freeze et Cherry, 1979).	171
Figure 6-6 : Variations de la transmissivité dans un aquifère.	172
Figure 6-7 : Gradient hydraulique.	173
Figure 6-8 : Éléments de cartographie piézométrique.	173
Figure 6-9 : Toit et surface piézométrique d'une nappe.	174
Figure 6-10 : Piézométrie de nappe et piézométrie régionale.	175
Figure 6-11 : Simplification de la géologie régionale.	178
Figure 6-12 : Simplification de la cartographie quaternaire.	179
Figure 6-13 : Représentation schématique des limites hydrogéologiques interprétées à partir de coupes stratigraphiques.	180
Figure 6-14 : Limites hydrogéologiques interprétées à partir de coupes stratigraphiques.	180

Figure 6-15 : Limites hydrogéologique interprétées à partir des lignes d'écoulement.	181
Figure 6-16 : Principe d'assemblage.	185
Figure 6-17 : Ordres absolu et relatif.	185
Figure 6-18 : Représentation schématique de visualisation cartographique par contestes hydrogéologiques.	186
Figure 6-19 : Représentation schématique de visualisation cartographique par ordre absolu.	187
Figure 6-20 : Représentation schématique de visualisation cartographique par ordre relatif.	187
Figure 6-21 : Séquences stratigraphiques et contextes hydrogéologiques.	188
Figure 6-22 : Exemple de limites d'entités hydrogéologiques régionales (Niv1) en milieux poreux (ordre absolu).	191
Figure 6-23 : Exemple de limites d'entités hydrogéologiques régionales (Niv1) en milieux mixtes et fracturés (ordre absolu).	192
Figure 6-24 : Modèle de fiche hydrogéologique de niveau 2.	194
Figure 6-25 : Modèle de fiche hydrogéologique de niveau 3.	199
Figure 6-26 : Statistiques et localisations du coefficient d'emmagasinement, de la transmissivité et de la conductivité hydraulique des milieux perméables.	204
Figure 6-27 : Statistiques et localisations du coefficient d'emmagasinement, de la transmissivité et de la conductivité hydraulique des milieux semi-perméables.	206
Figure 6-28 : Localisation des stations d'échantillonnage hydrogéochimique.	208
Figure 6-29 : Concentration en calcium (a), de l'alcalinité totale (b) et des sulfates (c) pour l'eau souterraine provenant d'aquifères granulaire et en milieu fracturé.	213
Figure 6-30 : Concentration en magnésium (a), en potassium (b), en chlorures (c) et en sodium (d) pour l'eau souterraine provenant d'aquifères granulaire et en milieu fracturé.	214
Figure 6-31 : Diagramme de Durov présentant 105 échantillons d'eau souterraine provenant du territoire CHCN (tiré de Ghesquière et al., 2015).	216
Figure 6-32 : Groupes d'eau obtenus par l'analyse multifactorielle pour les aquifères en milieu poreux et en milieu fracturé; C1 : groupe 1, C2 : groupe 2, C3 : groupe 3 et C4 : groupe 4 (tirée de Ghesquière et al., 2015).	217
Figure 6-33 : Localisation des échantillons d'eau souterraine douce et salée selon le diagramme de Durov et correspondant aux 4 groupes résultant de l'analyse multifactorielle (Ghesquière et al., 2015).	219
Figure 6-34 : Extrait de la répartition de points de cote piézométrique.	220
Figure 6-35 : Validation des hypothèses d'interpolation de la piézométrie.	221
Figure 6-36 : Profondeur de l'eau souterraine du territoire CHCN.	222
Figure 6-37 : Piézométrie et écoulements régionaux du territoire de CHCN.	223
Figure 6-38 : Zones de forte recharge et de recharge préférentielle du territoire de CHCN.	225
Figure 6-39 : Zones de résurgences ou d'affleurement potentiel de nappe du territoire CHCN.	227
Figure 7-1 : Localisation de 50 stations de prélèvements d'eau distribuée dans les réseaux municipaux pour l'alimentation en eau potable.	229
Figure 7-2 : Installation de captage de la résurgence dans un caisson de béton (a) et vue de l'intérieur du caisson avec les tuyaux d'amenés d'eau (b).	231
Figure 7-3 : Captage de résurgence à Saint-Urbain; a) exemple de caisson de béton qui confine l'eau de résurgence avant qu'elle soit acheminée vers la station de distribution (b) quelques mètres plus bas.	232
Figure 7-4 : Bassin servant à capter l'eau de résurgence aux Éboulements avant qu'elle soit acheminée vers la station de traitement.	233
Figure 7-5 : Vue des bassins de captage de l'eau de résurgence à Forestville. Les poutres installées en surface servent à diminuer la vitesse d'écoulement de l'eau.	234
Figure 7-6 : Localisation des 45 ouvrages de captage d'eau souterraine relevés par le PACES-CHCN.	235
Figure 7-7 : Localisation des ouvrages captant l'eau souterraine d'aquifères rocheux fracturés. A) Six ouvrages captent l'eau souterraine du contexte hydrogéologique de type A; B) trois ouvrages captent l'eau souterraine du contexte hydrogéologique de type B; C) sept ouvrages captent l'eau souterraine du contexte	

hydrogéologique de type C; D) deux ouvrages captent l'eau souterraine du contexte hydrogéologique de type F.	237
Figure 7-8 : Localisation des ouvrages captant l'eau souterraine d'aquifères granulaires; a) Un ouvrage capte l'eau souterraine du contexte hydrogéologique A; b) trois ouvrages captent l'eau souterraine du contexte hydrogéologique de type E; c) vingt-trois ouvrages captent l'eau souterraine du contexte hydrogéologique de type F dont les trois localisés à Longue-Rive (d).	239
Figure 7-9 : Proportions des volumes annuels estimés d'eau de surface distribuée par les réseaux municipaux et les installations privées a) par MRC et b) pour l'ensemble du territoire.	241
Figure 7-10 : a) Évolution de la population entre 2000 et 2011 et b) augmentation de la consommation d'eau souterraine pour l'alimentation en eau potable.	243
Figure 7-11 : Estimations des volumes d'eau souterraine consommés annuellement a) par méthodes et b) par catégories d'usages	245
Figure 7-12 : Proportion des volumes annuels estimés d'eau de surface et d'eau souterraine prélevées a) par MRC et b) pour l'ensemble du territoire.	246
Figure 7-13 : Volumes annuels estimés d'eau de surface et d'eau souterraine consommées par MRC présentés a) sous forme de proportion et b) en m ³ /année.	248
Figure 7-14 : Localisation des échantillons d'eau souterraine montrant des dépassements de CMA pour a) les fluorures et b) l'uranium.	252
Figure 7-15 : Localisation des échantillons d'eau souterraine montrant des dépassements des OE pour les paramètres mesurés <i>in situ</i> tels a) les matières dissoutes totales et b) le pH.	256
Figure 7-16 : Localisation des échantillons d'eau souterraine montrant des dépassements des OE pour la température mesurée <i>in situ</i> .	257
Figure 7-17 : Localisation des échantillons d'eau souterraine montrant des dépassements des OE pour a) l'aluminium et b) la dureté estimée.	259
Figure 7-18 : Localisation des échantillons d'eau souterraine montrant des dépassements des OE pour a) le fer et b) le manganèse.	260
Figure 7-19 : Localisation des échantillons d'eau souterraine montrant des dépassements des objectifs esthétiques (OE) pour a) les chlorures, b) le sodium et c) les sulfures.	261
Figure 7-20 : Représentation schématique de la méthode DRASTIC et de la pondération des paramètres à la base de son évaluation (modifié de Franklin et Turner, 2009).	263
Figure 7-21 : Représentation matricielle des cotes DRASTIC pour chaque classe de profondeur d'eau (a) et pour chaque classe de recharge efficace (b).	265
Figure 7-22 : Représentation matricielle des cotes DRASTIC pour a) le premier milieu aquifère intercepté à partir de la surface, et b) chaque type de sol.	267
Figure 7-23 : Représentation matricielle des cotes DRASTIC pour a) la pente du sol et b) le milieu géologique correspondant à la zone vadose.	268
Figure 7-24 : Représentation matricielle des cotes DRASTIC pour la conductivité hydraulique.	269
Figure 7-25 : Relativité de la vulnérabilité DRASTIC.	271
Figure 7-26 : Exemple d'aires d'alimentation et de protections des ouvrages de captage.	272
Figure 8-1 : Proposition de structure de gestion régionale de la ressource en eau souterraine.	290

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 : Pourcentage de la population, en 2000, qui s'alimente en eau potable à partir d'eau souterraine pour chacune des MRC.	2
Tableau 1-2 : Liste des partenaires régionaux et de leur représentant sur le comité de suivi du projet PACES-CHCN.	4
Tableau 1-3 : Présentation de l'équipe de réalisation du projet PACES-CHCN.	5
Tableau 1-4 : Liste des cartes produites dans le cadre du projet PACES-CHCN	6
Tableau 2-1 : Données numériquement structurées disponibles se rapportant au milieu naturel.	9
Tableau 2-2 : Données numériques structurées disponibles se rapportant au milieu humain.	10
Tableau 2-3 : Données numériques disponibles se rapportant aux contextes géologique et hydrogéologique.	11
Tableau 2-4 : Données non numériquement structurées disponibles se rapportant aux contextes géologique et hydrogéologique.	12
Tableau 2-5 : Autorisation d'accès, d'utilisation et de diffusion, et nombre de rapports récupérés par municipalité.	13
Tableau 2-6 : Compilation des levés géophysiques réalisés par NanoTEM, résistivité électrique et sismique réfraction en 2013 et 2014.	18
Tableau 2-7 : Descriptions des installations piézométriques.	22
Tableau 2-8 : Données de localisations des sondages par rotopercussion et au piézocône.	23
Tableau 2-9 : Liste des paramètres physico-chimiques analysés en laboratoire et mesurés <i>in situ</i> .	28
Tableau 2-10 : Cote servant à estimer visuellement le degré de fracturation observé sur un affleurement.	30
Tableau 2-11 : Données numériques géologiques et hydrogéologiques ponctuelles récupérées et traitées.	32
Tableau 2-12 : Nombre d'éléments extraits des rapports par type de données.	34
Tableau 2-13 : Code abrégé de la Commission géologique du Canada pour la description de dépôts meubles.	36
Tableau 2-14 : Données géologiques et hydrogéologiques ponctuelles initialement non numériques récupérées à partir de document papier ou PDF.	37
Tableau 2-15 : Nouvelles données non numériques acquises sur le terrain.	38
Tableau 3-1 : Résumé des caractéristiques des principales rivières du territoire de CHCN.	47
Tableau 3-2 : Nombre de stations hydrométriques par rivière.	47
Tableau 3-3 : Superficie et population par territoire municipalisé. Les données de population proviennent du recensement de la population du Canada réalisé en 2011.	51
Tableau 3-4 : Routes nationales présentes sur le territoire de CHCN.	51
Tableau 3-5 : Municipalités reliées par une traverse maritime sur le territoire de CHCN.	52
Tableau 3-6 : Activités anthropiques pouvant avoir un impact sur l'eau souterraine.	55
Tableau 3-7 : Niveaux d'impact qualitatif attribués à l'activité à partir de la cote d'impact potentiel.	57
Tableau 4-1 : Proportion des stations utilisées lors de l'interprétation des coupes stratigraphiques selon leur source.	124
Tableau 4-2 : La quantité de données sources présentes dans chacune des zones et utilisées pour la première interpolation.	136
Tableau 4-3 : Paramètres des semi-variogrammes théoriques pour chacune des zones.	136
Tableau 4-4 : Quantité de données sources ajoutées dans chacune des zones pour la deuxième interpolation.	137
Tableau 4-5 : Paramètres des semi-variogrammes théoriques pour chacune des zones.	137
Tableau 4-6 : Valeurs obtenues pour la validation des modèles de l'épaisseur des dépôts meubles.	140
Tableau 5-1 : Classement des types de sol selon leur capacité de ruissellement.	155
Tableau 5-2 : Curve Number moyen (CNI) selon le groupe de dépôt et leur pente (modifiée de Monfet 1979).	155
Tableau 5-3 : Synthèse des causes d'erreur dans l'estimation de la recharge.	164
Tableau 6-1 : Unités hydrogéologiques de base du territoire de CHCN.	184
Tableau 6-2 : Liste des entités hydrogéologiques de niveau 2	193
Tableau 6-3 : Liste des entités hydrogéologiques de niveau 3.	195
Tableau 6-4 : Répartition des valeurs de propriétés hydrauliques, par paramètre, type de milieu et source de donnée	201
Tableau 6-5 : Résultats statistiques par paramètres.	210

Tableau 6-6 : Nombre d'échantillons par type d'eau provenant d'aquifères en milieu poreux ou en milieu fracturé.	215
Tableau 7-1 : Population, origine de l'eau prélevée et milieu aquifère capté pour chaque territoire municipalisé.	230
Tableau 7-2 : Volumes estimés d'eau de surface distribuée annuellement provenant des réseaux municipaux ou d'installations privées.	240
Tableau 7-3 : Volumes estimés d'eau souterraine consommée annuellement pour chacune des quatre catégories d'usage.	242
Tableau 7-4 : Pourcentage de la population, en 2000, qui s'alimente en eau potable à partir d'eau de surface et souterraine pour chacune des MRC.	242
Tableau 7-5 : Volumes estimés d'eau de surface et souterraine consommée annuellement pour chaque MRC.	245
Tableau 7-6 : Paramètres concernant les substances inorganiques analysés dans le cadre du PACES-CHCN et qui sont considérés dans le Règlement sur la qualité de l'eau potable; ces paramètres doivent respecter la concentration maximale acceptable.	250
Tableau 7-7 : Stations et échantillons dont les concentrations pour les fluorures et l'uranium sont supérieures aux CMA selon le RQEP.	251
Tableau 7-8 : Paramètres analysés dans le cadre du PACES-CHCN et pour lesquels des objectifs esthétiques sont recommandés par Santé Canada.	253
Tableau 7-9 : Stations et échantillons dont les concentrations ne correspondent pas aux objectifs esthétiques (OE) selon Santé Canada pour les paramètres mesurés in situ.	254
Tableau 7-10 : Stations et échantillons dont les concentrations pour certains paramètres sont supérieures aux objectifs esthétiques (OE) selon Santé Canada pour les paramètres analysés en laboratoire.	258
Tableau 7-11 : Cote DRASTIC pour chaque classe de profondeur d'eau.	264
Tableau 7-12 : Cote DRASTIC pour chaque classe de recharge efficace.	265
Tableau 7-13 : Cote DRASTIC pour chaque classe d'aquifère granulaire et rocheux fracturé.	266
Tableau 7-14 : Cote DRASTIC pour chaque type de sol.	266
Tableau 7-15 : Cote T de DRASTIC pour chaque classe de pente.	267
Tableau 7-16 : Cote DRASTIC selon la nature de la zone vadose.	268
Tableau 7-17 : Cote DRASTIC pour chaque classe de conductivité.	269
Tableau 7-18 : Nombre de puits de captage et d'aires d'alimentation déterminées.	273

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Cartes A0 présentées en format réduit 8 ½ x 11

295

Annexes numériques

AN1 Cartes en format A0

Carte #1	Topographie
Carte #2	Routes, limites municipales et toponymie
Carte #3	Modèle numérique de terrain
Carte #4	Pente du sol
Carte #5	Hydrographie
Carte #6	Bassins versants
Carte #7	Occupation du sol
Carte #8	Couverture végétale
Carte #9	Milieux humides
Carte #10	Affectation du territoire
Carte #11	Pédologie
Carte #12	Géologie du Quaternaire
Carte #13	Géologie du roc
Carte #14	Localisation des coupes stratigraphiques
Carte #15	a) Épaisseur des dépôts meubles b) Erreur type de l'épaisseur des dépôts meubles
Carte #16	a) Topographie du roc b) Topographie du roc TIN
Carte #17	Contextes hydrogéologiques
Carte #18	a) Limites des unités hydrogéologiques perméables et imperméables b) Limites des unités hydrogéologiques semi-perméables
Carte #19	Piézométrie régionale
Carte #22	Vulnérabilité de l'aquifère situé le plus près de la surface
Carte #23	Activités potentiellement polluantes pour l'eau souterraine
Carte #24	Qualité de l'eau en fonction des concentrations maximales acceptables (CMA)
Carte #25	Qualité de l'eau en fonction des objectifs esthétiques
Carte #26	Utilisation de l'eau
Carte #27	Stations météorologiques, hydrométriques et de suivi de la nappe
Carte #28	Zones de recharge préférentielle et de résurgence

- AN2 Ententes :
- a) Formulaires complétés par les municipalités;
 - b) Entente avec municipalités;
 - c) Entente avec les propriétaires pour les travaux de géophysiques;
 - d) Entente avec les propriétaires pour les sondages par rotopercussion et au piézocône;
 - e) Entente avec les propriétaires pour l'accès aux puits individuels.
- AN3 Rapports géophysiques :
- a) Rapport préliminaire, 2013
 - b) Rapport final, 2015
- AN4 Résultats des sondages par rotopercussion et au piézocône
- AN5 Protocole d'échantillonnage géochimique
- AN6 Protocole de numérisation et d'archivage
- AN7 Protocole de fiabilité et validation
- AN8 Description des tables constituant la base de données à référence spatiale
- AN9 Protocole – Activités potentiellement polluantes
- AN10 L'astroblème de Charlevoix
- AN11 147 coupes stratigraphiques
- AN12 Fiches hydrogéologiques
- AN13 Protocole – Utilisation de l'eau
- AN14 Protocole Vulnérabilité des aquifères – DRASTIC

1 INTRODUCTION

Au Québec, la ressource en eau souterraine est fortement sollicitée pour l'alimentation en eau potable sur 90% du territoire municipalisé, ce qui permet de répondre aux besoins en eau potable d'environ 20% de la population. Cette ressource étant sensible et souvent vulnérable à la contamination, il est nécessaire de la connaître le mieux possible. Toutefois, les connaissances sur la quantité et la qualité de l'eau souterraine et des aquifères sont fragmentaires et hétérogènes sur le territoire québécois.

1.1 Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines

Dans une perspective de protection et de pérennité de la ressource, le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs a élaboré en 2008 le Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES). Ce programme s'inscrit dans le cadre de la Loi affirmant le caractère collectif des ressources en eau et visant à renforcer leur protection. Ce programme a permis jusqu'à maintenant de caractériser la ressource en eau souterraine sur le territoire municipalisé de treize territoires dont sept ont été complétés en mars 2013 (PACES 1 et PACES 2 sur la figure 1-1) et six en mars 2015 (PACES 3 sur la figure 1-1).

En 2012, le Centre d'études sur les ressources minérales (CERM) de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) a été mandaté par le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs¹ (MDDEFP) pour faire l'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire de Charlevoix et de la Haute-Côte-Nord (PACES-CHCN).

Les principaux objectifs du projet PACES-CHCN consistent à :

- Dresser **un portrait** de la ressource en eaux souterraines sur le territoire.
- Établir **l'état de cette ressource**, sa recharge et sa vulnérabilité.
- **Développer des partenariats** entre les acteurs de l'eau et les gestionnaires du territoire afin de favoriser une **saine gestion de la ressource**.
- Répondre aux **préoccupations du milieu** en ce qui concerne la ressource en eau souterraine.

Le projet a été réalisé sur une période de trois ans dont chaque année correspond approximativement à une phase spécifique.

- La Phase 1 (compilation) a consisté à la collecte des données existantes et leur intégration dans une base de données spatiales. Cette étape se conclut par la rédaction d'un rapport synthèse des informations existantes, l'indication des données manquantes et la planification des travaux requis pour compléter l'état des connaissances.
- La Phase 2 (levés de terrain) a permis la réalisation de travaux de terrain nécessaires à l'obtention d'informations complémentaires ou manquantes ainsi qu'à l'intégration des nouvelles données dans la base de données.
- La Phase 3 (synthèse) a consisté en l'intégration et l'analyse des données ainsi qu'à la création des cartes hydrogéologiques, de l'atlas et du rapport final dans lequel des recommandations portant sur la protection et la gestion de l'eau souterraine sur le territoire à l'étude sont élaborées.

¹ Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) depuis avril 2014.

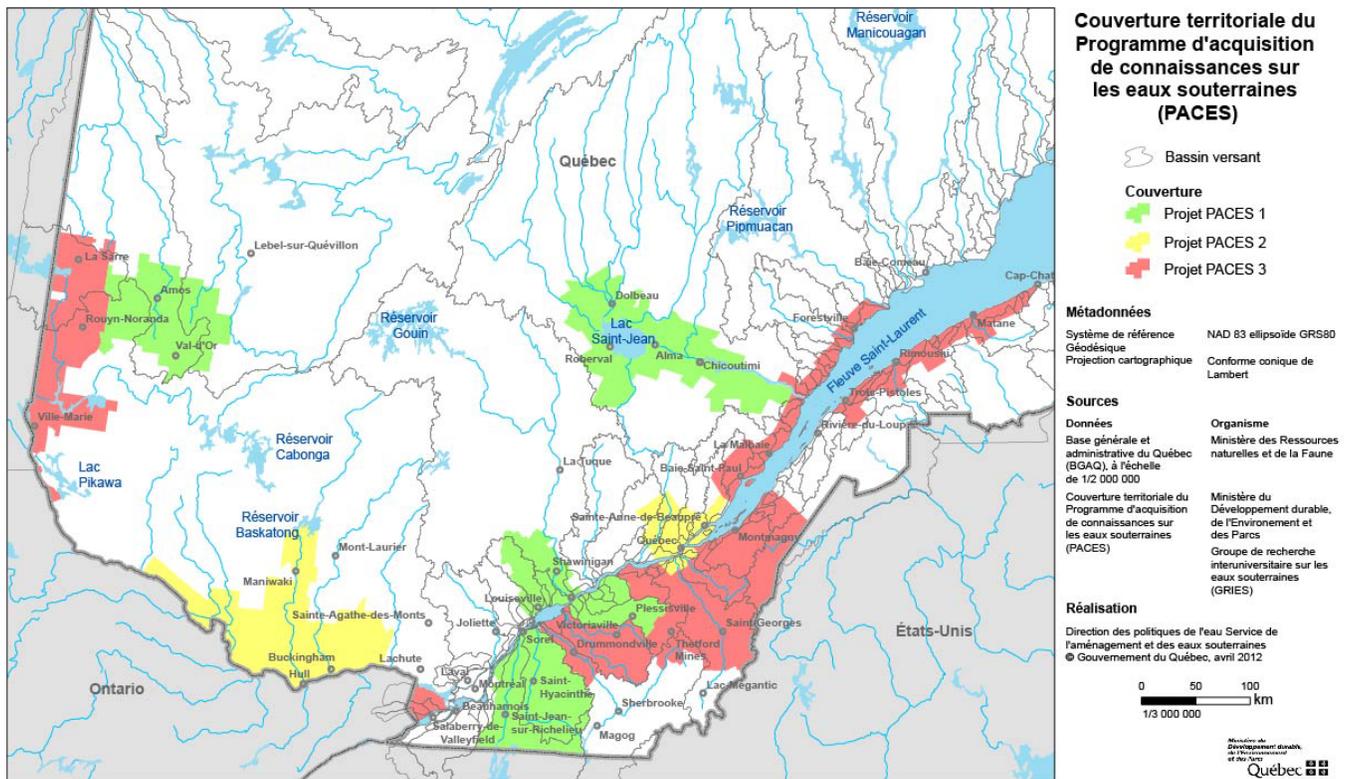


Figure 1-1 : Localisation des projets PACES 1, 2 et 3 (MDDEFP, 2012).

1.2 Territoire à l'étude

Une étude du ministère de l'Environnement réalisée dans le cadre de la vaste consultation publique sur la gestion de l'eau au Québec a permis de publier, en juillet 2000, un « Portrait régional de l'eau » par région administrative du Québec. Les MRC de Charlevoix et de Charlevoix-Est appartiennent à la région administrative 03 - Capitale-Nationale (www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/regions/region03/index.htm) et la MRC de La Haute-Côte-Nord appartient à la région administrative 09 – Côte-Nord (www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/regions/regions09/index.htm). Ces études démontrent qu'en 2000, un fort pourcentage de la population s'alimente en eau souterraine (tableau 1-1) que ce soit à partir du réseau municipal ou à partir de puits individuels. Ce pourcentage est alors de 26% pour Charlevoix-Est et s'élève à 49% pour Charlevoix jusqu'à atteindre 67% pour La Haute-Côte-Nord. Avec l'évolution des normes de qualité de l'eau potable au Québec en 2001, le pourcentage de la population s'alimentant en eau souterraine a augmenté de façon significative, tant et si bien que la population de CHCN s'alimentant en eau potable à partir d'eau souterraine atteint près de 90% en 2014.

Tableau 1-1 : Pourcentage de la population, en 2000, qui s'alimente en eau potable à partir d'eau souterraine pour chacune des MRC.

MRC	Eau souterraine		Eau de surface	
	Population	%	Population	%
Charlevoix	6 329	49	6 587	51
Charlevoix-Est	4 203	26	11 962	74
La Haute-Côte-Nord	8 814	67	4 341	33

Cette publication en 2000 par le ministère de l'Environnement du Québec démontre également que le territoire considéré subit plusieurs pressions sur la ressource en eau souterraine, en lien notamment avec l'agriculture, l'élevage, l'exploitation des tourbières et le tourisme, d'où la pertinence d'augmenter le niveau de connaissances sur la ressource en eau souterraine. L'ensemble de ces informations constitue d'excellents arguments pour favoriser l'étude du territoire de CHCN dans le cadre du PACES.

Le projet PACES-CHCN vise une superficie d'environ 4 500 km² longeant la rive nord du fleuve Saint-Laurent (figure 1-2) dont l'extrémité sud-ouest correspond à la municipalité de Petite-Rivière-Saint-François et la limite nord-est à celle de Colombier. Le secteur d'étude compte un territoire autochtone et vingt-et-une municipalités réparties en trois municipalités régionales de comté (MRC), soit Charlevoix, Charlevoix-Est et La Haute-Côte-Nord. La population totale pour ces territoires est de 40 930 habitants selon les données du recensement de la population du Canada en 2011 (figure 1-2).

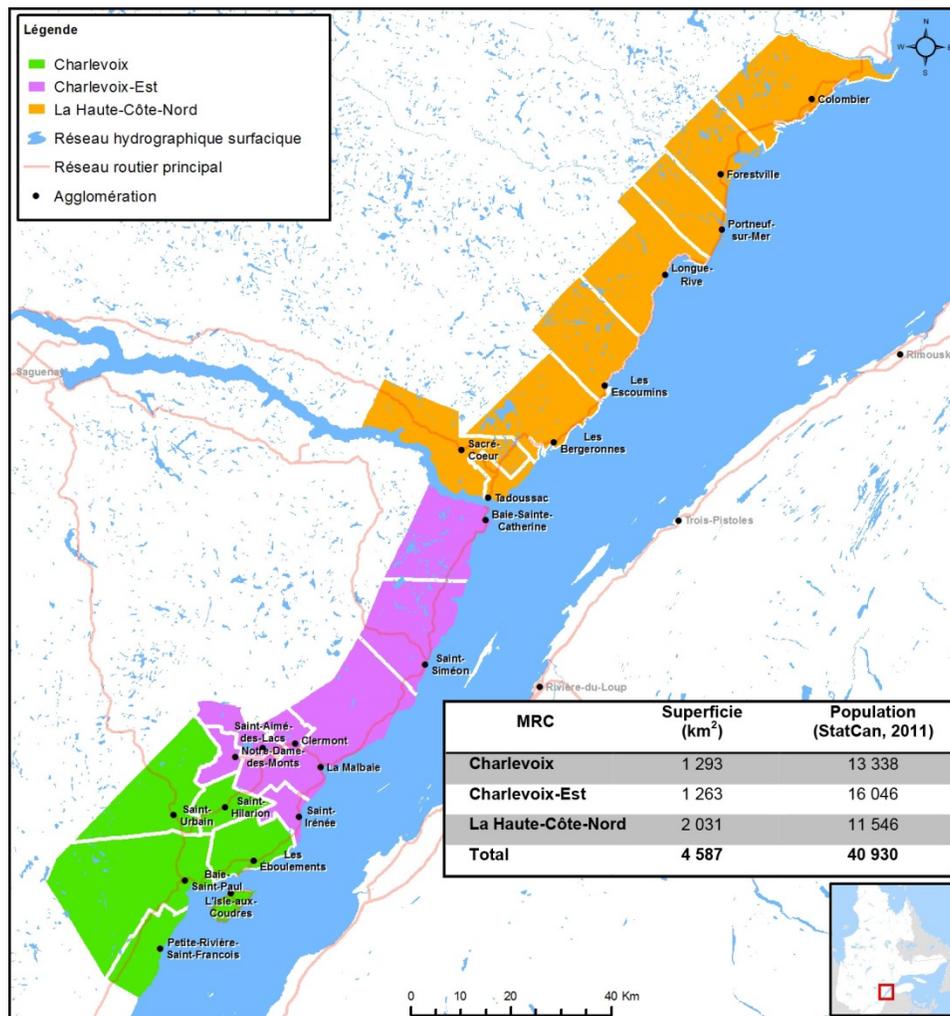


Figure 1-2 : Territoire à l'étude dans le cadre du projet PACES montrant les MRC de Charlevoix, de Charlevoix-Est et de La Haute-Côte-Nord.

1.3 Équipe de réalisation et partenaires

Pour répondre à l'objectif de développement de partenariats entre les acteurs de l'eau et les gestionnaires de la ressource, un comité de gestion (figure 1-3 et tableau 1-2) regroupant l'ensemble des acteurs impliqués dans la

réalisation du projet PACES-CHCN a été mis sur pied pour assurer le suivi du projet. Ce comité a permis d'orienter les travaux adéquatement autant pour répondre aux exigences du PACES qu'aux préoccupations du milieu en ce qui a trait aux eaux souterraines.

Mandaté par le MDDEFP, le CERM de l'UQAC a ainsi créé un partenariat solide avec les représentants des MRC et des organismes de bassin versant. Le CERM fait également parti du groupe de recherche universitaire sur les eaux souterraine (GRIES), permettant une concertation scientifique entre les différentes universités du Québec.

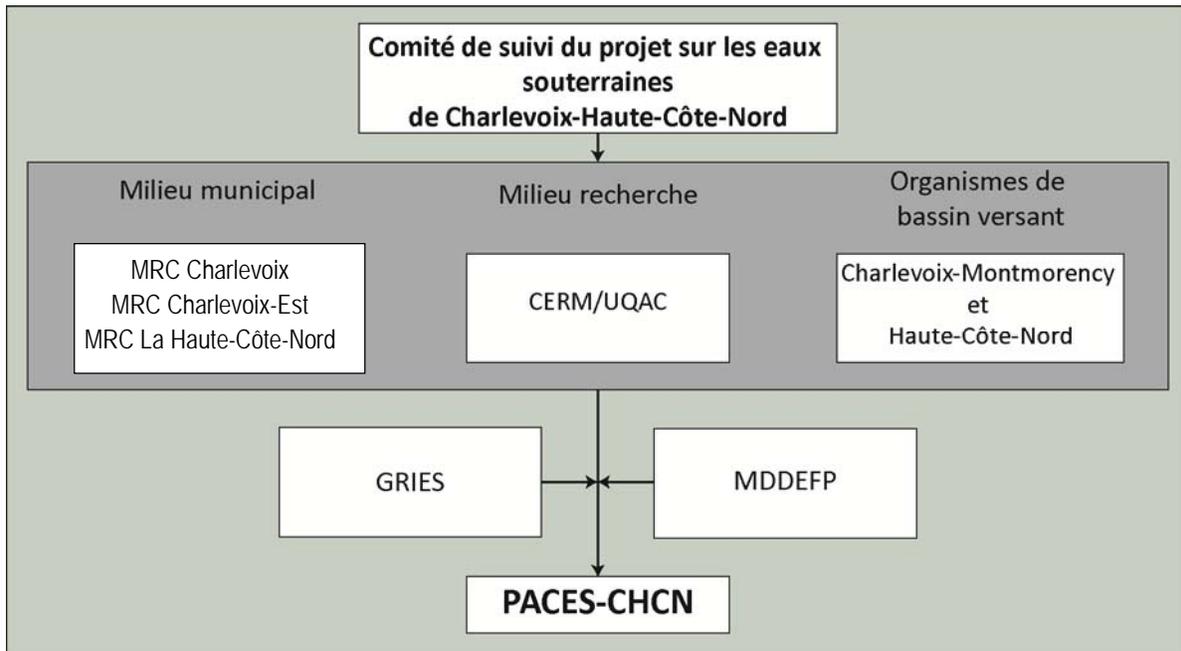


Figure 1-3 : Structure organisationnelle du projet PACES-CHCN.

Tableau 1-2 : Liste des partenaires régionaux et de leur représentant sur le comité de suivi du projet PACES-CHCN.

Partenaires régionaux	Représentant
MRC de Charlevoix	M. Stéphane Chainé, aménagiste
MRC de Charlevoix-Est	Mme France Lavoie, directrice de l'aménagement du territoire et du développement régional
MRC de La Haute-Côte-Nord	M. Kevin Bédard, directeur du service de l'aménagement du territoire
OBV Charlevoix-Montmorency	M. Jean Landry, directeur
OBV Haute-Côte-Nord	M. Yves Demers, directeur général

L'équipe multidisciplinaire constituée au sein du CERM pour réaliser le projet PACES-CHCN (tableau 1-3) se compose de six professeurs de l'UQAC, sept professionnels de recherche, deux techniciens et onze étudiants et stagiaires.

Tableau 1-3 : Présentation de l'équipe de réalisation du projet PACES-CHCN.

<i>Membre de l'équipe</i>	<i>Statut</i>	<i>Spécialité</i>
Alain Rouleau	Professeur-chercheur et co-coordonnateur du PACES-CHCN	Hydrogéologie
Réal Daigneault	Professeur-chercheur et co-coordonnateur du PACES-CHCN	Géologie structurale et géomatique
Marie-Amélie Boucher	Professeure-chercheure	Hydrologie
Romain Chesnaux	Professeur-chercheur	Hydrogéologie
Pierre Cousineau	Professeur-chercheur	Sédimentologie
Denis W. Roy	Professeur-chercheur	Géomorphologie et géologie structurale
Claude Dallaire	Professionnel de recherche	Graphiste – webmestre
Denis Germaneau	Professionnel de recherche	Hydrogéologie
Mélanie Lambert	Professionnelle de recherche	Géomatique
Brigitte Poirier	Professionnelle de recherche	Géomorphologie
Marie-Line Tremblay	Professionnelle de recherche	Hydrogéologie
Michel Tremblay	Professionnel de recherche	Administration et gestion
Julien Walter	Professionnel de recherche	Hydrogéologie
Sonia Dorval	Technicienne	Administration
David Noël	Technicien	Hydrogéologie et géophysique
Patrick Simard	Stagiaire post-doctoral	Géophysique
Anouck Ferroud	Étudiant au doctorat	Hydrogéologie
Maryline Huet	Étudiante à la maîtrise	Hydrogéologie
Ombeline Ghesquière	Étudiante à la maîtrise	Hydrogéologie
Caroline Da Silva Goncalves	Stagiaire	Géologie
Isabelle Cyr-Parent	Stagiaire	Géographie
Kaïssa Blessy	Étudiante	Géologie
Marie-Odile Chartier	Étudiante	Géologie
Thomas Foulon	Étudiant	Géologie
Julie Lavoie	Étudiante	Géologie
Léo Poignant-Molina	Étudiant	Géologie

1.4 Livrables émis dans le cadre du projet PACES-CHCN

Les résultats du projet PACES-CHCN sont remis au MDDELCC et aux partenaires régionaux et prennent la forme de quatre livrables :

- une base de données spatiales;
- des cartes thématiques en format A0;
- un atlas des eaux souterraines du territoire de Charlevoix et de la Haute-Côte-Nord;
- un rapport scientifique qui constitue le présent document.

La base de données numériques à référence spatiale contient des informations sur près de 30 000 données ponctuelles qui correspondent à des données existantes provenant majoritairement de rapports hydrogéologiques appartenant aux municipalités présentes sur le territoire, ou à des données acquises dans le cadre du projet

PACES-CHCN. L'élaboration de cette base de données nécessite une méthodologie rigoureuse de numérisation et d'archivage des données présentée au chapitre 2 du présent rapport.

Les 29 cartes numériques en format A0 (annexe numérique AN1) sont énumérées dans le tableau 1-4 et représentent différents aspects ayant trait aux eaux souterraines parmi lesquels :

- la géographie du territoire à l'étude (cartes 1 à 10, 23 et 27);
- la géologie (cartes 11 à 16) et les coupes stratigraphiques régionales;
- l'hydrogéologie (cartes 17 à 22, 24 à 26, et 28) qui constitue le cœur du projet PACES-CHCN.

Ces cartes sont également disponibles en format réduit à l'annexe 1 du rapport.

Tableau 1-4 : Liste des cartes produites dans le cadre du projet PACES-CHCN

# de la carte	Nom de la carte	Aspect
1	Topographie	Géographique
2	Routes, limites municipales et toponymie	Géographique
3	Modèle numérique de terrain	Géographique
4	Pente du sol	Géographique
5	Hydrographie	Géographique
6	Bassins versants	Géographique
7	Occupation du sol	Géographique
8	Couverture végétale	Géographique
9	Milieus humides	Géographique
10	Affectation du territoire	Géographique
11	Pédologie	Géologique
12	Géologie du Quaternaire	Géologique
13	Géologie du roc	Géologique
14	Localisation des coupes stratigraphiques	Géologique
15	a) Épaisseur des dépôts meubles b) Erreur type de l'épaisseur des dépôts meubles	Géologique
16	a) Topographie du roc b) Topographie du roc TIN	Géologique
17	Contextes hydrogéologiques	Hydrogéologique
18	a) Limites des unités hydrogéologiques perméables et imperméables b) Limites des unités hydrogéologiques semi-perméables	Hydrogéologique
19	Piézométrie régionale	Hydrogéologique
21	Paramètres hydrogéologiques ¹	Hydrogéologique
22	Vulnérabilité de l'aquifère situé le plus près de la surface	Hydrogéologique
23	Activités potentiellement polluantes pour l'eau souterraine	Géographique
24	Qualité de l'eau en fonction des concentrations maximales acceptables (CMA)	Hydrogéologique

¹ Sous forme de tableaux présentés au chapitre 6

# de la carte	Nom de la carte	Aspect
25	Qualité de l'eau en fonction des objectifs esthétiques	Hydrogéologique
26	Utilisation de l'eau	Hydrogéologique
27	Stations météorologiques, hydrométriques et de suivi de la nappe	Géographique
28	Zones de recharge préférentielles et de résurgence	Hydrogéologique

L'atlas hydrogéologique du territoire de Charlevoix, de Charlevoix-Est et de La Haute-Côte-Nord a pour objectif de rendre les résultats du projet PACES-CHCN accessibles à un plus large public. Pour ce faire des notions de base d'hydrogéologie y sont intégrées. Ce document présente les principaux résultats du projet PACES-CHCN.

Le rapport scientifique présentant l'ensemble des résultats du projet PACES-CHCN constitue le présent document et se divise en huit chapitres thématiques. En plus de l'introduction :

- Le chapitre 2 présente l'ensemble des données acquises et compilées dans la base de données spatiales.
- Le chapitre 3 décrit le territoire à l'étude, autant pour les aspects physiques qu'humains.
- Le chapitre 4 présente les caractéristiques géologiques du roc et des dépôts d'origine quaternaire, la stratigraphie des dépôts meubles à une échelle régionale caractérisée par les coupes stratigraphiques et l'épaisseur des dépôts.
- Le chapitre 5 présente le bilan hydrologique régional.
- Le chapitre 6 dresse l'état des connaissances hydrogéologiques du territoire de CHCN en présentant une cartographie des unités hydrogéologiques régionales, les contextes hydrogéologiques, les propriétés hydrauliques, la caractérisation hydrogéochimique, la piézométrie et les principales directions d'écoulement de l'eau souterraine, et les zones préférentielles de recharge et de résurgence.
- Le chapitre 7 établit l'état de la ressource en eau souterraine en présentant les principales sources d'alimentation en eau potable des municipalités, les contextes hydrogéologiques qui sont exploités, une évaluation des quantités d'eau de surface et souterraine consommées annuellement, la vulnérabilité de l'eau souterraine d'après la méthode DRASTIC et la protection de cette ressource.
- Le chapitre 8 émet les conclusions, les limites d'utilisation des livrables du projet PACES-CHCN, les recommandations pour améliorer les connaissances hydrogéologiques et pour une meilleure gestion régionale de la ressource en eau souterraine.

2 ACQUISITION, ARCHIVAGE ET CENTRALISATION DES DONNÉES

Afin de caractériser les milieux aquifères et l'eau souterraine sur le territoire de CHCN, une multitude de données sont requises fournissant de l'information notamment sur le territoire, le contexte géologique, la ressource en eau souterraine et les besoins pour l'alimentation en eau potable. La **première étape** du processus d'acquisition et de centralisation des données consiste donc à rassembler toutes les données disponibles, celles existantes (phase 1) et celles nouvellement acquises (phase 2), sur un même serveur de données. La **deuxième étape** consiste à uniformiser les données pour ce qui est de leur format et de leur structure, pour ainsi pouvoir les traiter adéquatement dans un système d'information géographique (SIG). La **troisième étape** ne concerne que les données liées au milieu géologique et hydrogéologique et consiste à centraliser ces données dans une base de données spatiales.

Ces trois étapes sont illustrées sur la figure 2-1 en (a), (b) et (c) respectivement et font l'objet du présent chapitre. La section 2.1 présente la collecte des données déjà existantes, alors que l'acquisition de nouvelles données par l'équipe du projet PACES-CHCN se retrouve à la section 2.2 (figure 2-1a). La section 2.3 décrit le processus de saisi, d'archivage et d'uniformisation des données (figure 2-1b). Enfin, la section 2.4 explique le processus de centralisation des données dans une base de données spatiales (figure 2-1c).

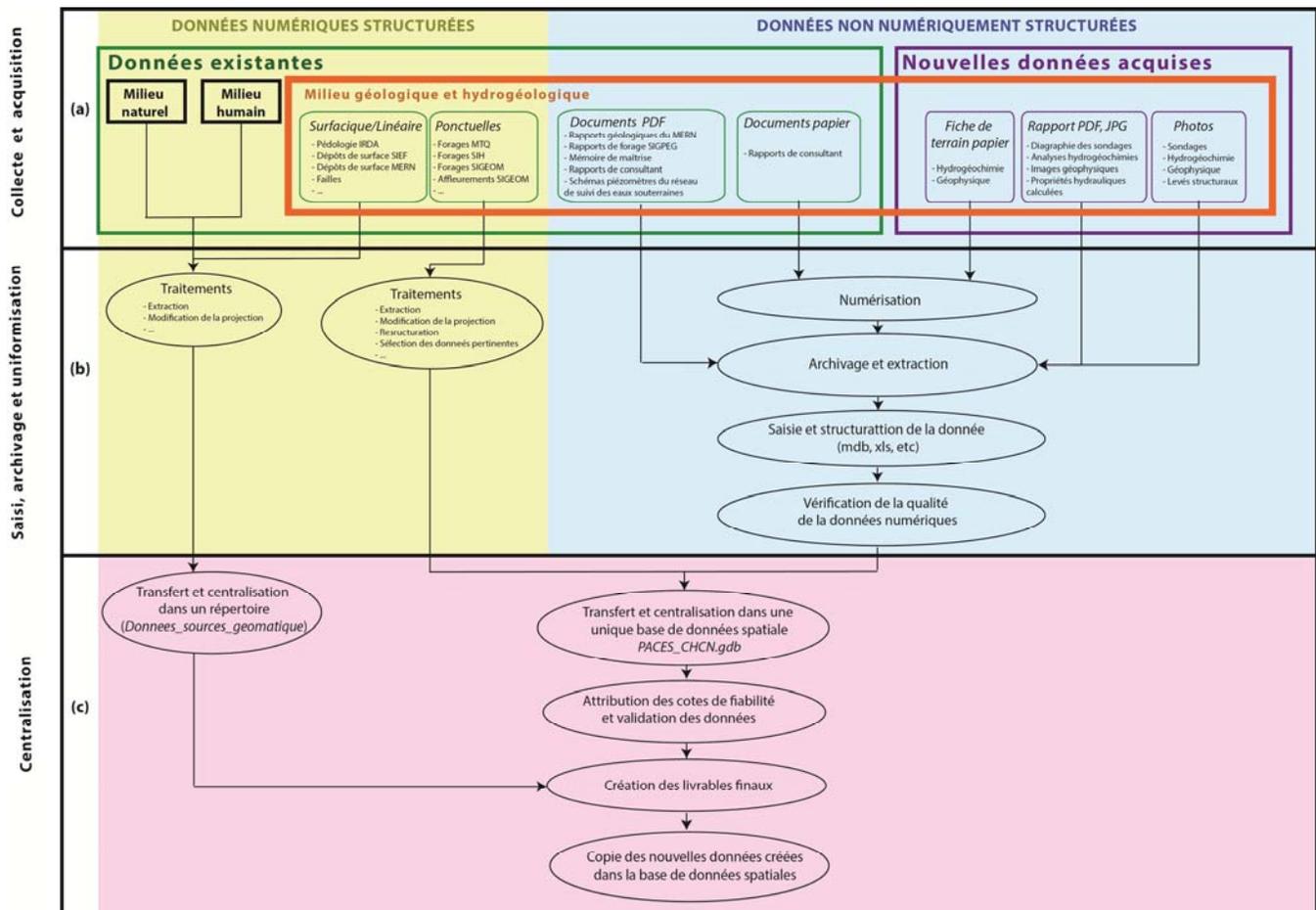


Figure 2-1 : Processus d'acquisition et de centralisation des données.

2.1 Collecte des données existantes

La première étape d'un projet de caractérisation hydrogéologique régionale est d'acquérir les données déjà existantes au sein des ministères, des organismes paragouvernementaux, des municipalités et des entreprises privées (Phase 1 du PACES). Ces données peuvent exister sous forme de données **numériques structurées** comme dans un *shapefile*, un chiffrier *Excel* ou une base de données *Access*, mais elles peuvent aussi exister sous forme **non structurées**, c'est-à-dire se retrouver à l'intérieur d'un rapport PDF ou papier.

La section 2.1.1 présente l'acquisition des données **numériques structurées** existantes alors que la section 2.1.2 porte sur l'acquisition des données **non numériquement structurées**.

2.1.1 Données numériques structurées

Les données numériques structurées sont dans certains cas déjà dans un format de données spatiales (*shapefile*, *file geodatabase*, *geoTIFF*, etc.), tandis que d'autres (*Excel*, *fichier texte*, *Access*, etc.) nécessitent d'être spatialisées. Ces données sont généralement publiques et certaines peuvent être téléchargées directement en ligne sur Internet, par exemple la base de données nationale des stations hydrométriques (HYDAT).

L'ensemble des données numériques structurées disponibles sur le territoire municipalisé et étudié par le projet PACES-CHCN se classent en trois (3) grands thèmes : milieu naturel, milieu humain, et contextes géologiques et hydrogéologiques. Les données numériques structurées recueillies et liées à ces trois thèmes sont présentées dans les prochains paragraphes.

2.1.1.1 Données se rapportant au milieu naturel

Les données disponibles utilisées pour caractériser le milieu naturel correspondent à des données sur la topographie (lignes) et l'élévation (pixels), l'hydrographie (points, lignes, polygones), les limites des bassins et sous-bassins versants (polygones), les milieux humides et les données climatiques tels les apports verticaux. Le tableau 2-1 présente l'ensemble de ces données récupérées.

La plupart de ces données proviennent des ministères fédéraux (Environnement Canada - EC et Ressources naturelles Canada - RNCAN) et provinciaux (MDDELCC, MERN), et d'autres organismes gouvernementaux (Centre d'expertise hydrique du Québec - CEHQ, et la Commission géologique du Canada - CGC).

Tableau 2-1 : Données numériquement structurées disponibles se rapportant au milieu naturel.

<i>Jeu de données</i>	<i>Mode de représentation</i>	<i>Primitive géométrique</i>	<i>Base de données / Organisme</i>	<i>Propriétaire</i>
Apports verticaux	.MET et .AV	Point	CEHQ	MDDELCC
Bassins versants	Vectorel	Polygone	CEHQ	MDDELCC
Courbes de niveau	Vectorel	Ligne	BDTQ / BNDT	MERN / RNCAN
CRHQ ¹	Vectorel	Ligne		MDDELCC
Milieux humides potentiels	Vectorel	Polygone		MDDELCC
Modèle numérique d'altitude	Matriciel	Pixel	MNA	MERN
Réseau hydrographique	Vectorel	Ligne, Polygone	BDTQ / BDAT	MERN
Stations hydrométriques	Vectorel / .DAT	Point	CEHQ / HYDAT	MDDELCC / EC
Stations météorologiques	.XLS	Point	DSEE / RMCQ	MDDELCC / EC
Stations - Qualité Eau de surface	.XLS	Point	BQMA	MDDELCC

¹ Cadre de référence hydrographique du Québec.

2.1.1.2 Données se rapportant au milieu humain

Les données disponibles utilisées pour caractériser le milieu humain correspondent à des données sur l'affectation du territoire (polygones), l'exploitation des carrières et sablières (points, polygones), les limites municipales (polygones), les orthophotographies, l'occupation du sol (pixels), le réseau routier (lignes), les réseaux d'aqueduc (lignes), les préleveurs d'eau souterraine (point), les données agricoles (points et polygones), les terrains contaminés et les sites d'enfouissement. Le tableau 2-2 présente l'ensemble de ces données récupérées.

Tableau 2-2 : Données numériques structurées disponibles se rapportant au milieu humain.

<i>Jeu de données</i>	<i>Mode de représentation</i>	<i>Primitive géométrique</i>	<i>Base de données / Organisme</i>	<i>Propriétaire</i>
Affectation du territoire	Vectorel	Polygone	MRCs / PPAT	MRCs / MAMROT
Bancs emprunt (gravières et sablières)	Vectorel	Polygone	BDTQ	MERN
BDCA ¹ -BDCG ²	Vectorel	Polygone	FADQ	FADQ
Carrières	Vectorel	Polygone	BDTQ	MERN
Couverture du sol	Matriciel	Pixel	Geobase	COCG
Codes d'utilisation des biens-fonds (CUBF)	Vectorel	Polygone	MRCs	MRCs
Grands préleveurs d'eau	.XLS	Point	-	MDDELCC
Limites municipales	Vectorel	Polygone	SDA	MERN
Limites MRC	Vectorel	Polygone	SDA	MERN
Orthophotographies	Matriciel	Pixel	-	MERN / MRC
Régions administratives	Vectorel	Polygone	SDA	MERN
Réseaux linéaire d'aqueduc municipaux	Vectorel	Ligne	MRCs	MRCs
Réseau routier	Vectorel	Ligne	BDTQ / BDAT	MERN
Sites enfouissement, anciens sites, dépotoirs	Vectorel	Point	MRCs	MRCs
Sites extraction (gravier, sable, terre, etc.)	Vectorel	Point	-	MRC
Index des cartes du SNRC ³	Vectorel	Polygone	RNCAN	RNCAN
Terrains contaminés	Vectorel	Point		MRCs / MDDELCC
Terres publiques intramunicipales (TPI)	Vectorel	Polygone	MRCs	MRCs
Types d'élevage	Vectorel	Point	MAPAQ	MAPAQ

¹ Base de données des cultures assurées

² Base de données des cultures généralisées

³ Système national de référence cartographiques

2.1.1.3 Données se rapportant aux contextes géologique et hydrogéologique

Les données géologiques se rapportent à toutes les informations qui caractérisent les milieux aquifères, c'est-à-dire les dépôts meubles et le socle rocheux, tandis que les données hydrogéologiques correspondent à l'ensemble des informations spécialisées qui caractérisent l'eau souterraine en termes de quantité et de qualité.

Les données numériques structurées disponibles se représentent sous forme de polygones pour les cartes de la géologie du socle rocheux, de la géologie des dépôts de surface et de la pédologie; sous forme de lignes pour les failles, les linéaments; sous forme de données ponctuelles correspondant à des puits (MDDELCC), à des rapports de forage (MERN, MTQ, PACES-SLSJ) ou à des affleurements.

La nature de l'information est variée et les thématiques suivantes sont les plus pertinentes :

- **Données sur la fracturation du massif rocheux** : mesures *in situ* des discontinuités dans le roc (orientation, fréquence et ouverture des fractures).
- **Données stratigraphiques** : nature et ordre d'empilement des dépôts de surface; cette information peut être ponctuelle (forage), le long d'une ligne (coupe stratigraphique) ou en bloc 3D (modèles conceptuels).
- **Données hydrogéo-chimiques** : caractéristiques chimiques quantitatives de l'eau obtenues par analyse en laboratoire de l'eau souterraine extraite d'un forage.
- **Données piézométriques** : niveaux des nappes d'eau souterraine.

Le tableau 2-3 présente l'ensemble de ces données récupérées.

Tableau 2-3 : Données numériques disponibles se rapportant aux contextes géologique et hydrogéologique.

<i>Jeu de données</i>	<i>Mode de représentation</i>	<i>Primitive géométrique</i>	<i>Base de données / Organisme</i>	<i>Propriétaire</i>
Affleurements	Vectorel	Point	SIGEOM ²	MERN
Base de données des stations du projet Quaternaire	Vectorel	Point	SIGEOM ²	MERN
Cartes dépôts de surface + symbole	Vectorel	Point, Ligne, Polygone	SIGEOM ²	MERN
Cartes dépôts de surface (SIEF ¹)	Vectorel	Polygone	SIEF ¹	MERN
Débits de base	.txt	Point	CEHQ	MDDELCC
Failles / Linéaments	Vectorel	Ligne	SIGEOM ²	MERN
Forages MTQ	.XLS	Point	SOMMAIRE, BDG et FORLOG	MTQ
Forages SIGEOM ²	Vectorel	Point	SIGEOM ²	MERN
Localisation et type de captages municipaux	.XLS	Polygone	MDDELCC	MDDELCC
Pédologie	Vectorel	Polygone	Banque pédologique	IRDA
Puits domestiques SIH ³	.MDB	Point	SIH ³	MDDELCC
Stries, marques d'érosion	Vectorel	Point	SIGEOM ²	MERN
Zones géologiques	Vectorel	Polygone	SIGEOM ²	MERN
Stations PACES-SLSJ	Vectorel	Point	PACES/CERM	MDDELCC

¹Système d'information écoforestière.

²Système d'information géominière.

³ Système d'information hydrogéologique.

Les données géologiques et hydrogéologiques constituent des données essentielles au PACES. Cependant, certaines de ces données sont présentes seulement dans des rapports (PDF ou papier) et n'existent pas encore sous forme de données numériques structurées (chiffrier *Excel*, base de données *Access*, etc.) puisqu'elles n'ont jamais été extraites et saisies numériquement. La section 2.1.2 présente le processus d'acquisition des données géologiques et hydrogéologiques non numériquement structurées.

2.1.2 Données non numériquement structurées

Les données non numériquement structurées d'intérêt pour un projet PACES sont disponibles habituellement dans des rapports appartenant aux ministères ou aux municipalités du territoire de CHCN. La démarche

d'acquisition des documents PDF ou papier ainsi que la nature des données qu'ils contiennent sont présentés en détail dans les prochains paragraphes pour chacun des fournisseurs.

2.1.2.1 Rapports PDF des ministères

Les ministères possèdent plusieurs données sur la géologie ou l'hydrogéologie déjà numériquement structurées (section 2.1.1.3, mais certaines d'entre elles n'ont pas encore été extraites des rapports PDF (ex : rapport de cartographie géologique) et nécessitent d'être saisies et structurées dans un chiffrier électronique ou dans une base de données.

Les rapports de cartographie géologique PDF du MERN sont disponibles sur le SIGEOM et téléchargeables gratuitement. Au total, **35** rapports de cartographie géologique contenant la localisation de plusieurs affleurements sur le territoire de CHCN ont été récupérés par le CERM sur le SIGEOM.

Le système d'information géoscientifique pétrolier et gazier (SIGPEG) contient des rapports de forages qui peuvent être récupérés directement sur leur site internet moyennant certains coûts. Ces rapports bonifient l'information géologique sur le territoire de CHCN, mais leur information la plus pertinente est liée à la stratigraphie. Au total, **4** rapports de forage ont été acquis par le CERM à partir du SIGPEG.

Le réseau de suivi des eaux souterraines du Québec créé par MDDELCC compte 240 stations piézométriques sur le territoire de la province dont 3 se situent sur le territoire de CHCN. L'information stratigraphique des stations se retrouve dans un document PDF qui peut être téléchargé gratuitement sur le site internet du ministère. Au total, **3** schémas PDF ont été récupérés.

Les documents récupérés auprès de différents ministères sont présentés dans le tableau 2-4.

Tableau 2-4 : Données non numériquement structurées disponibles se rapportant aux contextes géologique et hydrogéologique.

<i>Type de document</i>	<i>Type de support</i>	<i>Base de données / Organisme</i>	<i>Propriétaire</i>	<i>Nombre de rapports</i>
Rapport de cartographie géologique	PDF	SIGEOM	MERN	35
Rapport de forage	PDF	SIGPEG	MERN	4
Schémas des piézomètres	PDF	Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec	MDDELCC	3

2.1.2.2 Rapports PDF ou papier des municipalités

Les municipalités de CHCN détiennent la majorité des données géologiques et hydrogéologiques non numériquement structurées. Elles se trouvent dans des rapports d'experts en hydrogéologie, en géotechnique et en environnement. Ces études ont été réalisées par des firmes privées et sont disponibles parfois sous support numérique (.pdf, word) mais souvent seulement sous format papier. L'obtention de ces rapports a représenté un des principaux défis de la phase 1 du projet PACES-CHCN.

L'obtention des documents (études, rapports, etc.) propres à chaque municipalité a été réalisée grâce à la collaboration de personnes ressources au sein de chaque municipalité, MRC et directions du MDDELCC. De façon générale, ces personnes ressources occupent des fonctions de directeur général ou d'inspecteur municipal, d'urbaniste ou d'aménagiste de MRC, ou de technicien en administration répondant aux demandes formulées dans le cadre de la loi sur l'accès aux documents des organismes publics. La majorité de ces personnes ont été rencontrées au cours des mois de juin, juillet et août 2012.

Lors de ces rencontres, trois formulaires (annexe numérique AN2a) ont systématiquement complétés :

- Visite de municipalité qui sert de rapport journalier ;
- Info Alimentation en eau potable (AEP) qui donne de l'information sur les besoins en eau potable de la municipalité ;
- Info Puits municipaux et PZ municipaux qui indique la localisation des ouvrages.

En plus de l'obtention des données inscrites sur ces formulaires, cette rencontre permettait d'officialiser l'entente sur l'accès, l'utilisation et la diffusion des données par la signature par les deux parties d'une entente sur ce point (annexe numérique AN2b). Pour plusieurs municipalités l'entente a été signée et une résolution a été émise par le conseil municipal. Chaque entente et chaque résolution reçue ont été numérisées à l'aide d'un balayeur optique et archivées dans un répertoire numérique. Cette rencontre permettait également à l'équipe du projet de visiter les installations de captage d'eau de la municipalité.

Finalement, la récupération des rapports a été réalisée dans certains cas lors de cette première rencontre ou lors de rencontres ultérieures. Pour l'obtention de rapports d'expertise, certaines municipalités ont référé l'équipe du projet auprès de firmes d'hydrogéologie ayant réalisé des mandats.

Le tableau 2-5 présente le mode d'entente pris avec les municipalités ainsi que le nombre de rapports obtenus pour chacune.

Au total, **205** rapports ont été récupérés dans les municipalités de CHCN. Les rapports en hydrogéologie et en géologie appartiennent à l'une ou l'autre de ces deux catégories :

- les études hydrogéologiques (caractérisation hydrogéologique, recherche en eau, détermination des périmètres de protection des aires de captage, calcul d'aire d'alimentation, etc.) réalisées en majorité par des consultants pour des municipalités;
- les études géotechniques et environnementales réalisées généralement par des laboratoires de génie conseil.

Tableau 2-5 : Autorisation d'accès, d'utilisation et de diffusion, et nombre de rapports récupérés par municipalité.

	<i>Municipalités</i>	<i>Résolution</i>	<i>Entente</i>	<i>Commentaires</i>	<i>Nombre rapports</i>
Charlevoix	Baie-Saint-Paul	Oui	Oui	Résolution autorise utilisation et diffusion	11
	Les Éboulements	Oui	Oui	Résolution + Entente	4
	L'Isle-aux-Coudres	Oui	Oui	Résolution + Entente	15
	Petite-Rivière-Saint-François	Oui	Non	Résolution autorise utilisation et diffusion	10
	Saint-Hilarion	Oui	Oui	Résolution + Entente	6
	Saint-Urbain	Non	Oui	Entente	0
Charlevoix-Est	Baie-Sainte-Catherine	Oui	Non	Résolution autorise utilisation et diffusion	3
	Clermont	Oui	Non	Résolution autorise utilisation et diffusion (à faire signer)	33
	La Malbaie	Oui	Oui	Résolution autorise utilisation et diffusion	18
	Notre-Dame-des-Monts	Oui	Oui	Résolution autorise utilisation et diffusion	8
	Saint-Aimée-des-Lacs	Oui	Non	Résolution autorise utilisation et diffusion	7
	Saint-Irénée	Non	Oui	Entente	15
	Saint-Siméon	Oui	Non	Résolution autorise utilisation et diffusion	3

	<i>Municipalités</i>	<i>Résolution</i>	<i>Entente</i>	<i>Commentaires</i>	<i>Nombre rapports</i>
La Haute-Côte-Nord	Colombier	Oui	Oui	Résolution autorise utilisation et diffusion	8
	Forestville	Oui	Non	Résolution autorise utilisation et diffusion	1
	Les Bergeronnes	Oui	Oui	Résolution + Entente	8
	Les Escoumins	Oui	Non	Résolution autorise utilisation et diffusion	24
	Longue-Rive	Oui	Oui	Résolution + Entente	10
	Portneuf-sur-Mer	Oui	Oui	Résolution + Entente	5
	Sacré-Cœur	Non	Oui	Entente	6
	Tadoussac	Oui	Non	Résolution autorise utilisation et diffusion	5
	Essipit	Oui	Oui	Résolution autorise utilisation et diffusion	5
TOTAL					205

Études hydrogéologiques

Les rapports hydrogéologiques peuvent se trouver directement dans les municipalités ou être archivés à la direction des politiques de l'eau du MDDELCC (demande d'autorisation pour le captage d'eau souterraine) ou dans les directions régionales du MDDELCC de la Capitale-Nationale et de la Côte-Nord (demande d'autorisation pour l'enfouissement de déchets, etc.). Ces derniers ont été récupérés à l'automne 2012 et au printemps 2013.

La majorité des municipalités du territoire visé s'alimente en eau potable à partir d'eau souterraine. Pour ce faire, les municipalités possèdent des études hydrogéologiques et les données qui s'y trouvent sont significatives. En effet, ces études renferment des informations indispensables à la compréhension des systèmes aquifères actuellement en exploitation sur le territoire CHCN, car elles ont été effectuées par des experts en hydrogéologie.

Études géotechniques et environnementales

Les études géotechniques sont réalisées principalement avant la construction ou l'implantation d'infrastructures (réseau d'aqueduc, bâtiment, etc.) ou pour caractériser les sols et les massifs rocheux susceptibles de mouvement (coulée d'argile, éboulements, etc.). Ces études donnent principalement de l'information sur la stratigraphie du sol et ses propriétés. Les études environnementales permettent principalement d'obtenir des données stratigraphiques sur les sols.

2.2 Acquisition de données complémentaires

Les travaux de caractérisation hydrogéologique ont été réalisés lors de la phase 2 du projet PACES-CHCN. Ils prennent la forme de travaux de terrain échelonnés sur deux ans (2013 et 2014). Ces travaux ont déjà fait l'objet d'un rapport d'étape déposé au MDDEFP au mois de mars 2014¹. Cette section reprend les principaux éléments de ce dernier rapport que sont : les levés géophysiques (section 2.2.1), les sondages par rotopercussion et au piézocône (section 2.2.2), les essais de pompage et levés piézométriques (section 2.2.3), l'échantillonnage et les analyses hydrogéochimiques (section 2.2.4), et la caractérisation de la fracturation (section 2.2.5).

2.2.1 Levés géophysiques

Les méthodes géophysiques ont été mises en avant plan dans le cadre de ce projet. Contrairement aux forages qui sont coûteux et qui donnent une information robuste mais localisée, les méthodes géophysiques permettent de couvrir une superficie beaucoup plus grande du territoire.

¹ Rapport de phase 2 – Présentation des travaux de terrain et des résultats préliminaires, PACES-CHCN remis au MDDEFP en mars 2014.

Les méthodes géophysiques utilisées dans le cadre du projet PACES-CHCN sont l'induction électromagnétique de transition, la tomographie de résistivité électrique, ainsi que la sismique réfraction. La suite de cette partie du texte présente brièvement les différentes méthodes géophysiques qui ont été utilisées, puis le sommaire des levés réalisés à l'aide de chacune des méthodes. Chaque site investigué a nécessité la signature d'entente avec les propriétaires, dont un modèle est disponible à l'annexe numérique AN2c.

2.2.1.1 Objectifs

Dans le cadre du projet PACES-CHCN, le principal objectif poursuivi par la réalisation de levés géophysiques consiste à augmenter les connaissances stratigraphiques dans les zones de lacune d'information sur cet aspect.

Un autre objectif plus étroitement lié au développement de cette technologie consiste à améliorer les méthodes d'acquisition et d'interprétation de ces levés de sorte que celles-ci permettent d'estimer avec une meilleure exactitude des paramètres d'intérêt géologique et hydrogéologique (Simard et al., 2015).

2.2.1.2 Description des méthodes

Induction électromagnétique de transition

L'induction électromagnétique de transition (*Time-Domain Electromagnetism* ou *TDEM*) évalue de manière indirecte la résistance électrique de la sous-surface. La méthode consiste à soumettre le sous-sol à un champ magnétique primaire à l'aide d'un courant électrique à l'intérieur d'une boucle émettrice, ce qui produit une force électromotrice dans le milieu souterrain. La relaxation du champ magnétique primaire provoque une décroissance de la force électromotrice souterraine ce qui engendre un champ magnétique secondaire qui lui peut être mesuré à la surface par le courant induit à l'intérieur d'une boucle réceptrice. Différentes configurations de levé sont possibles; celle utilisée dans le cadre du projet PACES-CHCN est coplanaire; c'est-à-dire que les boucles émettrices et réceptrices sont concentriques et planes à la surface du sol (Fitterman et Labson, 2005).

La profondeur d'investigation est déterminée par la grandeur de la boucle, l'intensité du courant initial et la résistivité du matériel présent en sous-surface. Le CERM est dotée d'un appareil NanoTEM NT32 de Zonge Engineering Inc. tel que montré sur la figure 2-2. Les sondages s'effectuent sur une profondeur pouvant atteindre 100 mètres.

Le traitement de la mesure obtenue par induction électromagnétique de transition s'exécute avec les outils logiciels fournis par le manufacturier Zonge. La mesure géophysique est inversée en utilisant un modèle de lissage d'Occam (Constable et al., 1987). Le processus d'inversion itératif s'arrête lorsqu'un écart entre les valeurs du modèle de deux itérations consécutives est inférieur à 8 %.

L'unité NT32 fonctionne à l'aide d'une boucle émettrice de 20 mètres par 20 mètres, et une boucle réceptrice de 5 mètres par 5 mètres. Les levés correspondent à des stations ponctuelles d'acquisition d'information qui sont, après traitement, converties en sections 2D dont la longueur est fonction du nombre de stations de mesure et de leur espacement.



Figure 2-2 : L'appareil NanoTEM NT32 est petit et léger, ce qui permet de l'utiliser dans des contextes forestiers.

Tomographie de résistivité électrique

Le résistivimètre tel que montré sur la figure 2-3 mesure la résistance électrique de la sous-surface. La méthode consiste à faire circuler un courant électrique entre deux électrodes et à mesurer la différence de potentiel engendrée en différents points au sol en utilisant une seconde paire d'électrodes. Plusieurs configurations de levé sont possibles (Zonge et al., 2005); celle utilisée pour le projet PACES-CHCN est la configuration dipôle-dipôle. Dans cette configuration, les électrodes d'injection « i » et de mesure « v » couvrent chacune une distance « a » et sont séparées d'un facteur « n » fois la distance « a ». La résistivité apparente ρ_a est ensuite calculée.

La profondeur d'investigation est essentiellement déterminée par la distance entre les électrodes, mais dépend aussi de l'intensité du courant injecté et ultimement de la résistance efficace du milieu sondé. Pour un milieu relativement résistif (entre 500 et 1000 Ohm.m) et pour un voltage d'environ 600 volts, le courant induit est généralement suffisamment intense pour sonder une profondeur d'environ 45 mètres avec l'appareillage disponible au CERM (48 électrodes permutables totalisant 944 quadripôles). La résolution latérale pour cette configuration est d'environ « $a/2$ », soit de 50 à 250 cm.

Le traitement des données du résistivimètre s'exécute directement avec l'outil logiciel Res2DINV fourni par le manufacturier IRIS Instruments. La mesure géophysique est inversée en utilisant le modèle numérique des moindres carrés (Zonge et al., 2005). Le processus d'inversion itératif s'arrête lorsqu'un écart entre les valeurs du modèle de deux itérations consécutives est inférieur à 5%.



Figure 2-3 : Le résistivimètre avec 48 électrodes peut sonder les sols jusqu'à environ 45 m de profondeur.

Sismique réfraction

La sismique réfraction aide à la détermination de la profondeur du toit du roc. La méthode consiste à propager une onde sismique à travers le sol et à mesurer le temps que prend l'onde pour revenir en différents endroits sur le sol, à l'aide de géophones (Pelton, 2005).

Brièvement, la première onde à arriver aux géophones permet de déterminer le temps « t » de parcours de l'onde et l'interpolation entre les géophones des premières arrivées permet d'obtenir la vitesse « v_1 » de propagation de l'onde dans le premier milieu. En présence d'un second milieu, une deuxième pente est visible, passée une certaine distance de la source. La deuxième pente des premières arrivées aux géophones fournit la vitesse de propagation « v_2 » du deuxième milieu. La projection de cette pente sur l'axe du temps « t_i » permet d'évaluer la profondeur « h_1 » du premier réfracteur rencontré par l'onde.

La profondeur d'investigation est essentiellement déterminée par la distance entre les géophones, mais dépend aussi de l'intensité ainsi que la distance de la source explosive. Le CERM étant doté d'un appareil ABEM Terraloc Mark 6 (jusqu'à 24 géophones séparés d'une distance maximale de 12,50 m), il est possible de mesurer la profondeur au roc lorsque celle-ci se situe entre 10 et 100 m.

Le traitement de la donnée s'exécute avec le logiciel IXRefraX du manufacturier Interprex. Le temps de la première arrivée d'onde pour chaque géophone est sélectionné à la main. La mesure géophysique est ensuite convertie en vitesse dans le premier et le second milieu. Finalement, la profondeur du premier réflecteur (second milieu) est obtenue en utilisant la méthode réciproque généralisée (Pelton, 2005).

2.2.1.3 Localisation des levés géophysiques

Le tableau 2-6 présente le sommaire des levés géophysiques réalisés dans le cadre du projet PACES-CHCN. Pour chacune des méthodes, la municipalité du secteur investigué, le nombre de levés, la longueur et le nom du levé sont indiqués. Au total 28 lignes géophysiques ont été réalisées, dont :

- 24 lignes NanoTEM et 174 levés ponctuels;
- 3 lignes de résistivité électrique;
- 1 ligne de sismique réfraction.

L'ensemble des levés géophysiques effectués a fait l'objet de deux rapports d'intervention réalisés par M. Patrick Tr. Simard disponible à l'annexe numérique AN3 (a) Rapport préliminaire, 2013; et b) Rapport final, 2015). L'interprétation et les sections géoélectriques sont présentées à l'AN3b et sont localisées à la figure 2-4.

Tableau 2-6 : Compilation des levés géophysiques réalisés par NanoTEM, résistivité électrique et sismique réfraction en 2013 et 2014.

<i>Levés NanoTEM</i>				
<i>Municipalité</i>	<i>Abréviation</i>	<i>Nom des lignes</i>	<i>Nbr. de levés/ligne</i>	<i>Distance totale couverte (m)</i>
Colombier	COLNT	L1	8	5 098
		L2	3	2 534
		L1	4	748
		L2	6	1 181
Forestville	FORNT	L3	7	1 149
		L4	7	1 647
		L5	5	1 028
Portneuf-sur-Mer	PSM	-	16	-
Longue-Rive	LON	-	5	-
		L1	2	430
Les Escoumins	LESNT	L2	5	356
		L4	4	486
		L5	5	1 028
Les Bergeronnes	BER	-	3	-
Sacré-Cœur	SACNT	L1	4	786
		-	13	-
Saint-Siméon	STSNT	L1	3	231
		L2	2	468
		L3	14	3 418
La Malbaie	LAMNT	L1	7	3 214
		L1	5	912
	KAN	L2	4	296

		L3	4	183
Isle-aux-Coudres	IACNT	L1	14	1 673
		L1	9	2 913
Saint-Urbain	STUNT	L2	7	2 901
		L3	8	2 878
		L4	4	854
TOTAL		24 lignes	174	34 914

Levés de résistivité électrique

<i>Municipalité</i>	<i>Abréviation</i>	<i>Nombre de ligne</i>	<i>Distance totale couverte (m)</i>
Isle-Aux-Coudres	IACRE	1	235
Saint-Siméon	STSRE	2	470
TOTAL		3	705

Levés de sismique réfraction

<i>Municipalité</i>	<i>Abréviation</i>	<i>Nombre de ligne</i>	<i>Distance totale couverte (m)</i>
Saint-Urbain	STUSR	1	46

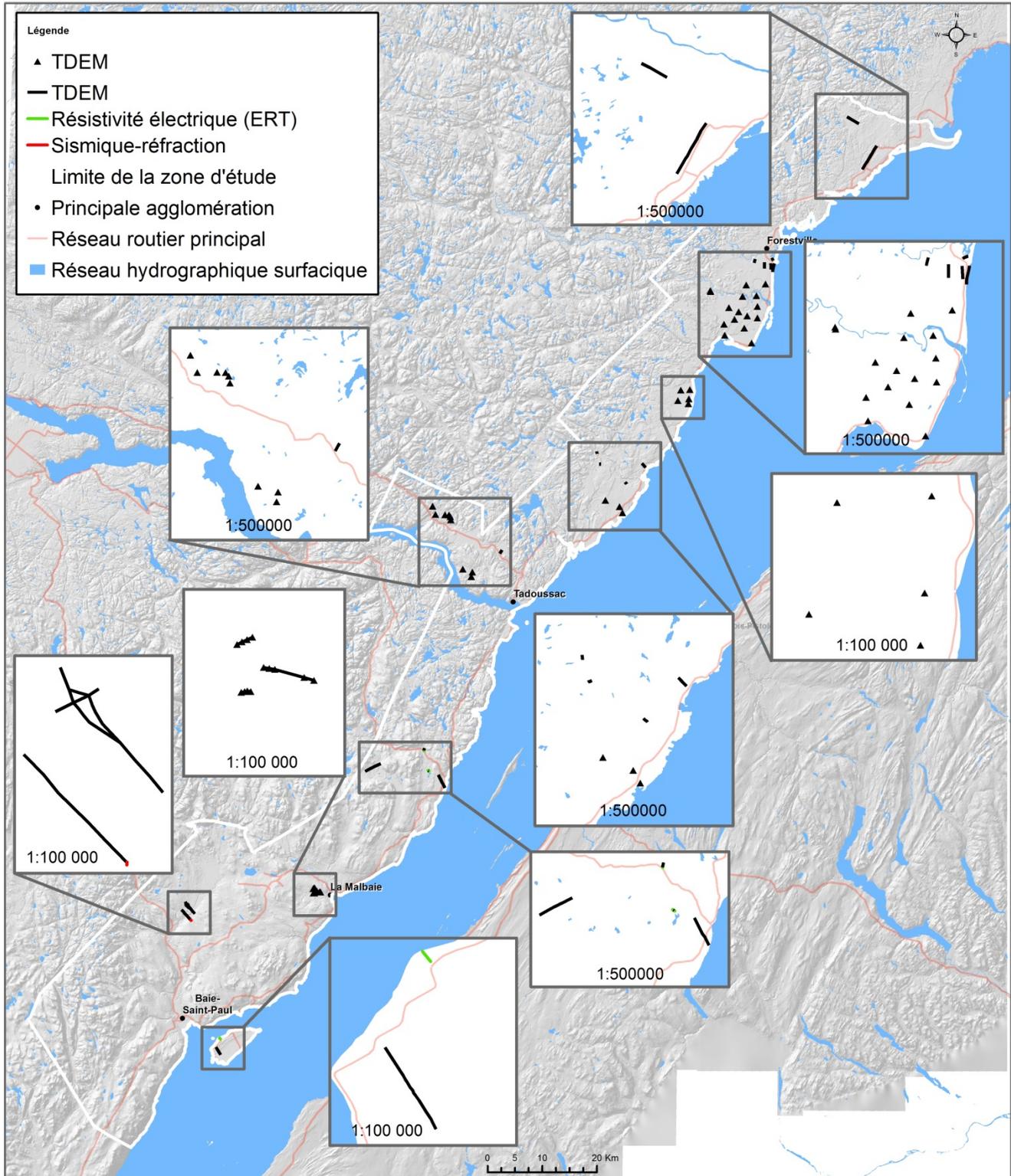


Figure 2-4 : Localisation des levés géophysiques.
Les levés TDEM réalisés au cours de l'été 2013 sont représentés sous forme de ligne
tandis que ceux réalisés au cours de l'été 2014 sont représentés en points.

2.2.2 Sondages par rotopercussion et au piézocône, et installations piézométriques

La campagne de sondage s'est déroulée du 19 au 22 août 2013 en partenariat avec l'INRS-ETE qui a mis sa foreuse (Geotech 605D, figure 2-5) à la disposition du CERM-UQAC. L'ensemble des résultats de sondages interprétés par l'INRS-ETE sont présentés à l'annexe numérique AN4. Ils présentent la variation avec la profondeur des paramètres mesurés et leur interprétation stratigraphique. Chaque site investigué a nécessité la signature d'entente avec les propriétaires, dont un modèle est disponible à l'annexe numérique AN2d.



Figure 2-5 : Foreuse Geotech 605D en opération.

2.2.2.1 Objectifs

Les sondages par rotopercussion (méthode RPSS) et au piézocône permettent d'acquérir des connaissances complémentaires sur la stratigraphie régionale en précisant les diverses couches de dépôts meubles et/ou la profondeur du socle rocheux. Ces sondages permettent occasionnellement l'installation de piézomètres fournissant de l'information sur la qualité de l'eau et la piézométrie locale. L'acquisition de données par forages est également un outil indispensable pour optimiser les interprétations stratigraphiques obtenues par les levés géophysiques.

2.2.2.2 Méthodes

Piézocône

Les sondages au piézocône consistent en l'enfoncement d'une sonde multi paramètres mesurant les propriétés mécaniques, la résistivité électrique et la permittivité des matériaux granulaires et cohésifs. La force et la vitesse d'enfoncement de la sonde sont constantes. La réalisation des essais au piézocône peut être limitée par la granulométrie et la compaction du milieu. Sur le territoire sondé, la présence de matériel granulaire grossier et compact a constitué une limite physique à la méthode d'investigation, et seulement un sondage au piézocône a pu être réalisé.

Sondages par rotopercussion

Les sondages par rotopercussion sont réalisés par rotation d'un train de tiges dont l'enfoncement se fait par poussée et par l'utilisation d'un marteau pneumatique. Les paramètres mesurés lors des sondages sont la force d'enfoncement et le pivot. Ce type de sondage permet d'identifier grossièrement les matériaux et de définir la profondeur au roc.

Le sondage par rotopercussion se limite aux dépôts meubles et la profondeur d'investigation est limitée par la longueur du train de tiges disponibles. Lors de la campagne de sondage la perte partielle du train de tige lors du premier sondage a limité la profondeur d'investigation à 30m.

Installation piézométrique

Les sondages par rotopercussion permettent, selon la pertinence, l'installation de piézomètres en PVC de 5 cm de diamètre. Ces installations sont ensuite utilisées pour le suivi piézométrique local, l'acquisition de connaissance sur les propriétés hydrauliques et l'échantillonnage hydrogéochimique.

Le tableau 2-7 présente la description des quatre installations piézométriques effectuées dans le cadre du projet.

Tableau 2-7 : Descriptions des installations piézométriques.

Piézomètre*	Profondeur ouvrage (m)	Tubage pvc (profondeur en m)		Crépine (profondeur en m)	
		de	à	de	à
RPSS-BER2	11,43	0	8,43	8,43	11,43
RPSS-FOR2	5,67	0	4,17	4,17	5,67
RPSS-FOR3	8,36	0	5,36	5,36	8,36
RPSS-SC1	16,44	0	13,44	13,44	16,44

*La localisation de ces sondages sont données au tableau 2-8.

2.2.2.3 Localisation

Dans le but d'optimiser les cinq jours d'investigation, les travaux se sont concentrés sur le territoire municipalisé de la Haute-Côte-Nord. Ainsi, le choix des zones d'investigation répond à l'objectif principal d'acquisition de connaissance dans les zones de lacune d'information stratigraphique et considère de courts déplacements entre les sites. Cette campagne aura permis la réalisation de :

- 13 sondages par rotopercussion;
- 1 sondage au piézocône;
- 4 installations piézométriques.

Les données de localisation sont présentées au tableau 2-8 tandis que la répartition des sondages sur le territoire est présentée à la figure 2-6.

Tableau 2-8 : Données de localisations des sondages par rotopercussion et au piézocône.

Sondage	Date	Municipalité	X⁽¹⁾	Y⁽¹⁾	Z⁽²⁾	Profondeur investiguée (m)
RPSS-BER1	2013-08-20	Les Bergeronnes	378485,7	5353172,6	79,3	28,16
RPSS-BER2	2013-08-21	Les Bergeronnes	379350,7	5352984,2	87,5	29,57
RPSS-BER3	2013-08-21	Les Bergeronnes	381973,0	5351865,6	50,6	2,13
CPT-BER2	2013-08-21	Les Bergeronnes	379350,7	5352984,2	87,5	21,80
RPSS-BER4	2013-08-21	Les Bergeronnes	382533,9	5350888,3	37,8	18,29
RPSS-COL1	2013-08-19	Colombier	425676,5	5416338,3	45,7	65,23
RPSS-FOR1	2013-08-19	Forestville	406282,3	5397754,0	80,4	32,00
RPSS-FOR2	2013-08-19	Forestville	407421,2	5397497,5	91,3	19,51
RPSS-FOR3	2013-08-19	Forestville	405645,7	5397975,5	94,9	28,96
RPSS-PSM1	2013-08-20	Porneuf-sur-Mer	402935,4	5388238,4	81,8	27,88
RPSS-PSM2	2013-08-20	Porneuf-sur-Mer	404498,9	5387569,8	57,7	28,65
RPSS-PSM3	2013-08-20	Porneuf-sur-Mer	406621,5	5385374,7	20,0	28,65
RPSS-SC1	2013-08-22	Sacré-Cœur	361457,7	5343335,7	113,8	27,43
RPSS-SC2	2013-08-22	Sacré-Cœur	360451,3	5342566,7	112,5	28,96

(1) Nad83, MTM zone 7

(2) DEM 20K

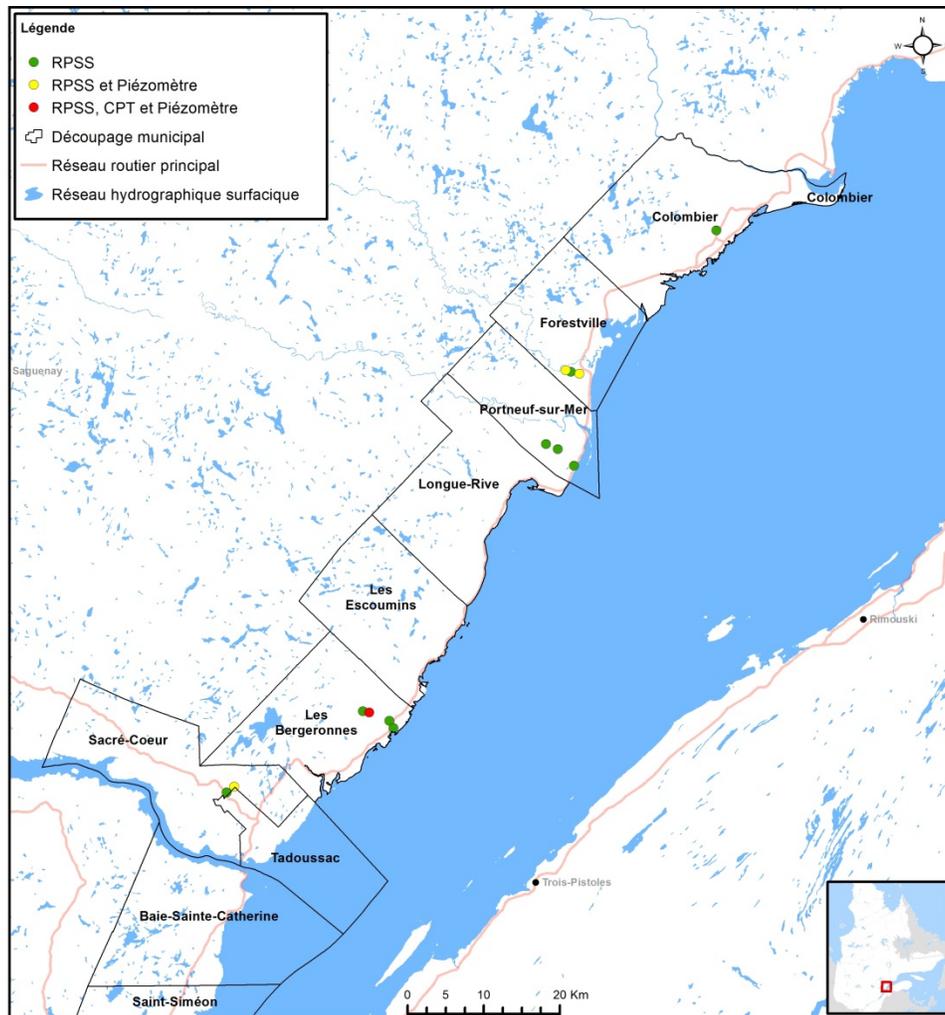


Figure 2-6 : Localisation des sondages par rotopercussion et au piézocône sur le territoire de la Haute-Côte-Nord.

2.2.3 Essais de pompage et levés piézométriques

2.2.3.1 Objectifs

Les essais de pompage d'eau souterraine effectués dans les puits existants permettent d'acquérir de nouvelles données de piézométrie et, dans plusieurs cas, des valeurs de propriétés hydrauliques caractéristiques du milieu aquifère capté. Chaque site investigué a nécessité la signature d'entente avec les propriétaires, dont un modèle est disponible à l'annexe numérique AN2e.

2.2.3.2 Description de la méthode

Les essais de pompage ont été réalisés pour la plupart du temps dans des puits privés, à l'intérieur desquels une pompe submersible a été introduite. Le niveau naturel du toit de la nappe est mesuré avant de démarrer le pompage. Lorsque le pompage commence, des mesures du niveau d'eau sont notées (figure 2-7) suivant un pas de temps régulier. La durée du pompage est généralement inférieure à 1 heure. La majorité des essais ont été réalisés au moment de la purge des puits qui précède l'échantillonnage hydrogéochimique.



Figure 2-7 : Mesure du niveau d'eau dans le puits pendant l'essai de pompage.

2.2.3.3 Localisation

Au total, 40 essais de pompage de courte durée, 34 en 2013 et 6 en 2014, ont été réalisés dans des puits captant des milieux aquifères granulaires ou de roc fracturé aux endroits indiqués sur la figure 2-8. L'analyse des essais de pompage effectués en 2013 a été réalisée dans le cadre d'un projet de fin d'études de baccalauréat en géologie (Foulon, 2014) tandis que ceux effectués en 2014 ont été analysés par l'équipe du projet PACES-CHCN. Les résultats obtenus permettent de caractériser la transmissivité du milieu aquifère capté.

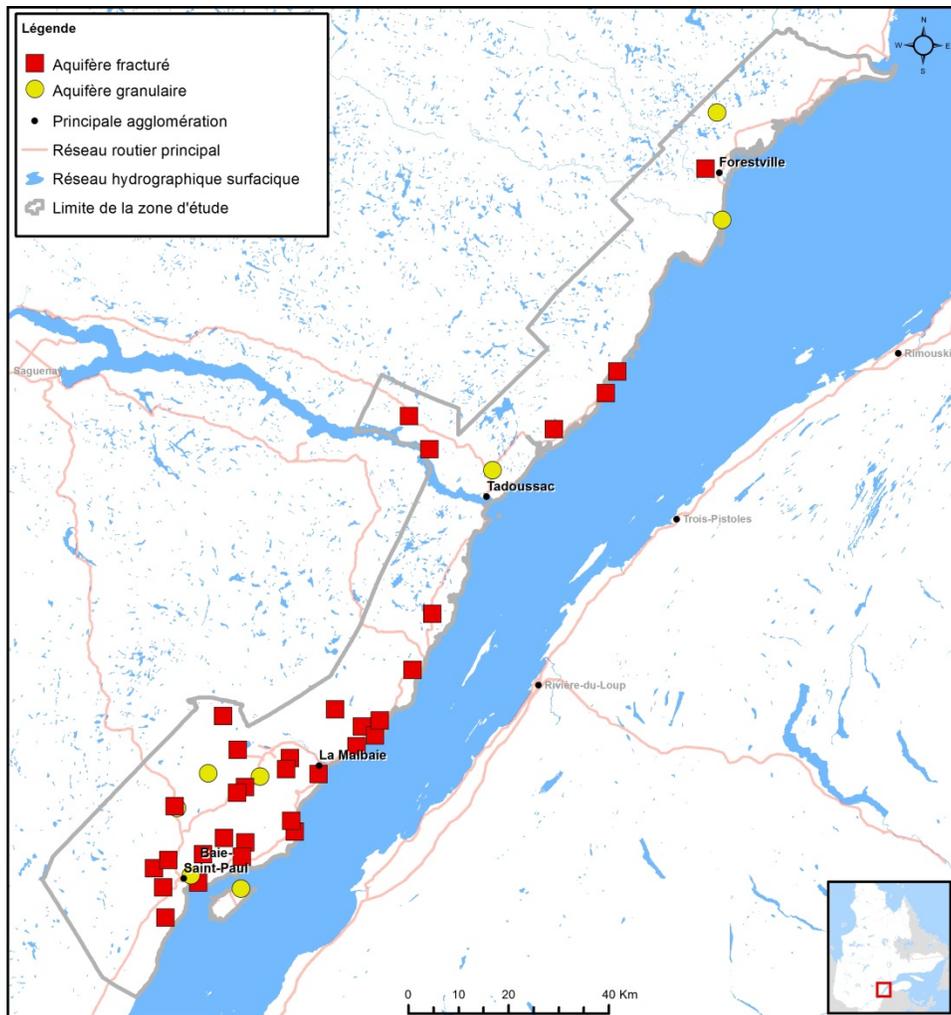


Figure 2-8 : Localisation des essais de pompage effectués lors des campagnes de terrain réalisées en 2013 et 2014 pour le projet PACES-CHCN.

2.2.4 Échantillonnage hydrogéochimique

La campagne d'échantillonnage et d'analyses hydrogéochimiques s'est déroulée au cours des étés 2013 et 2014. Elle s'intègre principalement dans le volet qualité des eaux souterraines du projet PACES-CHCN. Les données recueillies lors de cette campagne font également l'objet du projet de maîtrise réalisé par Madame Ombeline Ghesquière à l'UQAC.

2.2.4.1 Objectifs

L'échantillonnage d'eau souterraine est la seule méthode permettant une évaluation quantitative de la chimie organique et inorganique de l'eau, ce qui définit aussi sa qualité en termes de potabilité, en fonction du Règlement sur la qualité de l'eau potable du Québec (RQEP) et des recommandations pour la qualité de l'eau potable de Santé Canada.

2.2.4.2 Description de la méthode

La collecte d'échantillons a été précédée d'une période de sondage téléphonique exécuté par deux étudiants de l'UQAC et une stagiaire de l'OBV de la Haute-Côte-Nord. Ce sondage a nécessité l'élaboration de listes d'appels identifiant tous les citoyens hors du réseau d'aqueduc et susceptibles de posséder un ouvrage de captage de

l'eau souterraine. Au total, plus de 700 appels aux citoyens ont été réalisés pour identifier un peu plus d'une centaine de volontaires.

L'échantillonnage est effectué suivant un protocole (annexe numérique AN5) élaboré à cet effet et validé par les partenaires du groupe de recherche sur les eaux souterraines (GRIES). Les analyses ont été réalisées par un laboratoire accrédité par le Centre d'expertise en analyse environnement du Québec (CEAEQ), le laboratoire Maxxam a été sélectionné par appel d'offre par le GRIES. Les résultats d'analyse ont été remis par courriers postaux ou électroniques aux propriétaires de puits; de plus, dans les cas de dépassement de norme fixée par le RQEP, tous les propriétaires visés ont été avertis dans un délai de 24h suivant la réception des résultats d'analyse. La figure 2-9 montre l'étape de prélèvement d'eau souterraine dans les contenants appropriés.

La campagne hydrogéochimique s'est concentrée sur une caractérisation de la chimie inorganique des eaux souterraines. Le tableau 2-9 présente les paramètres physico-chimiques analysés dans le cadre du projet PACES-CHCN.



Figure 2-9 : Le prélèvement d'échantillon d'eau souterraine se fait dans des bouteilles approuvées par le laboratoire d'analyse.

Tableau 2-9 : Liste des paramètres physico-chimiques analysés en laboratoire et mesurés *in situ*.

PARAMÈTRES ANALYSÉS (Laboratoire)	
<ul style="list-style-type: none"> • Aluminium (Al) • Antimoine (Sb) • Argent (Ag) • Arsenic (As) • Baryum (Ba) • Cadmium (Cd) • Chrome (Cr) • Cobalt (Co) • Cuivre (Cu) • Manganèse (Mn) • Molybdène (Mo) • Nickel (Ni) • Sodium (Na) • Zinc (Zn) • Bore (B) • Fer (Fe) • Magnésium (Mg) • Lithium (Li) • Potassium (K) • Sélénium (Se) 	<ul style="list-style-type: none"> • Strontium (Sr) • Etain (Sn) • Titane (Ti) • Vanadium (V) • Béryllium (Be) • Bismuth (Bi) • Calcium (Ca) • Silicium (Si) – (soluble dans HNO₃) • Plomb (Pb) • Uranium (U) • Alcalinité Totale (en CaCO₃) à pH 4.5 • Azote ammoniacal (N-NH₃) • Bromure (Br) • Chlorures (Cl) • Fluorure (F) • Nitrate (N) et Nitrite (N) • Phosphore inorganique • Sulfates (SO₄) • Sulfures (S) •
PARAMÈTRES MESURÉS IN SITU	
<ul style="list-style-type: none"> • Température • Total des solides dissous / conductivité • Oxygène dissous • pH • Potentiel d'oxydo-réduction (Eh) 	<ul style="list-style-type: none"> • • •
PARAMÈTRES ORGANOLEPTIQUES OBSERVÉS IN SITU	
<ul style="list-style-type: none"> • Couleur • Odeur • Goût • Turbidité 	

2.2.4.3 Localisation

Les échantillons hydrogéochimiques ont été majoritairement prélevés dans des puits de captage privés, utilisés ou non pour l'alimentation en eau potable individuelle; toutefois la région présente une particularité intéressante par la présence de nombreuses résurgences d'eau souterraine. Plusieurs sources ont donc été sélectionnées comme points d'échantillonnage, bien que ces dernières ne soient pas implicitement identifiées comme eaux souterraines d'un point de vue hydrogéochimique :

- 101 stations sont prélevés dans des installations privées;
- 13 stations correspondent à des résurgences.

Comme le montre la figure 2-10, la sélection des stations d'échantillonnage a été réalisée pour obtenir une répartition relativement uniforme sur le territoire considéré et en conservant la proportion la plus égale possible entre les échantillons provenant d'eau souterraine contenue dans les dépôts de surface et ceux provenant du roc :

- 60 dans le roc fracturé,
- 53 dans les dépôts granulaires;
- 1 dont le type de milieu aquifère est inconnu.

Au total, 114 stations d'échantillonnage ont été prélevées dont 88 à l'été 2013 et 26 à l'été 2014 (figure 2-10). Également en 2014, 19 stations échantillonnées en 2013 ont été reprises pour un total de 133 échantillons. À ces 133 échantillons s'ajoutent également 1 échantillon blanc et 13 duplicatas. Ces derniers échantillons sont utilisés pour contrôler la méthode de prélèvement et la qualité des résultats d'analyse au laboratoire. Une autre méthode de contrôle de la qualité des échantillons et des analyses consiste à vérifier que l'échantillon respecte la balance ionique.

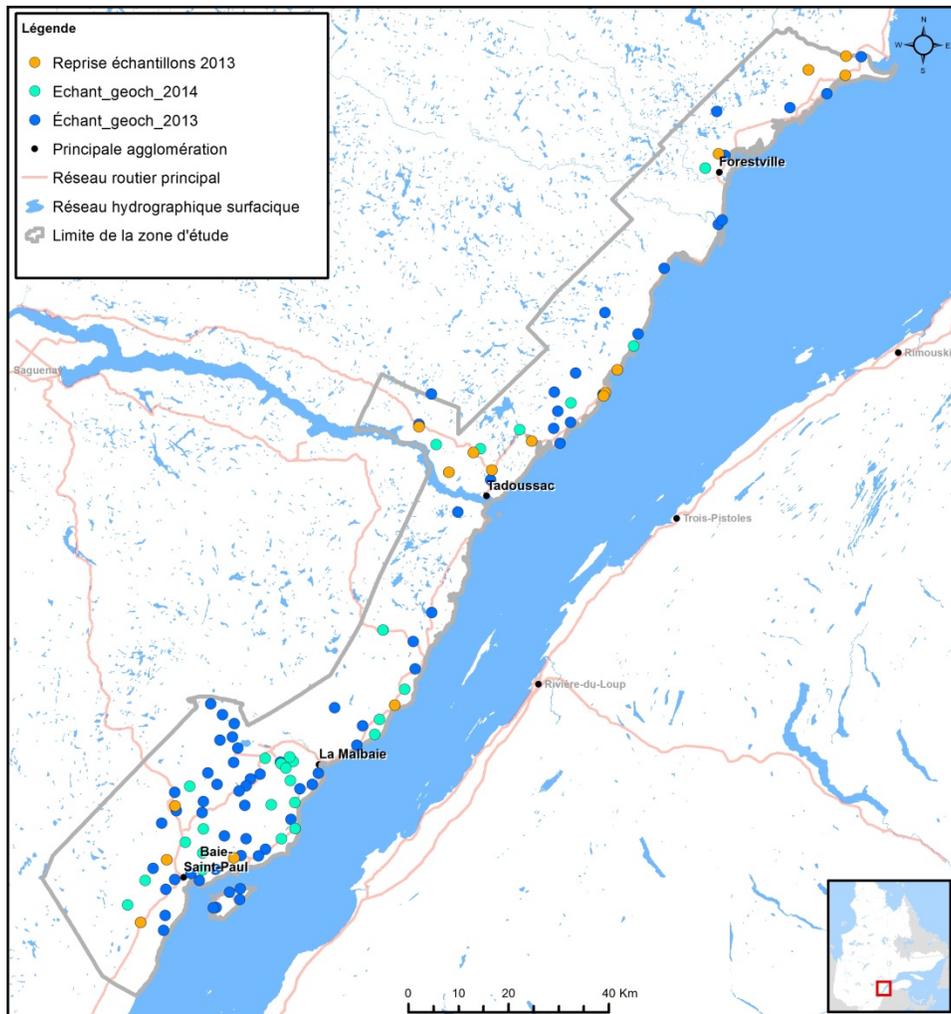


Figure 2-10 : Localisation des échantillons hydrogéochimiques (roc fracturé et dépôts granulaires).

2.2.5 Caractérisation de la fracturation

Le socle rocheux fracturé est un milieu aquifère fortement sollicité sur le territoire CHCN autant par les municipalités que par les particuliers. Au cours des étés 2013 et 2014, une équipe du projet PACES-CHCN a fait une campagne de levé de fractures, principalement dans le secteur de l'astroblème de Charlevoix.

2.2.5.1 Objectifs

L'objectif principal du levé de fractures sur le territoire de CHCN est d'établir les relations entre le degré de fracturation et les principaux accidents tectoniques connus comme les failles régionales (Saint-Laurent et Logan) ou encore l'astroblème de Charlevoix. Une hypothèse de travail a été soulevée au sujet de l'astroblème de Charlevoix. Les relevés préliminaires de la saison 2013 ont laissé entrevoir la possibilité d'un degré de fracturation plus élevé dans certaines portions de l'astroblème comme en périphérie des failles annulaires par exemple. Si l'hypothèse peut être soutenue, cela fait de l'astroblème ou de certaines régions de l'astroblème un milieu aquifère spécifique. Afin de tester plus avant cette hypothèse, une mission de terrain spécifique a été réalisée à la saison 2014.

2.2.5.2 Description de la méthode

La caractérisation de la fracturation s'effectue sur le terrain à partir de stations d'observation (affleurements, carrières). Les stations visitées qui sont privilégiées dans le cadre du projet PACES-CHCN se localisent à proximité de puits captant l'eau souterraine du roc fracturé, ceci dans le but de faire un lien entre l'état de la fracturation et les propriétés hydrauliques de l'aquifère fracturé.

Pour optimiser les levés, des couches numériques sont préparées dans un système d'information géographique (SIG). Des sites d'affleurement sont d'abord repérés à partir d'orthophotographies aériennes. La localisation de ces sites est ensuite examinée en relation avec le tracé du réseau routier et des linéaments régionaux, ainsi que la localisation des puits de captage municipaux, pour identifier les secteurs à visiter.

Sur le terrain, une tablette numérique est utilisée, permettant d'accéder aux informations sur les sites ciblés du fait que les déplacements sont suivis sur un SIG en temps réel. La station d'observation est enregistrée dans le SIG avec des coordonnées de localisation et les informations relatives au degré et à la nature de la fracturation.

Une méthode d'estimation visuelle du degré de fracturation a été utilisée afin de prendre en compte la maille moyenne des différentes familles de fractures ainsi que la taille du bloc unitaire. Ainsi le degré de fracturation a été estimé à partir d'une cote variant de 1 à 5 selon les critères donnés au tableau 2-10. La cote ainsi donnée permet une appréciation globale de la densité de fracturation en fonction du nombre de familles de fractures identifiées ainsi que de l'espacement moyen entre les fractures d'une même famille.

Tableau 2-10 : Cote servant à estimer visuellement le degré de fracturation observé sur un affleurement.

Cote	Degré	Bloc unitaire moyen	Caractéristiques
1	Très faible	Nul	Un jeu d'espacement large.
2	Faible	1 - 5 m	Présence de 1 ou 2 jeux avec espacement large.
3	Moyen	0,3 - 1 m	Plusieurs jeux dont un avec espacement plus serré.
4	Fort	10 - 30 cm	Plusieurs jeux avec espacement serré.
5	Très élevé	< 10 cm	Multiplés jeux, organisation chaotique, cataclase.

2.2.5.3 Localisation

En 2013 et 2014, plus de 80 stations ont été visitées sur le secteur de l'astroblème (figure 2-11). Ces affleurements sont tous accessibles par route ou à proximité de chemins carrossables, ce qui induit un biais dans la répartition des stations visitées. Ainsi, les affleurements en terrains accidentés ou boisés n'ont généralement pas été visités. Pour chaque station visitée, la lithologie a été identifiée et les principales structures (foliation, fractures, failles, etc.) ont été mesurées.

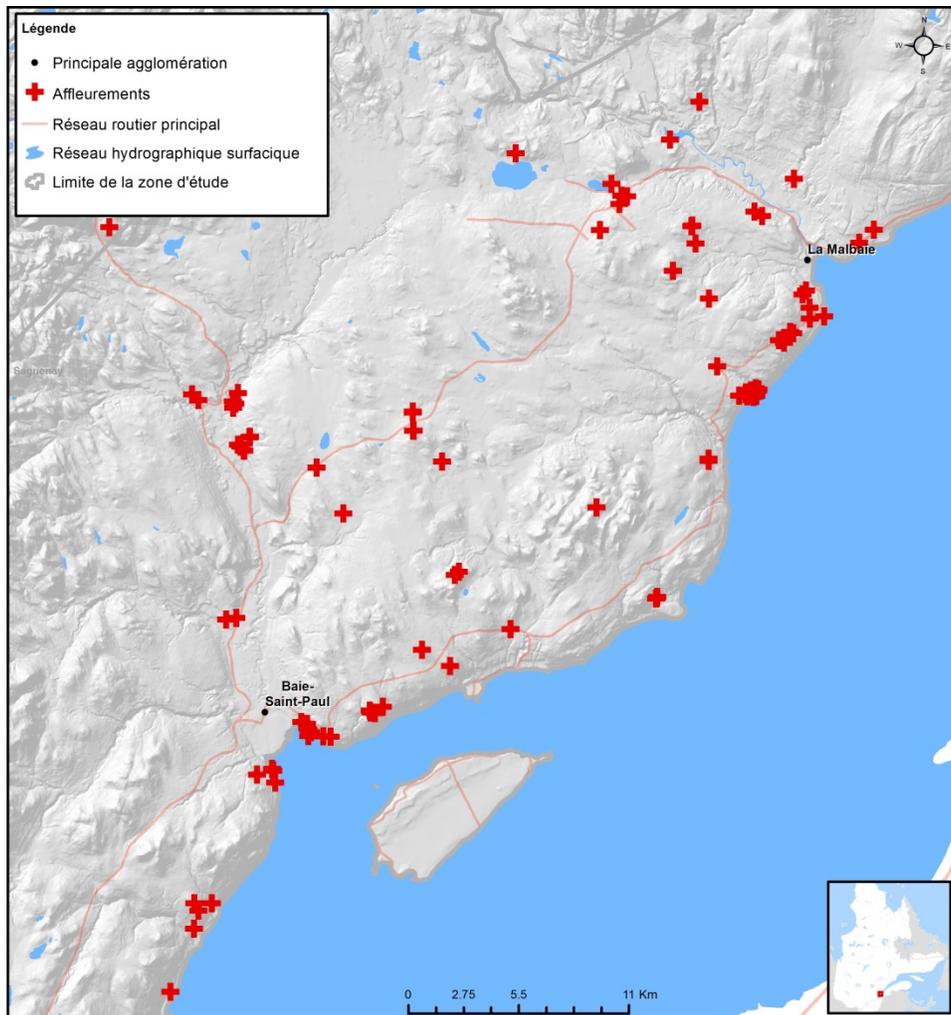


Figure 2-11 : Localisation des stations visitées pour caractériser la fracturation dans le secteur de l'astroblème de Charlevoix en 2013 et 2014.

2.3 Saisi, archivage et uniformisation des données

Les étapes d'uniformisation des données déjà existantes et acquises pendant la phase 1 du projet PACES-CHCN est présentée à la section 2.3.1 alors que la saisie et l'archivage des nouvelles données acquises sur le terrain (phase 2) est présentée à la section 2.3.2. L'étape du transfert de ces données dans la base du MDDELLC est brièvement présentée à la section 2.3.3.

2.3.1 Uniformisation des données existantes

Tel que présenté à la section 2.1, les données existantes sont disponibles parfois sous forme de données numériques structurées alors que d'autres sont disponibles seulement à l'intérieur de rapports papier ou de rapports PDF. Les opérations réalisées pour uniformiser ces deux types de format de données sont différentes et sont ici présentées.

2.3.1.1 Traitements sur les données numériques structurées

Les données numériques structurées caractérisant le **milieu humain** (tableau 2-1) et le **milieu naturel** (tableau 2-2), ainsi que les **données surfaciques et linéaires** caractérisant les **milieux géologique et hydrogéologique**

(tableau 2-3) sont fournies dans différents formats (par exemples *Shapefile*, *file geodatabase*, *TIFF*, *raster dataset*, etc.) et elles possèdent une diversité de caractéristiques (couverture, projection, etc). Ces données doivent donc subir certains traitements avant de pouvoir être utilisées pour la création des livrables du PACES. Les traitements réalisés sont mineurs et consistent souvent à modifier le format de la donnée, à extraire les données situées dans la zone d'étude et à modifier la projection cartographique.

Les données numériques **géologiques et hydrogéologiques ponctuelles** (forages, puits, piézomètres, etc.) provenant de différents ministères (MTQ, MERN, MDDELCC) sont essentielles pour réaliser un projet PACES, mais elles nécessitent des traitements beaucoup plus importants. En effet, ces données sont fournies dans des fichiers de données numériques différents (*Access*, *Excel*, *Shapefile*, etc.) ayant une structure variable. Selon les ministères, les données peuvent être plus ou moins riches en éléments descriptifs et ces derniers diffèrent souvent en terminologie ou en unité de mesure employée. Généralement, les traitements réalisés sur les données géologiques et hydrogéologiques ponctuelles sont les suivants :

- extraction des données situées dans la zone d'étude;
- modification de la projection cartographique pour Conique conforme de Lambert;
- sélection de l'information descriptive jugée pertinente;
- codification des unités lithologiques/stratigraphiques;
- conversion des unités de mesure dans le système métrique (par exemple, le facteur 1/3.2808399 est utilisé pour convertir des pieds en mètres).

Ces traitements sont en somme plutôt mineurs, mais certaines sources nécessitent des traitements beaucoup plus importants. Par exemple, les données du MTQ ont requis une restructuration complète puisque l'information stratigraphique est fournie dans plusieurs champs différents.

Au total, **2 837** stations d'information **géologiques et hydrogéologiques ponctuelles** ont été récupérées et traitées. Le tableau 2-11 présente les différentes sources de données avec le nombre de stations récupérées.

Tableau 2-11 : Données numériques géologiques et hydrogéologiques ponctuelles récupérées et traitées.

<i>Propriétaire</i>	<i>Base de données / Organisme</i>	<i>Nombre de stations récupérées et traitées</i>
MERN	SIGEOM - Forage	389
MERN	SIGEOM – Projet Quatenaire	934
MTQ	SOMMAIRE, BDG et FORLOG	238
MDDELCC	SIH	1376
MDDELCC	PACES-SLSJ	92

2.3.1.2 Saisi et archivage des données non numériquement structurées

Les données non numériquement structurées proviennent principalement des études hydrogéologiques et géologiques obtenues auprès des municipalités, dont les rapports se présentent habituellement en format papier. Ces documents de grande valeur scientifique impliquent des manipulations et des transformations importantes pour rendre accessible et exploitable en toute intégrité l'information qu'ils contiennent. Le processus de saisie, de numérisation et d'archivage de ces données a fait l'objet d'un protocole rédigé pour le Groupe de recherche interuniversitaire sur les eaux souterraines (GRIES) dans le cadre des projets PACES. Ce protocole est disponible à l'annexe numérique AN6. La suite de cette section présente un résumé de ce processus (encadré gris) ainsi que les particularités et les statistiques reliées au projet PACES-CHCN :

Étape 1 - Numérisation et archivage

Il faut **numériser** à l'aide d'un balayeur optique tous les documents papiers (ex: rapports techniques) récupérés au cours de la collecte des données. Il faut aussi **archiver** les documents numérisés et les documents existants déjà sous forme numérique en format PDF. Un hyperlien dans une base de données bibliographiques, en l'occurrence *EndNote* permet de référer aux documents archivés. Le nom du rapport archivé est un identifiant unique qui est aussi utilisé pour référer à la donnée originale dans la base de données de saisie (étape 0. *Étape 4 - Saisie et structuration de la donnée*) et dans la base de données spatiales finale (section 2.4)

Parmi les 205 rapports récupérés dans le cadre de cette étude dans les municipalités de CHCN (tableau 2-5), plusieurs ne contiennent pas d'information géologique ou hydrogéologique. Par conséquent, le nombre de rapport de consultant archivés correspond à **153**.

Pour les rapports provenant des ministères (tableau 2-4), sur les 4 rapports du SIGPEG achetés, **2** rapports se sont avérés contenir de l'information pertinente pour le PACES et sont archivés. Les **3** schémas des piézomètres provenant du réseau de suivi des eaux souterraines du Québec ont aussi été archivés. Les 35 rapports géologiques récupérés sur le SIGEOM sont discutés un peu plus bas, soit au point #3 (*Étape 3 - Extraction et archivage*) de la présente section.

Deux mémoires de maîtrise ont aussi été archivés, car ils contiennent de l'information géologique pertinente sur le territoire de CHCN.

Étape 2 - Inventaire

Il faut dresser l'**inventaire** des données disponibles dans un tableau *Excel* pour lequel chaque ligne correspond à un rapport et chaque colonne à un thème ou un type d'information potentiellement présent dans le rapport (ex. description stratigraphique ou analyses granulométriques). L'inventaire permet donc de connaître, pour chaque rapport, le nombre d'éléments présents pour chaque type d'information.

Voici les informations pertinentes qui pouvaient être disponibles dans les **153** rapports numérisés :

- **Descriptions stratigraphiques** : nature et ordre d'empilement des dépôts de surface. Cette information peut être le long d'une ligne verticale (forage, coupe stratigraphique), le long d'une ligne horizontale (levé géophysique) ou en diagramme 3D (modèles conceptuels).
- **Analyses granulométriques** : caractéristiques physiques quantitatives de la grosseur des grains des matériaux granulaires.
- **Levés géophysiques au sol** : information indirecte sur la stratigraphie et/ou l'épaisseur des dépôts de surface.
- **Données sur la fracturation du massif rocheux** : mesures ou évaluation visuelle de paramètres du roc, notamment sur les fractures, soit leur orientation, leur fréquence et leur ouverture.
- **Levés piézométriques** : niveau des nappes d'eau souterraine.
- **Propriétés hydrauliques des milieux aquifères** : caractéristiques physiques quantitatives des milieux géologiques obtenues par essais hydrauliques dans un forage (essai de pompage et essai de perméabilité). Les propriétés hydrauliques saisies correspondent le plus souvent à la transmissivité, le coefficient d'emmagasinement et la conductivité hydraulique.
- **Analyses hydrogéochimiques** : caractéristiques chimiques quantitatives de l'eau souterraine obtenue par analyse en laboratoire de l'eau souterraine extraite d'un forage. Il arrive que plusieurs analyses soient disponibles pour un même point de captage, lorsque plusieurs échantillons ont été prélevés au moment d'un essai de pompage (24h, 48h et/ou 72h).
- **Aire d'alimentation d'un puits** : surface de terrain sur laquelle toute l'eau qui s'infiltré aboutit tôt ou tard au puits.

Étape 3 - Extraction et archivage

Il faut **extraire** des rapports les pages contenant de l'information pertinente et **l'archiver** par thèmes, par exemple « diagraphie de forage » ou « essais de pompage ». Lorsque la localisation de l'information hydrogéologique ou géologique n'est possible qu'à partir d'une carte (ex. : la trace d'une coupe stratigraphique ou un puits dont les coordonnées x et y ne sont pas fournis dans le rapport), il faut extraire la carte du rapport et l'archiver.

L'étape d'extraction et d'archivage facilite l'accessibilité à la donnée source et permet de la valider plus rapidement. Le nom du fichier PDF contenant l'extraction est unique et est utilisé comme référence dans la base de données de saisie (étape 0. *Étape 4 - Saisie et structuration de la donnée*) et/ou dans la base de données spatiales finale (section 2.4).

Au total, **15** types d'information ont été extraits des 153 rapports archivés. Les cartes géologiques contenant la localisation d'affleurements ont aussi été extraites des **35** rapports de cartographie géologique du MERN (tableau 2-4). La totalité des extractions a ensuite été archivée par thèmes. Le tableau 2-12 indique ces types d'information avec le nombre d'extraction pour chaque type.

Tableau 2-12 : Nombre d'éléments extraits des rapports par type de données.

Type de données extraites	Nombre d'extraction
Diagraphies de forage	649
Essais de pompage	386
Diagraphies au piézocône	12
Coupes stratigraphiques	46
Levés de sismique réfraction	102
Aires d'alimentation	30
Cartes piézométriques	14
Analyses granulométriques	153
Rapports d'analyses hydrogéochimiques	239
Essais de perméabilité	19
Forages orientés	1
Carte localisant des forages	260
Carte localisant des coupes stratigraphiques	13
Carte localisant des levés sismiques réfractions	21
Carte localisant des aires d'alimentation	29
Cartes géologiques localisant des affleurements	125

Étape 4 - Saisie et structuration de la donnée

Il faut **saisir** l'information hydrogéologique et géologique ponctuelle (forage, puits, piézomètres, etc.) présente dans les documents à l'intérieur d'une base de données de saisie en format *Microsoft Access* (.mdb). Les informations sont entrées dans la base de données grâce à des formulaires créés selon plusieurs thématiques. La base de données de saisie est une base de données intermédiaire qui, comme son nom l'indique, facilite la saisie de l'information.

Lorsque la localisation de l'information hydrogéologique ou géologique ponctuelle n'est possible qu'à partir d'une carte fournie dans le rapport ou que l'information est linéaire (ex. : coupe stratigraphique), il faut **structurer** l'information en données numériques spatiales. Pour ce faire, il faut géoréférencer la carte à l'aide de plusieurs points de contrôle et saisir (*vectoriser*) manuellement la géométrie de l'information dans un format

de données spatiales (ex : *shapefile*). Par exemple, un puits ou un affleurement est *vectorisé* avec une géométrie ponctuelle alors qu'une coupe stratigraphique ou un levé de sismique-réfraction est *vectorisé* avec une géométrie linéaire.

La base de données utilisée pour saisir l'information ponctuelle du projet PACES-CHCN a été développée par l'équipe de CERM. Une quinzaine de formulaires permettent d'entrer la totalité de l'information spatiale, géologique et hydrogéologique. Par exemple, le formulaire #4 (figure 2-12) permet de saisir l'information stratigraphique par couche stratigraphique à partir des codes abrégés de la Commission géologique du Canada (CGC) dans le champ nommé *Litho Facies Primaires*.

NoIntervale	De	A	Unite du De et du A	Litho Facies Primaire	Litho Facies S
1	0	2.3	m	In	
2	2.3	68.6	m	R	
*					

Figure 2-12 : Formulaire #4 qui permet la saisie des couches stratigraphiques dans la base de données de saisie.

Les codes de la CGC sont présentés au tableau 2-13. Une lettre identifie le matériel considéré (S- sable, G- gravier, etc.) et un chiffre donne une indication de sa granulométrie (1- fin, 2- moyen, 3- grossier). Dans ce code, la lettre D est attribuée au matériel très mal trié dans lequel toutes les granulométries sont retrouvées.

Tableau 2-13 : Code abrégé de la Commission géologique du Canada pour la description de dépôts meubles.

<i>Matériaux</i>	<i>Équivalent Code CGC</i>
Particules fines	F
Argiles	F1
Silts	F2
Sable	S
Sable fin	S1
Sable moyen	S2
Sable grossier	S3
Gravier	G
Gravier fin	G1
Gravier moyen	G2
Gravier grossier	G3
Diamicton	D
Diamicton fin	D1
Diamicton moyen	D2
Diamicton grossier	D3
Blocs	B
Organique	O
Remblai	X
Roc	R
Inconnu	In
Incohérent	Ic

Pour le territoire de CHCN, **840** stations ponctuelles d'information géologique et hydrogéologique (forages, puits ou piézomètres, etc.) ont été saisies dans cette base de données. Puisque 95 stations n'ont pu être localisées sur le territoire, seulement **745** stations ont finalement pu être utilisées pour le projet PACES.

Les cartes extraites présentes dans les rapports et localisant de l'information hydrogéologiques ou géologiques et extraites des rapports (tableau 2-12) ont été extraites et géoréférencées, ce qui a permis d'augmenter le nombre de station d'information. Sur les 745 stations répertoriées dans le tableau 2-14, 586 ont été localisées de cette façon. Ces dernières ont aussi permis de *vectoriser* **39** lignes de sismique réfraction à partir desquelles **910** stations virtuelles ont été générées. Elles ont aussi permis de *vectoriser* **23** coupes stratigraphiques. Enfin, **13 545** affleurements ont été numérisés à partir des 125 cartes géologiques du SIGEOM. Le nombre d'informations géologiques et hydrogéologiques saisies et archivées par source de données est présenté au tableau 2-14.

Tableau 2-14 : Données géologiques et hydrogéologiques ponctuelles initialement non numériques récupérées à partir de document papier ou PDF.

Type de document	Organisme	Nb stations ponctuelles	Nb coupes stratigraphiques	Nb levés sismique réfraction
Rapport de consultant	Les municipalités	739	20	39
Rapport de forage	SIGPEG	2	-	-
Schéma de piézomètres	Réseau du suivi des eaux souterraines du Québec	3 ¹	-	-
Mémoire de maîtrise	Université Laval, INRS	1	3	-
Carte géologique	SIGEOM	13 545 ²	-	-

¹Compte deux nids de piézomètre

²Correspond à des affleurements seulement

Étape 5 - Contrôle de la qualité

Il faut contrôler la qualité des données saisies dans la base de données afin qu'elles soient cohérentes avec le contenu des rapports et l'archivage.

Pour réaliser le contrôle de la qualité de la base de données de saisie du projet PACES-CHCN, trois thèmes ont été retenus : la stratigraphie, l'information liée au captage et les propriétés hydrauliques. L'information saisie pour ces trois thèmes a été systématiquement vérifiée pour au moins une station (forage, puits ou piézomètres, etc.) par rapport. Si l'information saisie était cohérente avec celle retrouvée dans le rapport, on a considéré que les informations sont valides pour toutes les stations documentées dans le même rapport.

2.3.2 Saisie et archivage des nouvelles données acquises sur le terrain

Les nouvelles données géologiques ou hydrogéologiques ponctuelles acquises pour le projet PACES-CHCN se retrouvent dans des fiches terrain et des rapports PDF, ou encore sur des images ou des photographies. Le processus de saisie et d'archivage de ces nouvelles données est sensiblement le même que celui réalisé pour les données non numériques existantes et présenté à la section 2.3.1.2. Les documents sont donc numérisés, archivés, nommés avec un identifiant unique pour pouvoir y référer, saisis dans une base de données ou structurés dans un fichier de données numériques et enfin la qualité de la données numériques est vérifiée. La suite de cette section présente en détail l'étape de la numérisation et l'archivage, ainsi que l'étape de saisie et de structuration de la donnée.

2.3.2.1 Numérisation et archivage

Cette section décrit les particularités de chacun des documents créés pendant ou suite aux travaux de terrain. Le tableau 2-15 résume le nombre de documents archivés par type de documents.

Fiches de terrain papier

Les fiches de terrain sont produites sur un format papier. Chacune d'entre elles a été numérisée à l'aide d'un balayeur optique puis archivée en format PDF dans un répertoire dédié. Les **114** fiches de terrain remplies pendant la campagne d'échantillonnage hydrogéochimique (section 2.2.4) ainsi que les **25** fiches remplies pendant la campagne de géophysique ont été numérisées et archivées.

Rapports PDF

Les résultats des sondages RPSS-CPT réalisés (section 2.2.2) ont été obtenus sur des rapports PDF. Au total, **13** rapports de sondage ont été archivés. Les résultats des analyses hydrogéochimiques sur les échantillons

recueillis pendant la campagne d'échantillonnage fournies par le laboratoire *Maxxam* ont aussi été reçus en format PDF. Au total, **157** certificats d'analyse ont été archivés dans **138** documents PDF distincts. Les analyses des 19 puits échantillonnés à la fois en 2013 et 2014 ont été regroupées dans un même document PDF pour chaque puits.

Images

Les données géophysiques brutes collectées sur le terrain (section 2.2.1) ont été traitées et sont présentées sous forme de fichier image (.bmp, .png, .jpg et .wmf). Au total, **3** images de résistivité, **1** image de sismique réfraction, **170** images de points TDEM et **48** images de ligne TDEM ont été archivées.

Photographie

Plusieurs photographies ont été prises sur le terrain. Au total, **164** photographies lors des visites des municipalités, **286** pendant la campagne hydrogéochimie, **401** pour les levés structuraux, **560** pendant les travaux de géophysique et **12** lors de la réalisation des sondages. Les 4 007 photographies prises pendant le projet de cartographie des dépôts quaternaires qui a lieu en parallèle ont aussi été archivées de la même façon.

Tableau 2-15 : Nouvelles données non numériques acquises sur le terrain.

<i>Type de document / Type de campagne terrain</i>	<i>Nombre de fichiers</i>
Hydrogéochimie	114
Géophysique	25
Sondage RPSS-CPT	13
Hydrogéochimie	138
Géophysique – résistivité	3
Géophysique – sismique réfraction	1
Géophysique – TDEM Points	170
Géophysique – TDEM Lignes	48
Photographie PACES	1 426
Photographie Quaternaire	4 007
Visite des municipalités	164
Hydrogéochimie	286
Levés structuraux	401
Géophysique	560
Sondage	12

2.3.2.2 Saisie et organisation numérique de la donnée

Afin de faciliter l'étape de saisie numérique des données acquises sur le terrain, des formulaires numériques en format *Access* de *Microsoft* ont été conçus. Ils permettent d'uniformiser la structure des données. La figure 2-13 présente un exemple de formulaire numérique de saisie, en l'occurrence celui pour la saisie de l'information hydrogéochimique. Des formulaires de ce type ont été conçus et utilisés aussi pour la campagne de levés structuraux.

The screenshot shows a software window titled 'Station' with a data entry form. The form is organized into several sections:

- Identification du site:** Includes fields for 'Numéro du site' (H001), 'Municipalité' (Chic), 'CodeMRC' (FJORD), 'Adresse' (3746 Chemin St-Pierre), 'Personne Ressource' (Germain Riverein), 'Téléphone' (418) 549-7888, 'Préleveur' (MB), 'Environnement' (T1), 'Projet' (111), 'Fiche terrain' (H001-Chicoutimi-230620), and 'Échantillons blancs'.
- Puits:**
 - Identification Puits:** 'Nom Puits' (H001-1), 'Année Construction' (1979), 'Nom du Puisatier'.
 - Localisation Puits:** 'Altitude' (150), 'Estant' (340222), 'Nordant' (5358653), 'UTM' (checked), 'Projection' (NAD83), 'Zone' (19), 'Source Coord' (GPS), 'Feuillet' (022D06).
- Caractéristiques physiques:** 'Prof. (m)' (44.20), 'Diam. (cm)' (15.24), 'Longueur Crépine (m)', 'Profondeur Crépine (m)', 'Type Tubage' (A), 'Longueur Margelle (cm)' (-5.00), 'Type Pompe' (3/4 de force submersible), 'Profondeur Pompe (m)' (40.54), 'Aérateur' (checkbox).
- Conditions:** 'Condition Ouvrage' (F), 'Type Aquifère' (S), 'Type Nappe' (A), 'Jaillissante' (checked), 'Type Ouvrage' (Pu).
- Utilisation Ressource:** 'Utilisation' (Domestique), 'Disponibilité Ressource', 'Variation Qualité', 'Analyse Copie', 'Nombre Utilisateur' (1), 'Traitement'.
- Observations:** 'Date observation' (2010-06-23), 'Observé par' (MB), 'Intérêt' (H3), 'Météo' (N), 'Température de l'air' (23), 'QaQc' (checkbox).

At the bottom, there are navigation buttons like 'Fermer', 'LV-Station', 'LV-Localisation', 'LV-Caract-1', 'LV-Caract-2', 'LV-Autres', 'LV-Unités', and 'Conversion Unités'.

Figure 2-13 : Formulaire numérique de saisie Access; exemple de la campagne d'échantillonnage hydrogéochimique.

Les données provenant des sondages par rotopercussion, des sondages au piézocône et de la géophysique n'ont pas été saisies dans une telle base de données. Pour le projet PACES-CHCN, les données recueillies et créées au cours de ces deux campagnes ont simplement été structurées dans une liste de données *Excel* et/ou dans un *Shapefile*.

2.3.3 Transfert des données dans la base de données du ministère

Une fois que toutes les données hydrogéologiques et géologiques ponctuelles sont uniformes dans leur format et leur structure, elles sont transférées dans la base de données *ACCESS* fournie par le MDDELCC. Cette base de données a été fournie au GRIES pour faciliter l'intégration des données de tous les projets PACES du Québec. Elle a alors été peuplée pour répondre aux exigences du MDDELCC en ce qui concerne le format de livraison. Pour accélérer le transfert des données du projet PACES-CHCN dans l'architecture de cette base de données, des requêtes SQL ont été créées et entreposées dans la base de données *ACCESS*.

En raison de son architecture optimisée pour la saisie de l'information, les données dans la base de données du MDDELCC sont difficilement exploitables à partir d'un système d'information géographique. Pour faciliter l'exploitation de toutes les données hydrogéologiques et géologiques recueillies pendant la première et la deuxième phase du projet PACES-CHCN, ces données ont aussi été transférées dans une base centralisée de données spatiales implantée dans une *file geodatabase*. Cette base de données spatiales est décrite à la prochaine section.

2.4 Intégration et centralisation dans une base de données spatiales

Toutes les données hydrogéologiques et géologiques récupérés et/ou extraites de documents ainsi que les nouvelles données acquises sur le terrain sont transférées et centralisées dans une base de données spatiales

implantée dans le format *file geodatabase* d'*ESRI*. Les données ponctuelles (stations) sont ensuite cotées pour ce qui est de leur fiabilité et subissent un processus de validation. Ce processus d'évaluation de la fiabilité et la validation des données ponctuelles fait l'objet de la section 2.4.1. Le modèle d'implantation de la base de données spatiales est quant à lui décrit à la section 2.4.2 alors que les métadonnées s'y rattachant sont présentées à la section 2.4.3.

2.4.1 Fiabilité et validation des données ponctuelles

Le protocole « fiabilité validation » des données ponctuelles a été rédigé par le GRIES et est disponible à l'annexe numérique AN7, afin d'évaluer la fiabilité et la validité des données hydrogéologiques ponctuelles.

L'application de ce protocole permet de sélectionner les stations les plus pertinentes pour la création des livrables requis dans le cadre du projet PACES. Ce protocole est appliqué une fois que les données sont entrées dans la base de données spatiales. Ainsi, les données sont soumises à différents traitements effectués à l'aide de codes informatiques VBA (*Visual Basic Applications*) ou de requêtes SQL (*StructuredQueryLanguage*). Ces codes permettent l'attribution de nouveaux critères qui seront intégrés sous forme de table à la base de données spatiales. En résumé, ces codes correspondent à quatre types de traitements spécifiques :

1. Codifier le type d'information technique et/ ou scientifique de chaque station (cote de fiabilité);
2. Valider les informations techniques et/ou scientifiques de chaque station (critère de validation);
3. Identifier les doublons de station dans la base de données (critère d'identification des doublons);
4. Effectuer la sélection finale des stations qui entreront dans l'élaboration d'un livrable donné (critère de sélection des forages).

2.4.2 Modèle d'implantation

L'architecture de la base de données à référence spatiale développée et implantée au cours du projet PACES-SLSJ a été reprise pour entreposer les données du projet PACES-CHCN, mais après que certaines modifications mineures lui aient été apportées. Tel que mentionné dans le rapport du projet PACES-SLSJ (CERM-PACES, 2013), l'architecture de cette base de données spatiales diffère de celle retrouvée dans les bases de données de saisie décrite à la section 2.3 et s'apparente davantage à celle retrouvée dans un entrepôt de données. Globalement, l'architecture centralisée d'un entrepôt de données (table centrale avec plusieurs tables reliées) permet d'exploiter plus facilement les données à partir d'un interface-client comme un système d'information géographique.

Dans un souci d'uniformité, le nom de certaines tables et de certains champs retrouvés dans la base de données spatiales s'inspire en partie de ceux retrouvés dans la base de données *Access* du MDDELCC (section 2.3.3). Le modèle d'implantation de la base de données spatiales est présenté à la figure 2-14. Ce modèle d'implantation permet de visualiser rapidement certaines caractéristiques des tables de la base de données spatiales (temporalité, géométrie spatiale ou format de la donnée). Ces informations sont fournies à l'aide d'un pictogramme situé à côté du nom de la table.

La table (classe d'objets) centrale illustrée en **blanc** sur la figure 2-14 contient les données de localisation (coordonnées géographiques) d'une station d'observation (donnée ponctuelle) et quelques informations supplémentaires (référence à la donnée source, propriétaire, liste des informations attachées à la station, etc.). La classe d'objets *Station* contient **5116** unités spatiales. Une unité spatiale peut être un puits, un piézomètre, un forage, un trou, une section, un levé géophysique ou un affleurement.

Plusieurs autres tables sont liées à la classe d'objets centrale. Elles contiennent des informations complémentaires qui peuvent être groupées sous différents thèmes représentés par une couleur distincte sur la figure 2-14. Elles contiennent de l'information sur les infrastructures de la station d'observation (longueur de crépine, présence d'une pompe, longueur de tubage, etc.), sur le milieu aquifère et sur la nappe d'eau souterraine. Aussi, certaines tables contiennent les données obtenues suite à l'évaluation de la fiabilité et la validation des données (section 2.4.1).

Les tables qui ne possèdent pas de lien avec la classe d'objets centrale correspondent à des données linéaires extraites des rapports (ex. : coupes stratigraphiques), à des données intermédiaires utilisées dans la création des livrables ou aux résultats finaux des livrables du projet PACES (tables en rose sur la figure 2-14). Le contenu de chacune des tables illustrées sur la figure 2-14 est présenté en détail à l'annexe numérique AN8.

Une particularité de cette base de données est qu'elle contient autant les données sources, c'est-à-dire les données qui ont servi à l'analyse et la création des cartes finales du projet PACES, que l'ensemble des résultats d'analyse et cartographiques. Cette base de données spatiales contient près de 30 000 points d'information. La base de données spatiales PACES-CHCN et son contenu sont donc une photographie dans le temps qui illustre l'état des connaissances sur les eaux souterraines du territoire de CHCN en **2015**.

2.4.3 Les métadonnées

Une description des données présentes dans la base de données spatiales est fournie dans un fichier *Excel*. La première feuille du fichier fournit les informations générales telles que le nom de la base de données spatiales, la date de sa dernière mise à jour, le nom des personnes ou organismes qui ont contribué à sa création et les limites générales d'utilisation.

Les autres feuilles du fichier *Excel* décrivent les tables de la base de données spatiales. Une feuille *Excel* porte le nom de la table et contient une brève description du contenu de la table, le nom de tous les champs ainsi que la liste des valeurs possibles.

3 DESCRIPTION DU TERRITOIRE À L'ÉTUDE

La caractérisation hydrogéologique d'un territoire requiert de bonnes connaissances géographiques de ce dernier. Les caractéristiques géographiques du territoire étudié par le projet PACES-CHCN sont décrites dans ce chapitre selon les aspects physiques et humains.

Les aspects physiques portent sur l'ensemble du milieu naturel, incluant la topographie, l'hydrographie, le climat et le couvert végétal. Certains de ces aspects constituent des facteurs qui interviennent dans l'évaluation du bilan hydrique (chapitre 5), permettant d'estimer la quantité d'eau provenant des précipitations qui participent à la recharge des nappes souterraines sur le territoire.

Les aspects humains permettent d'identifier les utilisateurs d'eau de surface et d'eau souterraine, et d'estimer leurs besoins en termes de quantité. Ils donnent également un aperçu de la pression anthropique exercée sur la ressource à partir des prélèvements et des sources de contamination potentielles.

3.1 Aspect physique

Le milieu naturel se définit par quatre principaux facteurs influant sur l'hydrogéologie régionale:

- **la topographie** est le principal moteur de l'écoulement de l'eau de surface, elle influence le ruissellement des eaux de surface et l'infiltration des eaux souterraines;
- **l'hydrographie** présente les importants lieux de drainage des eaux souterraines; le débit des cours d'eau reflète à la fois la quantité d'eau de ruissellement et celle de décharge des eaux souterraines;
- **le climat** inclut notamment la température et les précipitations; ces dernières constituent la principale source de recharge des aquifères ;
- **la pédologie** caractérise les sols; sa connaissance est utile dans l'estimation des quantités d'eau de ruissellement et celles de la recharge des aquifères ;
- **la végétation** génère l'évapotranspiration, qui retourne vers l'atmosphère une proportion importante des précipitations.

3.1.1 Topographie et pentes du sol

La topographie favorise l'infiltration de l'eau dans les terrains plutôt plats, tandis qu'elle facilite le ruissellement lorsque le relief est accentué. Ainsi, le relief contribue à diriger et à concentrer les écoulements de surface vers les plus bas niveaux. Aussi, un relief accentué peut être favorable aux résurgences d'eau souterraine à son pied.

De façon générale, le relief de la région CHCN se caractérise par un fort gradient topographique. Les altitudes les plus élevées sont situées au nord-ouest du territoire municipalisé où elles atteignent plus de 1 000 m; elles diminuent assez rapidement vers le sud-est sur une distance de 20 à 30 kms jusqu'au niveau du fleuve Saint-Laurent. Les cartes #1 – *Topographie*, #3 – *Modèle numérique de terrain* et #4 – *Pente du sol* (annexe numérique AN1) permettent d'apprécier le relief accentué de la région ainsi que les éléments particuliers du territoire qui façonnent, délimitent et structure la topographie (figure 3-1). Parmi les reliefs marquants on note les hautes terres des Laurentides au nord-ouest, le fleuve Saint-Laurent à la limite sud-est, le fjord du Saguenay qui divise le territoire suivant un axe NO-SE, l'astroblème de Charlevoix et plusieurs vallées fortement encaissées majoritairement orientées NO-SE.

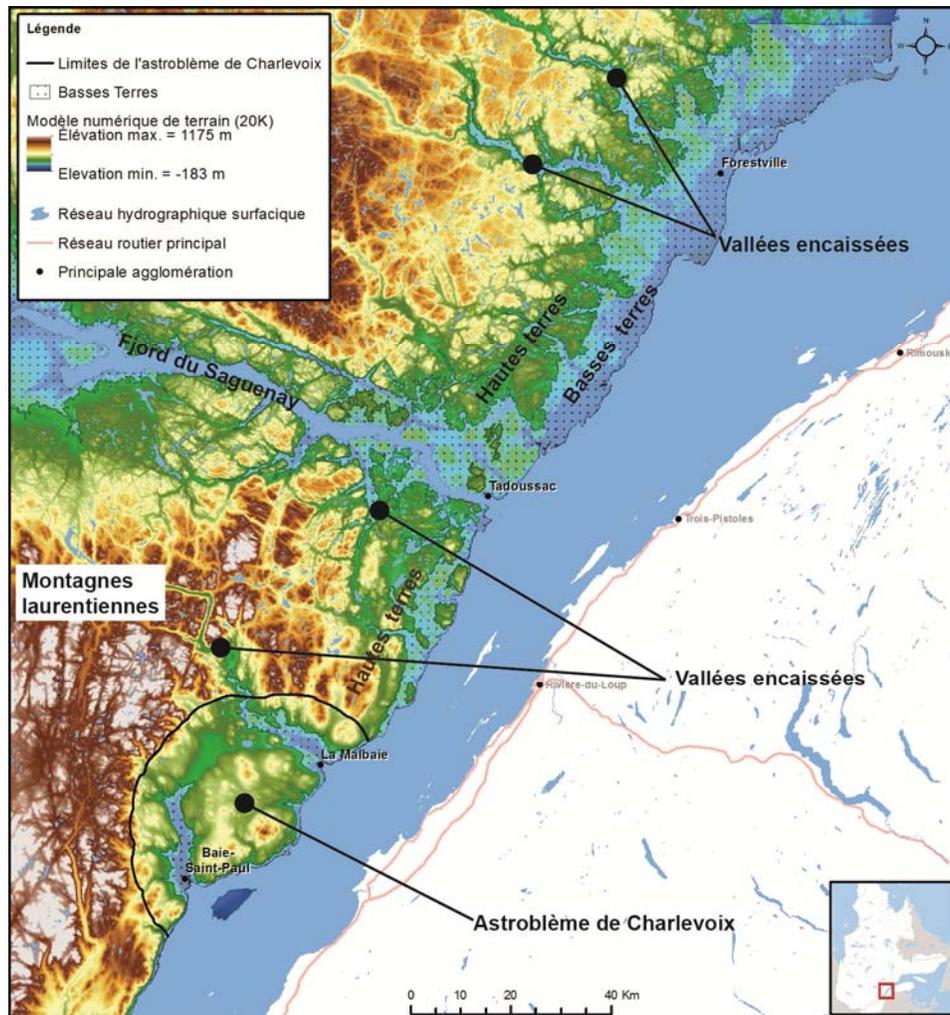


Figure 3-1 : Éléments de la topographie du territoire de Charlevoix et de la Haute-Côte-Nord.

3.1.1.1 Montagnes laurentiennes

Les montagnes laurentiennes font partie de la province géologique de Grenville. En fait, lors de l'orogénie grenvillienne (terminé il y a environ 980 Ma)¹ les montagnes constituant la chaîne des Laurentides ont pu atteindre des sommets aussi hauts que ceux de la présente chaîne himalayenne. Depuis, une très longue succession d'événements ont contribué à éroder cette chaîne de montagnes. De nos jours, le Mont Raoul Blanchard, plus haut sommet des Laurentides, culmine à 1 181 m.

Dans le cadre du projet PACES-CHCN, la partie du territoire à l'étude appartenant à ces montagnes sont nommées hautes terres.

3.1.1.2 Le fleuve Saint-Laurent

Le fleuve Saint-Laurent borde le sud de l'ensemble de la région de CHCN. Le fleuve est un vestige de l'ouverture de l'océan lapetus. Il correspond à la limite inférieure de la topographie de la région de CHCN. Le littoral est caractérisé par une suite de baies, d'anses, de battures, de terrasses marines et d'escarpements rocheux.

¹ Cf. Chapitre 4 : Portrait géologique

3.1.1.3 Le fjord du Saguenay

Le fjord du Saguenay divise la région à l'étude en deux parties suivant un axe NO-SE. Le territoire localisé au sud du fjord correspond au territoire municipalisé des MRC de Charlevoix et de Charlevoix-Est, tandis que le territoire au nord est celui de la MRC de La Haute-Côte-Nord. Le fjord du Saguenay se localise au centre du graben du Saguenay. Il débute à Saint-Fulgence et se poursuit vers l'est jusqu'au fleuve Saint-Laurent. Il a été surcreusé lors des glaciations qui ont affecté le territoire, dont la dernière celle du Wisconsin. Ce fjord est long d'une centaine de km avec des façades subverticales moyennes de 150 m pouvant atteindre plus de 400 m localement.

3.1.1.4 Astroblème de Charlevoix

Il y a environ 400 millions d'années (Buchner et al., 2012), l'impact d'une météorite a considérablement modifié la physiographie du territoire de Charlevoix. La topographie de la région est marquée par la présence du mont des Éboulements, autour duquel se déploie une dépression circulaire de plus de 50 kilomètres de diamètre (voir chapitre 4).

3.1.1.5 Vallées encaissées

Les vallées encaissées ont été façonnées lors des glaciations. Ces vallées peuvent contenir des épaisseurs importantes de dépôts (voir chapitre 4). Le fond des vallées est occupé par le lit d'un cours d'eau de surface et leurs bordures escarpées dirigent les eaux de ruissellement vers ce cours d'eau. Les rivières qui y coulent sont notamment la rivière du Gouffre, la rivière Malbaie et la rivière des Escoumins présentés à la section suivante.

3.1.2 Hydrographie et bassins versants

Le réseau hydrographique présenté sur la carte #5 – *Hydrographie* (annexe numérique AN1) est un lieu privilégié où les eaux de surface et les eaux souterraines peuvent être en lien hydraulique. Les cours d'eau de surface correspondent souvent au lieu de drainage des eaux souterraines.

L'hydrographie de la région CHCN se caractérise par un réseau dense constitué d'une multitude de lacs et de rivières distribués à l'intérieur de près de 120 bassins versants de niveau 1¹. Les bassins versants de niveau 1 ont une frontière commune avec le fleuve Saint-Laurent tel qu'illustré à la figure 3-2, ainsi toute l'eau de surface de la région afflue au fleuve. La superficie des bassins versants varie de moins d'un km² à plusieurs centaines de km² (voir la carte #6 – *Bassins versants* à l'annexe numérique AN1) :

- 71 bassins compris entre 0 et 10 km² ;
- 30 bassins compris entre 10 et 100 km² ;
- 13 bassins compris entre 100 et 1000 km².

¹ Le niveau 1 correspond aux bassins versants qui affluent directement au fleuve Saint-Laurent. Plusieurs bassins de niveau 1 se subdivisent en niveau 2 qui correspond aux sous-bassins versants constituant le bassin versant de niveau 1.



Figure 3-2 : Principaux bassins versants de niveau 1 du territoire de Charlevoix et de la Haute-Côte-Nord.

La rivière Saguenay encaissée dans le fjord du Saguenay a comme source principale le lac Saint-Jean à son extrémité nord-ouest. Elle coule en direction sud-est sur une distance d'environ 165 km jusqu'au fleuve Saint-Laurent. Sa largeur est en moyenne de 2 km et sa profondeur peut atteindre localement 275 m. Son débit moyen est de 1000 m³/s et atteint 3000 à 4000 m³/s lors des crues printanières.

Le fleuve Saint-Laurent est sans contredit l'élément commun du territoire à l'étude, il prend sa source au lac Ontario et s'écoule en direction nord-est sur une distance d'environ 1 200 km jusqu'au golfe Saint-Laurent. Son débit moyen est de l'ordre de 12 600 m³/s. La portion correspondant à l'estuaire du fleuve borde le sud-est de la région CHCN. En effet, l'estuaire du Saint-Laurent se définit par la nature saumâtre à saline de l'eau et par ses marées. Il commence à l'extrémité est du lac Saint-Pierre jusqu'à ce qu'il atteigne le golfe¹. De Petite-Rivière-Saint-François à Tadoussac, c'est le moyen estuaire qui se caractérise par de l'eau saumâtre provoqué par la présence de courants de forte intensité. En y ajoutant l'action des marées, ceci provoque une importante turbidité de l'eau observée entre l'île d'Orléans et l'Isle-aux-Coudres. De Tadoussac jusqu'à Colombier, il s'agit d'une partie de l'estuaire maritime correspondant à la partie marine du Saint-Laurent.

Les principaux cours d'eau de la région sont cités au tableau 3-1 ainsi que certaines de leurs caractéristiques, notamment la source, l'exutoire, le débit moyen et la superficie de leur bassin versant. Ces informations

¹ Site web Environnement Canada, dernière modification 2013-06-28 : <http://www.ec.gc.ca/stl/default.asp?lang=Fr&n=59C4915D-1#sec2>

proviennent de plusieurs sources dont les principales sont le Centre d'expertise hydrique du Québec et la Commission de toponymie du Québec.

Tableau 3-1 : Résumé des caractéristiques des principales rivières du territoire de CHCN.

<i>Nom rivière</i>	<i>Source principale, affluence</i>	<i>Exutoire, confluence</i>	<i>Longueur (km)</i>	<i>Débit moyen (m³/s)</i>
Fleuve Saint-Laurent	lac Ontario	Océan Atlantique	1 200	12 600
Rivière Betsiamites	Multiples	Fleuve Saint-Laurent	400	-
Rivière des Escoumins	Multiples	Fleuve Saint-Laurent	93	16
Rivière du Gouffre	Lacs du Gouffre et à Jack	Fleuve Saint-Laurent	72	22
Rivière Laval	-	Fleuve Saint-Laurent	72	13
Rivière Malbaie	lacs Tristan et Gamache	Fleuve Saint-Laurent	161	28
Rivière Noire	-	Fleuve Saint-Laurent Fleuve Saint-Laurent	17	-
Rivière Portneuf	-	Fleuve Saint-Laurent	182	52
Rivière Saguenay	Lac Saint-Jean	Fleuve Saint-Laurent	165	1 000
Rivière du Sault-au-Mouton	lac de la Petite Montagne	Fleuve Saint-Laurent	77	9
Rivière du Sault-aux-Cochons	lac Breault	Fleuve Saint-Laurent	159	40

Le territoire de CHCN compte 8 stations hydrométriques qui enregistrent le débit de certaines rivières (voir carte #27 – *Stations météorologiques, hydrométriques et de suivi de la nappe* à l'annexe numérique AN1). Le tableau 3-2 présente les rivières dont le débit est suivi à partir des stations hydrométriques ainsi que le nombre de stations pour chacune. Les données obtenues à partir des stations météorologiques et hydrométriques sont très pertinentes, notamment pour mesurer la température et les précipitations et pour estimer l'écoulement de surface. Ces résultats sont détaillés dans le chapitre 5.

Tableau 3-2 : Nombre de stations hydrométriques par rivière.

<i>Rivière</i>	<i>Nombre de stations</i>
Du Gouffre	1
Malbaie	1
Sainte-Marguerite	1
A Casette	1
Des Escoumins	3
Portneuf	1
Total	8

Le lecteur intéressé est invité à consulter les sites web des OBV Charlevoix-Montmorency (www.charlevoixmontorency.ca) et de la Haute-Côte-Nord (www.obvhautebotenord.org) pour obtenir plus d'informations sur les eaux de surface, telles que leur qualité, leur débit, les zones inondables par exemples.

3.1.3 Pédologie

La carte #11 – *Pédologie* (annexe numérique AN1) présente les sols classifiés selon l'Institut de recherche et de développement agroalimentaire (IRDA). Les données sont disponibles pour le territoire de Charlevoix, mais aucune donnée n'est disponible pour la Haute-Côte-Nord (figure 3-3). Selon la légende de l'IRDA, chaque classe de sol est divisée selon sa capacité drainante allant de très mauvais à excessif.

Les données disponibles montrent que sur le territoire allant de Petite-Rivière-Saint-François à La Malbaie, les sols sont principalement issus de dépôts de tills avec des sols argileux dans la dépression annulaire de l'astrobloème. Aussi, des sols sableux sont éparés sur le territoire et les sols sont graveleux sur les hauts reliefs.

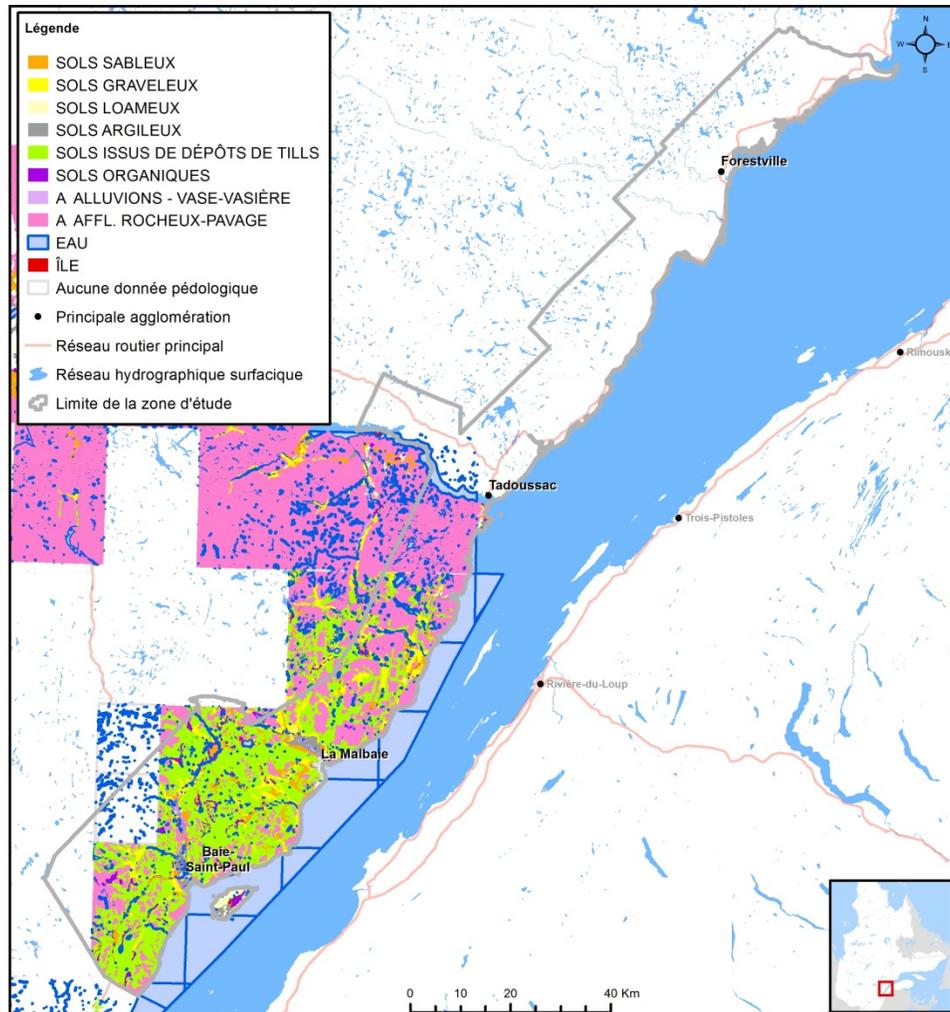


Figure 3-3 : Pédologie du territoire de Charlevoix.

3.1.4 Couverture végétale et milieux humides

La couverture végétale (figure 3-4) contrôle l'évapotranspiration, intervenant dans l'estimation du bilan hydrologique¹. De plus, les milieux humides (figure 3-4) incluent notamment les tourbières qui sont localement exploitées. Certains milieux humides sont isolés des nappes sous-jacentes par des couches imperméables tandis que d'autres se développent à cause d'un niveau de nappe très près de la surface.

¹ Cf. Chapitre 5 : Bilan hydrologique

La carte #8 – *Couverture végétale* (annexe numérique AN1) présente la diversité forestière en termes de résineux, de feuillus et de forêt mixte. Le couvert végétal n'est pas indiqué notamment pour les terres agricoles, ce qui laisse des zones non classifiées. Sur les hauts reliefs, les résineux et les forêts mixtes sont présents en majorité. Les feuillus sont concentrés dans le secteur de l'astroblème et en bordure des rivières. Les résineux sont concentrés dans la partie nord de la Haute-Côte-Nord à l'intérieur d'une bande d'environ 10 km de largeur le long du fleuve Saint-Laurent.

La carte #9 – *Milieux humides* (annexe numérique AN1) localise tous les milieux humides répertoriés par le MDDEFP (2012) sur le territoire de CHCN. Le littoral est hôte de plusieurs longues bandes de milieux humides d'environ 1 à 2 km de largeur par une vingtaine de km de longueur. D'autres milieux humides se retrouvent principalement dans les creux topographiques, soit dans la zone de dépression annulaire de l'astroblème de Charlevoix ou sur des plateaux comme on en retrouve plusieurs sur la Haute-Côte-Nord.



Figure 3-4 : Types de couvert végétal et milieux humides cartographiés sur le territoire de CHCN.

3.2 Aspect humain

Les caractéristiques du milieu humain ont un impact sur les eaux souterraines, notamment par l'exploitation de cette ressource et les dangers de contamination. La description du milieu humain inclue le territoire municipalisé et le réseau routier, les grandes affectations du territoire et l'occupation du sol.

3.2.1 Superficies et découpages administratifs

La carte #2 – Routes, limites municipales et toponymie (annexe numérique AN1) montre la localisation des 22 municipalités réparties à l'intérieur des 3 MRC (figure 3-5) présentes sur le territoire, ainsi que les accès routiers à la région. La superficie et le nombre d'habitants par municipalité sont présentés au tableau 3-3.

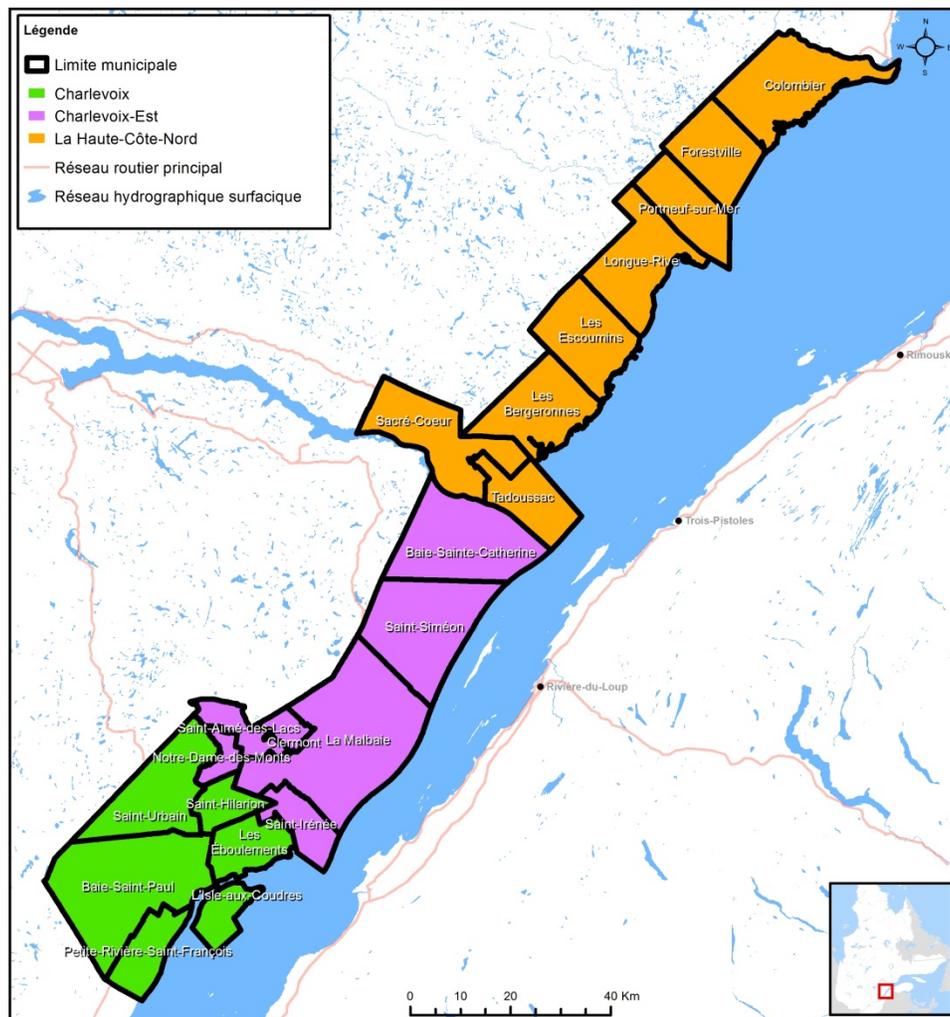


Figure 3-5 : Découpage municipal montrant les MRC et les municipalités présentes sur le territoire.

Les municipalités les plus grandes en superficie et les plus peuplées sont celles de Baie-Saint-Paul et La Malbaie, elles se localisent dans la région de Charlevoix. Sur la Haute-Côte-Nord, plusieurs municipalités présentent des territoires de superficie semblable d'environ 250 à 300 km². C'est la municipalité de Forestville dans le secteur de la Haute-Côte-Nord qui est la plus peuplée avec un peu plus de 3 500 habitants.

Tableau 3-3 : Superficie et population par territoire municipalisé.
Les données de population proviennent du recensement de la population du Canada réalisé en 2011.

<i>Nom du territoire</i>	<i>Superficie (km²)</i>	<i>Population (nombre habitants)</i>
MRC DE CHARLEVOIX	1 293,37	13 338
Baie-Saint-Paul	546,73	7 332
Les Éboulements	153,99	1 328
L'Isle-aux-Coudres	29,54	1 279
Petite-Rivière-Saint-François	135,66	744
Saint-Hilarion	99,77	1 181
Saint-Urbain	327,68	1 474
MRC DE CHARLEVOIX-EST	1 263,31	16 046
Baie-Sainte-Catherine	232,16	204
Clermont	52,99	3 118
La Malbaie	470,57	8 862
Notre-Dame-des-Monts	56,00	815
Saint-Aimé-des-Lacs	101,57	1 073
Saint-Irénée	60,29	674
Saint-Siméon	289,73	1 300
MRC DE LA HAUTE-CÔTE-NORD	2 031,16	11 546
Colombier	313,2	747
Forestville	204,73	3 270
Sacré-Coeur	341,74	1 881
Les Bergeronnes	291,89	693
Les Escoumins	267,33	2 000
Longue-Rive	295,35	1 113
Portneuf-sur-Mer	241,23	761
Tadoussac	74,59	813
Essipit	1,1	268
Total	4 587,84	40 930

3.2.2 Voies de communication

En plus des limites municipales, la carte #2 – *Routes, limites municipales et toponymie* (annexe numérique AN1) illustre le réseau routier et les autres modes d'accès au territoire de CHCN, soit la voie ferrée et les traversiers. Au total, 5 routes nationales donnent accès au territoire de CHCN (tableau 3-4). La voie ferrée longe le fleuve Saint-Laurent à partir de l'ouest de la rivière Malbaie jusqu'à Québec. Cinq traversiers sont présents sur le territoire de CHCN (tableau 3-5).

Tableau 3-4 : Routes nationales présentes sur le territoire de CHCN.

<i>Route</i>	<i>Relie</i>	<i>À</i>
138	Québec	Baie-Comeau
170	Saint-Siméon	Saguenay
172	Tadoussac	Saguenay
362	Baie-Saint-Paul	Malbaie
381	Baie-Saint-Paul	Saguenay

Tableau 3-5 : Municipalités reliées par une traverse maritime sur le territoire de CHCN.

<i>De</i>	<i>À</i>
Saint-Joseph-de-la Rive	Isle-aux-Coudres
Baie-Sainte-Catherine	Tadoussac
Rivière-du-Loup	Saint-Siméon
Les Escoumins	Trois-Pistoles
Forestville	Rimouski

3.2.3 Activités Humaines

Les activités humaines sur le territoire se développent en fonction de l'affectation du territoire et des schémas d'aménagement des MRC. En plus des activités résidentielles et commerciales, les activités industrielles, agricoles et touristiques sont importantes et elles constituent la diversité économique du territoire.

3.2.3.1 Industries

Parmi les activités industrielles, plusieurs carrières et sablières sont exploitées sur l'ensemble du territoire. L'exploitation des tourbières constituent aussi une industrie importante, particulièrement sur la Haute-Côte-Nord.

D'un point de vue environnemental, les industries qui requièrent et rejettent le plus d'eau font partie du secteur des pâtes et papiers. En respect de la *Loi sur la qualité de l'environnement du Québec*, ces industries sont assujetties au *Règlement sur les fabriques de pâtes et papiers*.

Les scieries correspondent également à une industrie importante sur le territoire de la Haute-Côte-Nord.

3.2.3.2 Agriculture

La région de Charlevoix se caractérise d'un point de vue agricole par les élevages porcins. D'autres types d'élevage sont également présents dans Charlevoix et l'industrie agro-alimentaire présente une belle vitrine de produits du terroir. De plus, en 2009, l'agneau de Charlevoix a été le premier produit du Québec à obtenir l'Indication géographique protégée (IGP) selon la *Loi sur les appellations réservées et les termes valorisants du Québec*.

Pour la Haute-Côte-Nord, l'industrie agro-alimentaire est principalement orientée vers les produits de la mer (poissons et fruits de mer). Aussi, la culture de petits fruits est en croissance.

3.2.3.3 Tourisme

Le territoire de Charlevoix et de la Haute-Côte-Nord connaissent une industrie touristique diversifiée. La période estivale représente la plus haute saison touristique autant en Charlevoix qu'en Haute-Côte-Nord. La région de Charlevoix vit également une hausse du tourisme hivernale.

3.2.4 Affectations du territoire

L'affectation du territoire (figure 3-6) correspond à des zones de territoire pour lesquelles les MRC attribuent des affectations particulières. La carte #10 – *Affectation du territoire* (annexe numérique AN1) présente les zones d'affectation du territoire à partir des classes d'aménagement établies pour chaque MRC. Ces classes d'affectation sont les suivantes : forestière, agroforestière, agricole, résidentielle et commerciale, industrielle, conservation et récréative. D'une MRC à l'autre, les classes peuvent être modifiées. Ainsi, dans ce projet, il a été choisi de regrouper 7 classes d'activité.

Dans le secteur de Charlevoix, les types d'affectation sont principalement forestière, agroforestière et agricole. Tandis que dans le secteur de la Haute-Côte-Nord, les types d'affectation sont principalement agroforestière et récréative.

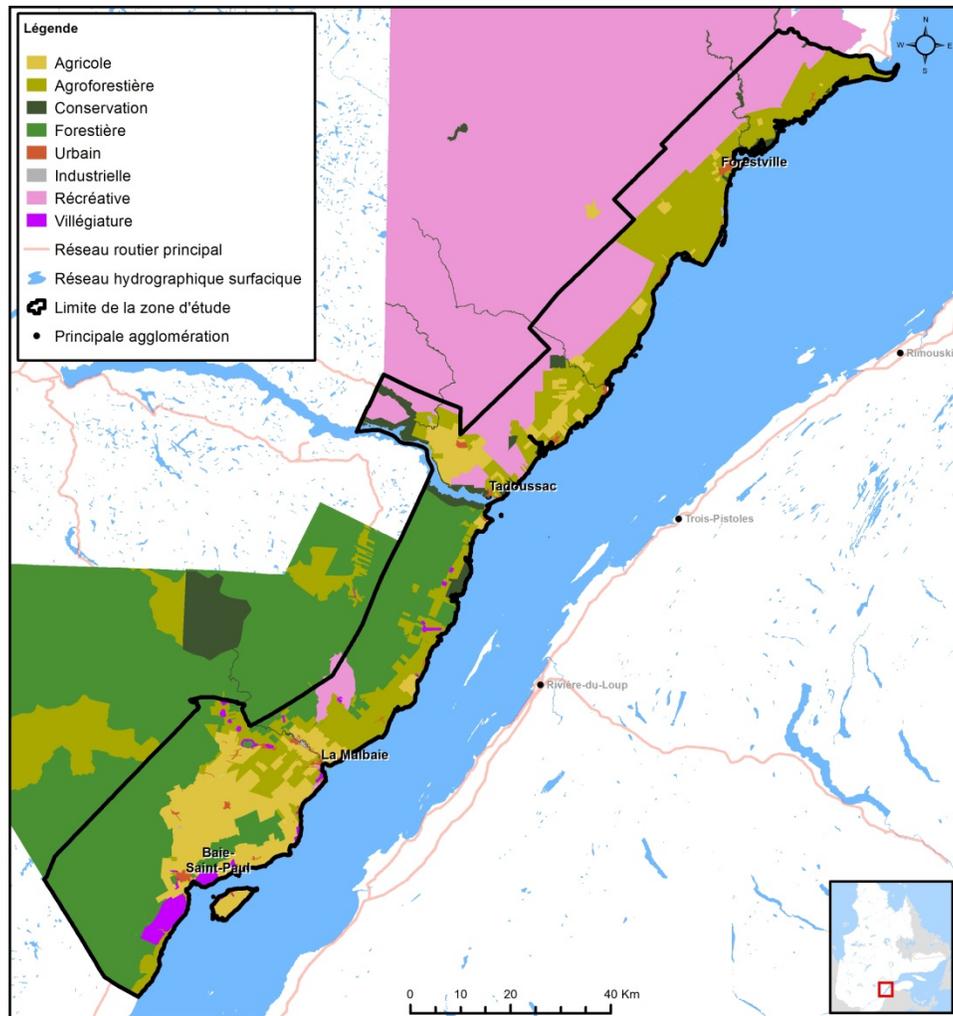


Figure 3-6 : Affectations du territoire pour le territoire de CHCN.

3.2.5 Occupation du territoire

L'occupation du sol (figure 3-7) correspond à l'usage réel du territoire. La carte #7 – *Occupation du sol* (annexe numérique AN1) présente six classes d'occupation, soit les zones urbaines, les zones agricoles, les zones forestières, les zones arbustives, les zones humides, les zones découverte et les zones pour lesquelles aucune donnée n'est disponible. Cette carte élaborée par le CERM a été construite à partir de la classification des images *Landsat*. Sur l'ensemble du territoire le sol est majoritairement occupé par la forêt et les arbustes. Le secteur de l'astrobèle de Charlevoix présente aussi une occupation agricole importante.

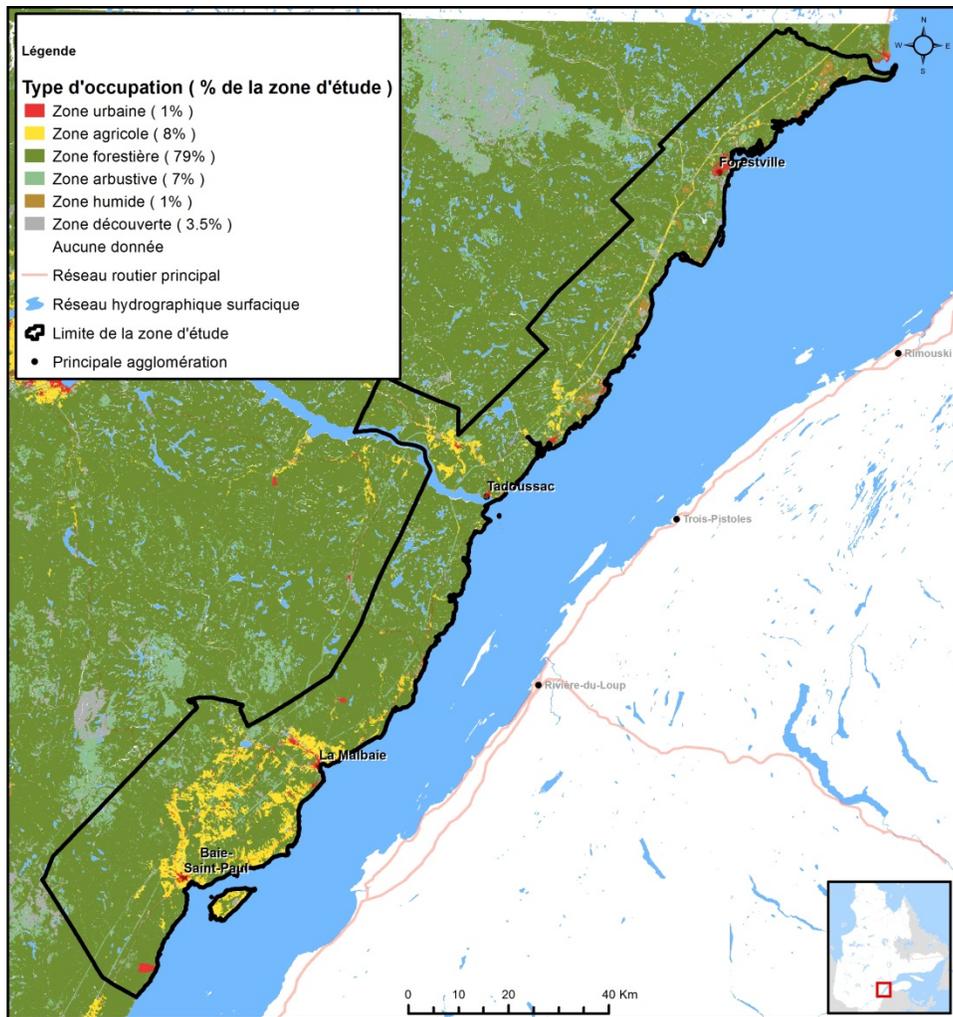


Figure 3-7 : Occupation du sol pour le territoire de CHCN.

3.2.6 Activités potentiellement polluantes

Le territoire municipalisé est l'hôte d'activités d'origine anthropique diversifiées dont certaines peuvent avoir un impact sur la qualité de l'eau souterraine. La localisation et la classification des activités selon leur niveau d'impact potentiel sur l'eau souterraine sont réalisées avec les codes d'utilisation des biens-fonds (CUBF). Pour compléter cette principale source d'information, la localisation des anciens dépotoirs a été fournie par les MRCs. Ainsi, à partir des informations disponibles, les activités jugées pertinentes (tableau 3-6) ont d'une part été identifiées et d'autre part leur impact potentiel a été pondéré suivant le protocole disponible à l'annexe numérique AN8.

Tableau 3-6 : Activités anthropiques pouvant avoir un impact sur l'eau souterraine.

<i>CUBF</i>	<i>Description</i>	<i>Nombre d'entités dans la zone d'étude</i>
Niveau d'impact TRÈS ÉLEVÉ		34
4854	Enfouissement sanitaire	5
4855	Dépotoir ou ancien dépotoir (MRC)	25
4874	Récupération et triage de métaux	4
Niveau d'impact ÉLEVÉ		25
3019	Autres industries d'impression commerciale	1
3140	Fonderie de fer	1
3399	Autres industries de la machinerie et de l'équipement industriel	1
3470	Industrie de la construction et de la réparation de navires	2
3821	Industrie d'engrais chimiques et d'engrais composés	1
3998	Industrie d'apprêtage et de teinture de fourrure	1
4311	Aéroport et aérodrome	4
4823	Transport et gestion du gaz par canalisation	1
6242	Cimetière	11
8541	Pierre de taille	2
Niveau d'impact MODÉRÉ		20 934
1000	Logement	13 304
1100	Chalet ou maison de villégiature	3 097
1211	Maison mobile	1 260
1521	Local pour les associations fraternelles	2
1522	Maison des jeunes	3
1541	Maison pour personnes retraitées non autonomes (inclut les CHSLD)	11
1543	Maison pour personnes retraitées autonomes	9
1552	Monastère	1
1553	Presbytère	6
1559	Autres maisons d'institutions religieuses	3
1590	Autres locaux de groupes	2
1600	Hôtel résidentiel	1
1890	Autres résidences provisoires	2
1911	Pourvoirie avec droits exclusifs	31
1912	Pourvoirie sans droits exclusifs	30
1913	Camp de chasse et pêche	103
1914	Camp forestier	135
1990	Autres immeubles résidentiels	628
2713	Industrie de produits de scierie et d'ateliers de rabotage	15
2793	Industrie de panneaux de particules et de fibres	1
2799	Autres industries du bois	3
2913	Industrie du papier journal	1
2919	Autres industries du papier	1
3252	Industrie de fils et de câbles métalliques	1

CUBF	Description	Nombre d'entités dans la zone d'étude
4849	Autres systèmes d'égouts	1
5531	Station-service avec réparation de véhicules automobiles	25
5533	Station libre-service ou avec service et dépanneur sans réparation de véhicules automobiles	17
5593	Vente au détail de pièces de véhicules automobiles et d'accessoires usagés	4
6413	Service de débosselage et de peinture d'automobiles	9
6415	Service de remplacement de pièces et d'accessoires d'automobiles	1
7412	Terrain de golf (avec chalet et autres aménagements sportifs)	4
8120	Ferme (les céréales sont la récolte prédominante)	3
8142	Ferme (d'autres fruits sont la récolte prédominante)	6
8144	Ferme (d'autres légumes sont la récolte prédominante)	2
8150	Ferme (produits laitiers prédominants à plus de 50 %)	48
8161	Ferme et ranch (animaux de boucherie à plus de 50 %)	27
8162	Ferme et ranch (porcs à plus de 50 %)	36
8163	Ferme et ranch (moutons à plus de 50 %)	3
8165	Ferme et ranch (chevaux à plus de 50 %)	14
8170	Ferme (la volaille prédominante à plus de 50 %)	21
8180	Ferme en général (aucune prédominance)	352
8191	Terrain de pâture et de pacage (non intégré à une ferme ou à un ranch appartenant en général au domaine public)	70
8192	Serre, spécialité de la floriculture (semence de fleurs)	2
8199	Autres activités agricoles et connexes	704
8311	Production du bois (bois de pulpe)	1
8312	Production du bois (bois de sciage prédominant)	1
8317	Produit du bois et des arbres (usage mixte)	888
8319	Autres productions forestières et services connexes	21
8321	Pépinière sans centre de recherche	3
8329	Autres services forestiers	9
8331	Production de tourbe	4
8390	Autres activités forestières et services connexes	8
Niveau d'impact FAIBLE		172
2081	Industrie de confiseries chocolatées	1
2093	Industrie de la bière	1
3630	Industrie de produits en pierre	1
3649	Autres industries de produits en béton	1
3650	Industrie du béton préparé	2
3662	Industrie de produits en verre (sauf les contenants en verre)	2
4811	Centrale hydraulique ou hydroélectrique	1
4812	Éolienne	3
4819	Autres activités de production d'énergie	6
4841	Usine de traitement des eaux usées	7
4879	Autres activités de récupération et de triage	2

CUBF	Description	Nombre d'entités dans la zone d'étude
5811	Restaurant et établissement avec service complet (sans terrasse)	58
5812	Restaurant et établissement avec service complet (avec terrasse)	30
6411	Service de réparation d'automobiles (garage)	33
8193	Rucher	1
8194	Ferme (produits de l'érable à plus de 50 %)	11
8421	Pisciculture	2
8429	Autres services d'élevage du poisson	3
8543	Extraction du sable et du gravier	7
TOTAL		21 165

La pondération de l'impact potentiel est effectuée à partir de l'équation suivante :

$$IP = (TC + QC + ZIA) * RRC$$

Où

- IP* : Impact potentiel
- TC* : Toxicité des contaminants
- QC* : Quantité de contaminants
- ZIA* : Zone d'impact de l'activité
- RRC* : Réurrence des rejets de contaminants

Les quatre paramètres de l'équation précédente sont évalués de manière qualitative (voir protocole, AN8) et une cote est attribuée à chaque paramètre. Ainsi, l'impact potentiel présente une cote variant entre 4 et 48. Le tableau 3-7 identifie les niveaux d'impact qualitatif attribués à l'activité à partir du niveau d'impact quantitatif. Pour augmenter l'écart entre les niveaux d'impact (faible modéré, élevé et très élevé), un facteur 10 a été ajouté entre chaque niveau. Ainsi, une activité isolée classifiée comme ayant un impact potentiel très élevé sera visible sur la carte de densité puisqu'elle aura un poids mille fois plus élevé qu'une activité ayant un faible impact sur l'eau souterraine. Cette astuce évite que la carte de densité soit simplement une carte de densité des activités sans considérer leur impact potentiel sur l'eau souterraine. Les niveaux d'impact quantitatif sont donc redistribués de façon linéaire entre les nouvelles bornes. Ces nouvelles valeurs sont celles utilisées comme poids dans le calcul de la densité des activités.

Tableau 3-7 : Niveaux d'impact qualitatif attribués à l'activité à partir de la cote d'impact potentiel.

Cote d'impact potentiel	Niveau d'impact potentiel	Poids attribué par niveau d'impact potentiel pour le calcul de la densité des activités
4-14	Faible	[0 – 10 [
15-17	Modéré	[10 – 100 [
18-29	Élevé	[100 – 1000 [
30-48	Très élevé	[1000 – 10 000 [

À partir de la localisation des activités combinée avec le poids attribué à chacun des niveaux d'impact potentiel, un calcul de densité des impacts potentiels des activités anthropiques est réalisé (figure 3-8). Les zones affichants les densités pondérées les plus élevées sont les zones urbaines. Plus précisément, ce sont celles situées à proximité des centres-villes, d'un site d'enfouissement ou d'un ancien dépotoir qui affichent la plus forte densité pondérée.

En plus de la densité des impacts potentiels des activités anthropiques, la carte #23 – *Activités potentiellement polluantes pour l'eau souterraine* (annexe numérique AN1) localise aussi les sites contaminés du Répertoire des terrains contaminés du MDDELCC¹ et les zones agricoles provenant de la carte #7 – *Occupation du sol* (annexe numérique AN1).

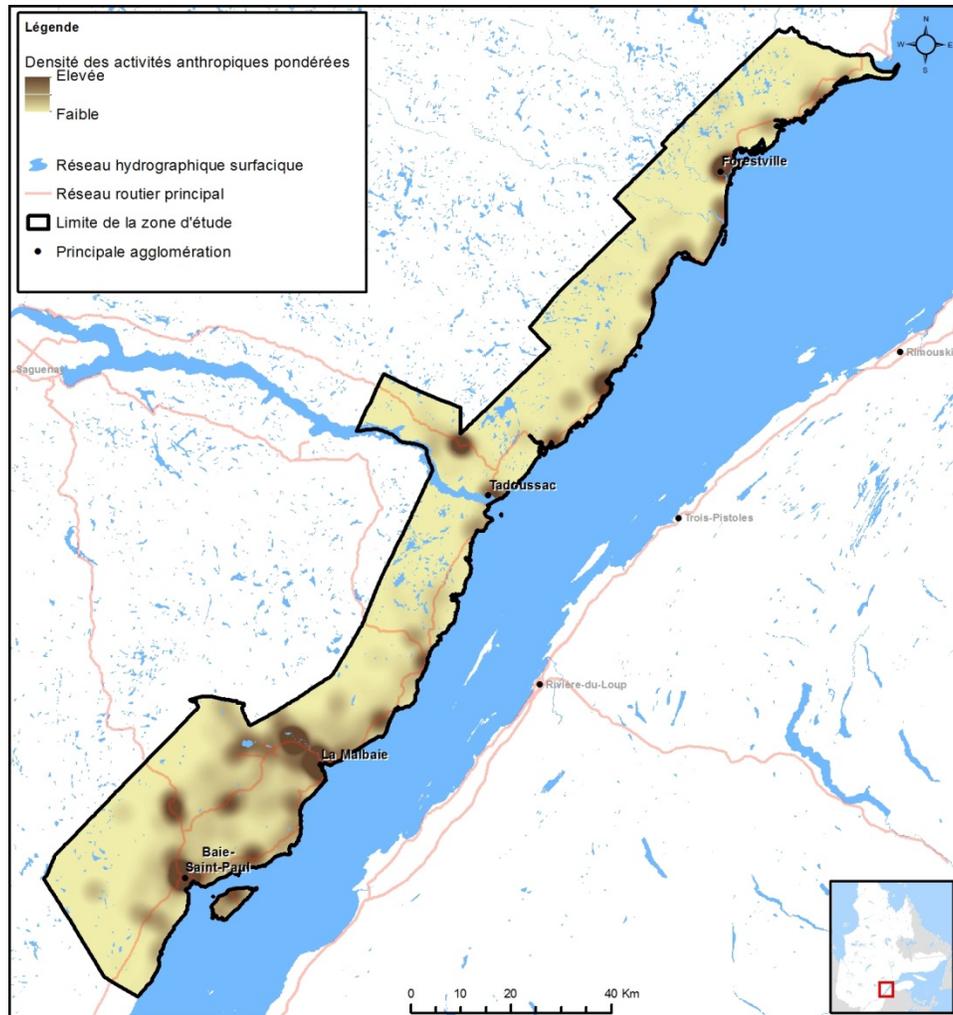


Figure 3-8 : Densité des impacts potentiels des activités anthropiques.

Il est important de mentionner que la carte #23 – *Activités potentiellement polluantes pour l'eau souterraine* (annexe numérique AN1) présente le niveau d'impact potentiel des activités sur l'eau souterraine et non le niveau de risque. En effet, la notion de risque apparaît lorsqu'une activité est située dans une zone où l'aquifère est vulnérable. Or, une activité peut avoir un impact potentiel élevé sur l'eau souterraine, mais présenter un faible risque si elle ne se situe pas dans une zone vulnérable.

¹ www.mddelcc.gouv.qc.ca/sol/terrains/terrains-contamines/recherche.asp

4 PORTRAIT GÉOLOGIQUE

La caractérisation des eaux souterraines et des aquifères régionaux nécessite de bonnes connaissances géologiques, autant sur la géologie du roc et ses systèmes de fracturation que sur la géologie des dépôts meubles incluant l'architecture des dépôts et leur étendue. Les formations géologiques perméables constituent des réservoirs pour l'eau souterraine tandis que celles faiblement perméables peuvent constituer un obstacle à l'écoulement de contaminants de surface et ainsi protéger la qualité de l'eau souterraine contenue dans des réservoirs sous-jacents.

La géologie du territoire de Charlevoix et de la Haute-Côte-Nord (CHCN) se caractérise d'une part par les formations rocheuses et d'autre part par une couverture de dépôts meubles de natures variées mais surtout d'origine quaternaire. Les formations rocheuses du territoire à l'étude appartiennent majoritairement à la Province de Grenville, seules les formations géologiques de l'Isle-aux-Coudres appartiennent à la Province des Appalaches. Des lambeaux de roches ordoviciennes sont également préservés, principalement dans la dépression annulaire de l'astrolème de Charlevoix. Le roc affleure localement, mais est généralement recouvert de sédiments d'origine quaternaire.

Ce chapitre présente plus en détail la géologie du roc pour des MRCs de Charlevoix, de Charlevoix-Est et de La Haute-Côte-Nord incluant de brèves descriptions lithologiques et structurales (section 4.1). Les résultats géologiques de travaux d'analyse de linéaments topographiques et de révision de la carte géologique, et des observations de l'intensité de la fracturation et des structures d'impacts liées à l'astrolème de Charlevoix sont présentés à la section 4.2. Les principaux types de dépôts de surface cartographiés sur le territoire sont décrits à la section 4.3. Les résultats des travaux d'investigation stratigraphiques sont présentés à la section 4.4, suivis des coupes stratigraphiques à la section 4.5 et de l'épaisseur des dépôts et topographie du roc, section 4.6.

4.1 Géologie du socle rocheux

Le territoire de CHCN se caractérise par la présence de trois provinces géologiques. La Province de Grenville s'étend sur l'ensemble du territoire CHCN situé au nord-est du fleuve Saint-Laurent. Il est localement recouvert de roches sédimentaires de la Plate-Forme du Saint-Laurent principalement dans des vallées et à proximité du Saint-Laurent. Les unités lithologiques de l'Isle-aux-Coudres appartiennent plutôt à la Province des Appalaches (figure 4-1).

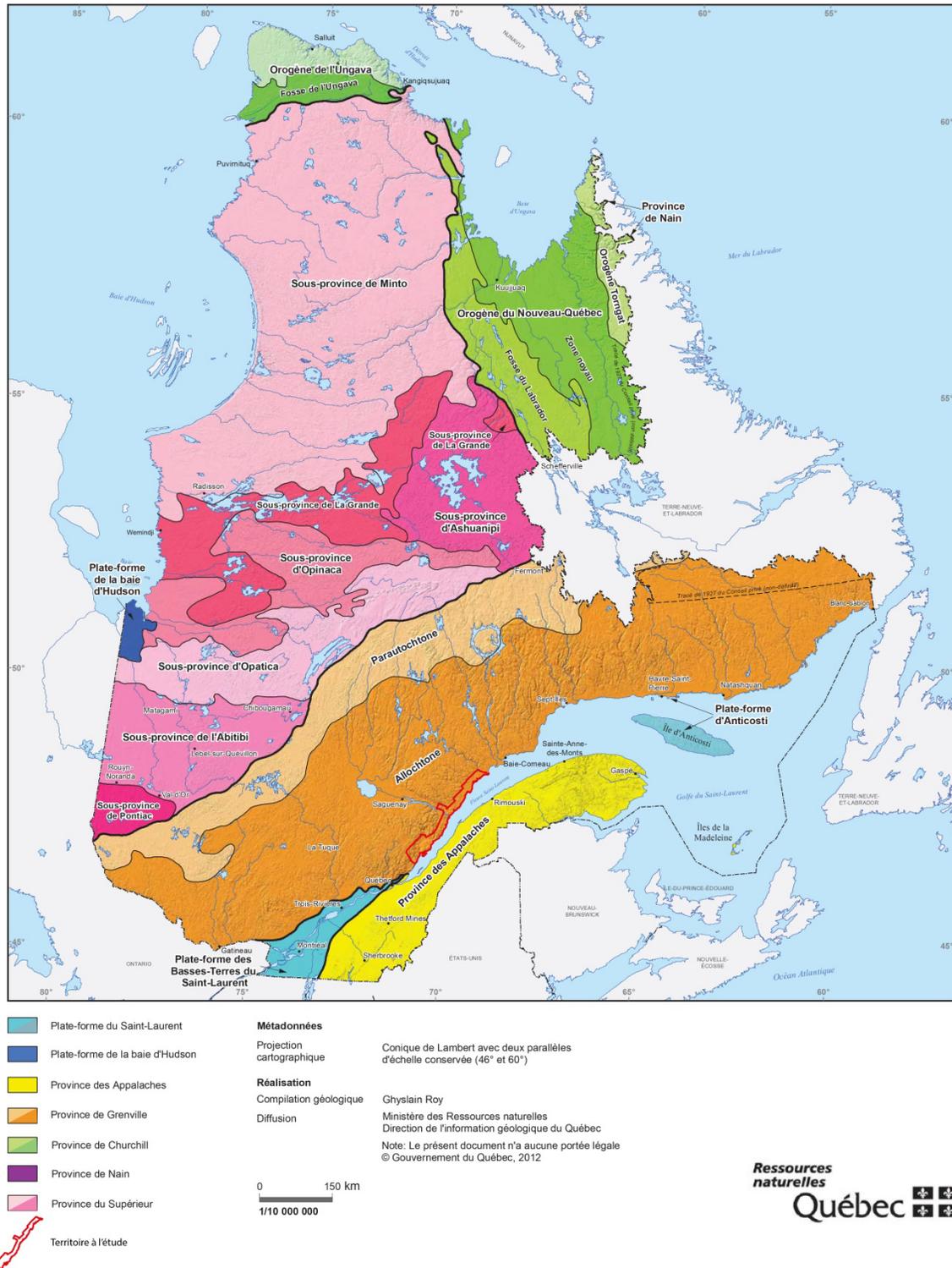


Figure 4-1 : Localisation du territoire à l'étude situé dans les provinces de Grenville et des Appalaches et sur une partie de la Plate-Forme du Saint-Laurent.

4.1.1 Province de Grenville

La Province de Grenville est la dernière province précambrienne à s'être ajoutée au craton nord-américain lors de l'orogénèse grenvillienne (environ 1 050 – 1 000 Ma; Hocq, 1994). Elle est orientée NE-SW et s'étend sur plus de 2 000 km du sud du Labrador à l'est des Grands Lacs. D'une largeur d'environ 400 km sur le territoire québécois, elle est limitée au nord par la Province de Supérieur et le Front de Grenville, et au sud par la Plate-Forme du Saint-Laurent et les Appalaches.

D'après la classification de Rivers et al. (1989), le territoire CHCN se situe à l'intérieur de l'allochtone polycyclique (figure 4-2) caractérisé par des terrains ayant subi plus d'un cycle orogénique et qui sont divisés par des failles ductiles. En effet, les roches en place montrent des caractéristiques structurales et minéralogiques associées à un métamorphisme intense lors de l'orogénie grenvillienne (Rivers et al., 1989; Hocq, 1994).

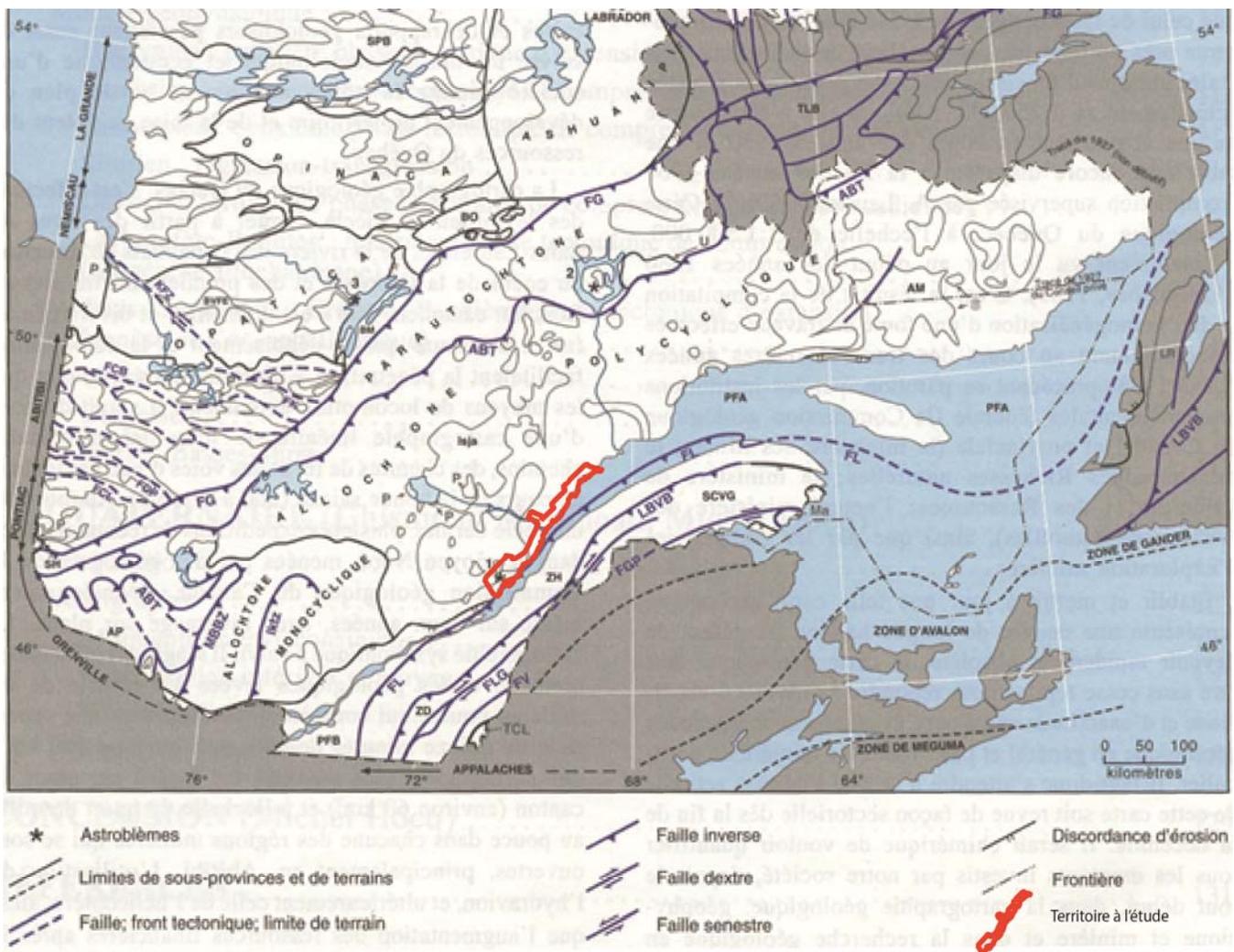


Figure 4-2 : Le territoire de Charlevoix et de la Haute-Côte-Nord qui se localise dans le Grenville, correspond selon Rivers et al. (1989) à l'allochtone polycyclique (tiré de Hocq, 1994).

La carte géologique à l'échelle 1 : 250 000 (figure 4-3) provient de l'intégration des données extraites du Système d'information géomineière du Québec (SIGÉOM). Les lithologies présentes sur le territoire de Charlevoix correspondent principalement à des gneiss divers, des granites et pegmatites, le complexe anorthositique de

Saint-Urbain, migmatites, des quartzites et schistes. Le territoire de la Haute-Côte-Nord se caractérise principalement par des migmatiques, des gneiss divers, des granites et pegmatites et des quartzites et schistes.

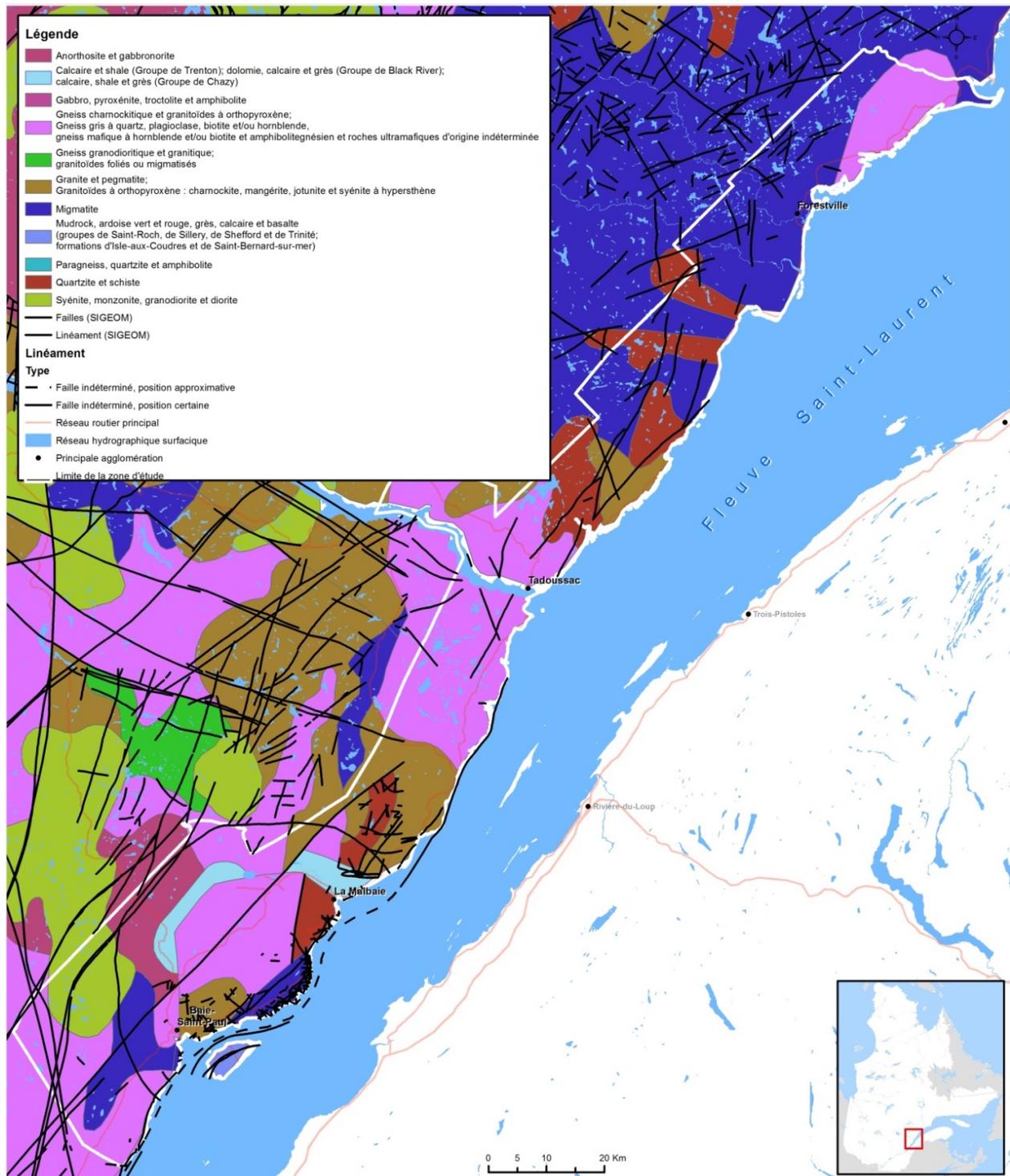


Figure 4-3 : Carte géologique présentant l'information géologique disponible à l'échelle 1 : 250 000 dans le SIGEOM (2012).

4.1.2 Plate-Forme-du-Saint-Laurent

Dans le secteur l'astroblème de Charlevoix, des lambeaux de roches sédimentaires ordoviciennes de la plate-forme du Saint-Laurent recouvrent en discordance les roches précambriennes. Ces lambeaux sont observés notamment dans la dépression annulaire de l'astroblème ainsi que le long de la côte nord du fleuve Saint-Laurent entre Baie-Saint-Paul et La Malbaie (figure 4-3).

La séquence stratigraphique décrite à la figure 4-4 (Rondot, 1972; Bussièrès et al., 1977; Lemieux et al., 2000 et 2003) se caractérise à la base par des roches sédimentaires d'origine détritique, au centre par les roches ordoviciennes du Groupe de Trenton et au sommet par des roches sédimentaires d'origine détritique.

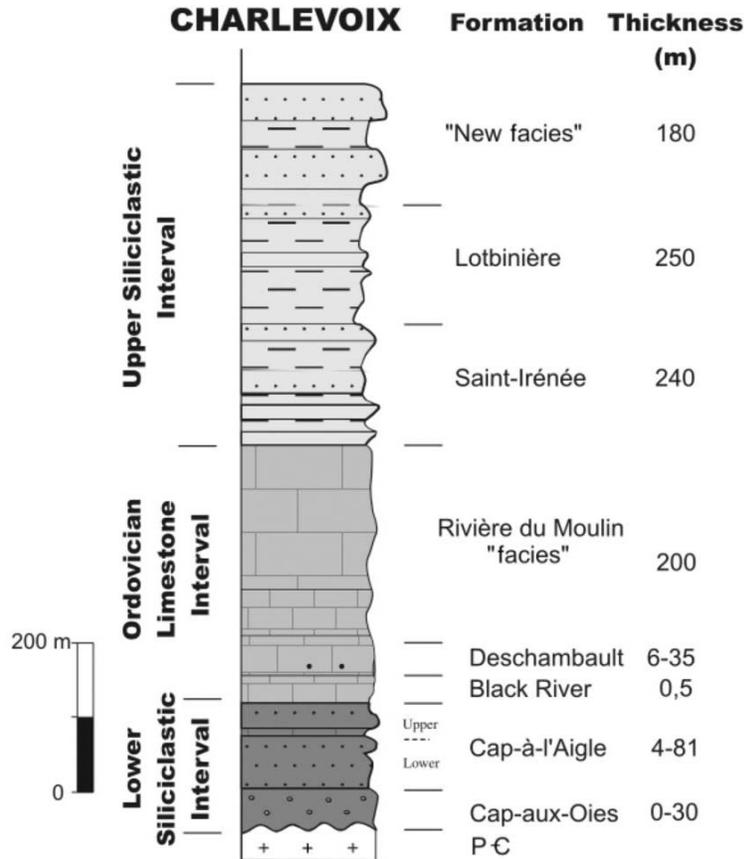


Figure 4-4 : Séquence stratigraphique correspondant à la séquence ordovicienne observée dans la région de Charlevoix (tiré de Lemieux et al., 2003).

Les roches sédimentaires détritiques observées à la base de la séquence stratigraphique appartiennent aux formations de Cap-aux-Oies et de Cap-à-l'Aigle. La première correspond à des quartzites d'origine sédimentaire tandis que la seconde a une composition arkosique à la base et calcareuse à gréseuse au sommet.

Ces formations sont surmontées par des bancs de calcaires du Groupe de Trenton, notamment la Formation de Deschambault constituée de roches sédimentaires à grains grossiers fossilifères, et le faciès de Rivière-du-Moulin identifié par Belt et al. (1979).

Les unités du Groupe de Trenton sont recouvertes par la Formation de Saint-Irénée composée de roches silicoclastiques interlitées de mudstone calcareux. La présence de plis est observée au voisinage de surface de décollement correspondant à des failles. Ces failles se caractérisent par des textures bréchiques et

cataclastiques. Cette unité est recouverte par la Formation de Lotbinière constituée de lits décimétriques de grès massifs à grains grossiers en alternance avec des lits de grès laminés (Lemieux et al., 2000). Finalement, cette séquence se complète en son sommet par le « Nouveau » faciès identifié par Belt et al. (1979) correspondant à une alternance de lits de grès et de shale.

4.1.3 Province des Appalaches

L'Isle-aux-Coudres est la seule partie du territoire à l'étude appartenant à la Province des Appalaches, principalement constituée de roches sédimentaires et volcaniques paléozoïques. La Province des Appalaches est limitée au nord par la faille Logan. Cette faille passe au nord de l'Isle-aux-Coudres sous le fleuve Saint-Laurent (figure 4-3).

Les roches cartographiées à l'Isle-aux-Coudres appartiennent à la phase taconique des Appalaches. L'Isle-aux-Coudres est constituée de deux formations géologiques distinctes divisées par une faille de chevauchement orientée nord-est – sud-ouest (Rondot, 1969). Au nord-ouest la Formation de Saint-Bernard-sur-Mer correspond à des microgrès homogènes gris vert et rouges. Tandis qu'au sud-est, la Formation d'Isle-aux-Coudres se constitue de séquences de flysch dont les lits microgréseux sont localement conglomératiques.

4.1.4 Évènements géologiques et structures

Plusieurs événements géologiques ont contribué à la formation de failles et de fractures ainsi qu'à leur réactivation. La mise en place des unités géologiques constituant la Province de Grenville est complexe, tel que décrit par Rivers et al. (1989) certaines unités sont antérieures à l'orogénie grenvillienne (Parautochtone) et d'autres ont pu subir un seul (allochtone monocyclique) ou plusieurs cycles orogéniques (allochtone polycyclique). Ces terrains sont séparés par des failles ductiles (Rivers et al., 1989). Le territoire de Charlevoix et de la Haute-Côte-Nord correspond à l'allochtone polycyclique pour lequel les roches ont été formées au cours de cycles orogéniques antérieurs au cycle grenvillien (≈ 1000 Ma) et métamorphosées lors de ce dernier. Dans le secteur Charlevoix ce sont majoritairement des gneiss charnockitiques qui sont observés et dans le secteur de la Haute-Côte-Nord des migmatites (Hocq, 1994). Des intrusions anorthositiques et charnockitiques sont également présentes, les intrusions anorthositiques étant plus anciennes selon leur chronologie relative (Hocq, 1994). Selon leur âge de cristallisation et leur position lors de l'orogénèse grenvillienne, ces suites intrusives ont conséquemment été déformées et métamorphosées. Suite à l'orogénèse grenvillienne, les principaux événements géologiques ayant contribué à la formation de failles et de fractures ou à leur réactivation sont les suivants :

- ≈ 570 Ma : l'ouverture de l'océan Iapetus a favorisé la formation de failles normales, notamment la Faille du Saint-Laurent (figure 4-5) qui affleure le long de la côte nord du fleuve Saint-Laurent (Tremblay et Lemieux, 2001) dans le secteur de Sault-au-Cochon, au sud-ouest de la région à l'étude. Plus au nord-est elle passe dans les terres (Les Éboulements et Saint-Irénée) avant de longer à nouveau la rive nord du fleuve;
- ≈ 420 Ma : la fermeture de l'océan Iapetus a occasionné la collision entre la phase taconienne des Appalaches et le continent par une faille de chevauchement, la faille Logan (figure 4-5), qui, sur le territoire de CHCN passe dans le fleuve Saint-Laurent. Ceci a contribué à réactiver les failles normales anciennes et à favoriser la formation de failles inverses;
- ≈ 400 Ma (Buchner et al., 2012) : la chute d'une météorite modifiant ainsi le relief (Rondot, 1968) et connu aujourd'hui comme l'astroblème de Charlevoix. L'impact météoritique a réactivé la majorité des failles et fractures formées lors des précédents événements tectoniques (Lemieux et al., 2003). Certaines structures sont associées à cet impact notamment des cônes d'impact et des brèches de myololithénite. Ces structures sont davantage décrites à la section suivante;
- ≈ 180 Ma : l'ouverture de l'océan Atlantique qui a réactivé des failles anciennes liées au rift du Saint-Laurent (Lemieux et al., 2003) dont la faille du Saint-Laurent, du graben du Saguenay et de l'impact de Charlevoix (Roy et al., 1993).

La région de Charlevoix est reconnue pour avoir une activité sismique intraplaque importante (annexe numérique AN10). La complexité de l'histoire géologique (ouverture océanique, fermeture océanique, faille du Saint-Laurent et faille Logan, impact météoritique) subie par la région de Charlevoix, contribue à en expliquer l'importante activité sismique.



Figure 4-5 : Localisation de la Faille du Saint-Laurent et de la Faille Logan. Seul le territoire de Charlevoix est illustré puisque ces failles ne se prolongent pas sur le territoire de la Haute-Côte-Nord.

4.1.5 Particularités géologiques associées à l'astrolème de Charlevoix

C'est Rondot (1968) qui a identifié la structure d'impact météoritique de Charlevoix à partir de la morphologie circulaire de 54 km typique d'un astrolème, de l'observation de cônes d'impact (*shatter cones*), l'identification de pseudotachylite et de mylolsthénite (Rondot, 1989b) ou brèche polygénique (Lemieux et al., 2003).

Les étapes de formation de l'astrolème de Charlevoix de l'impact météoritique aux phases d'érosion subséquentes sont présentées de façon détaillée par Denis W. Roy dans un document nommé « L'astrolème de Charlevoix » à l'annexe numérique AN10.

4.1.5.1 Topographie

La topographie de l'astroblème (figure 4-6) est caractérisée par une série de domaines annulaires qui correspondent, de la bordure extérieure vers le centre de l'astroblème, à :

- la dépression annulaire dont la partie ouest correspond à la vallée de la rivière du Gouffre et la partie est à celle de la rivière Malbaie;
- un plateau interne garni de collines;
- la remontée centrale correspond à des vallées développées vis-à-vis les failles qui séparent le plateau interne de la remontée centrale. Cette remontée centrale est marquée du pic central qui correspond au point topographique culminant de l'astroblème, le Mont des Éboulements.

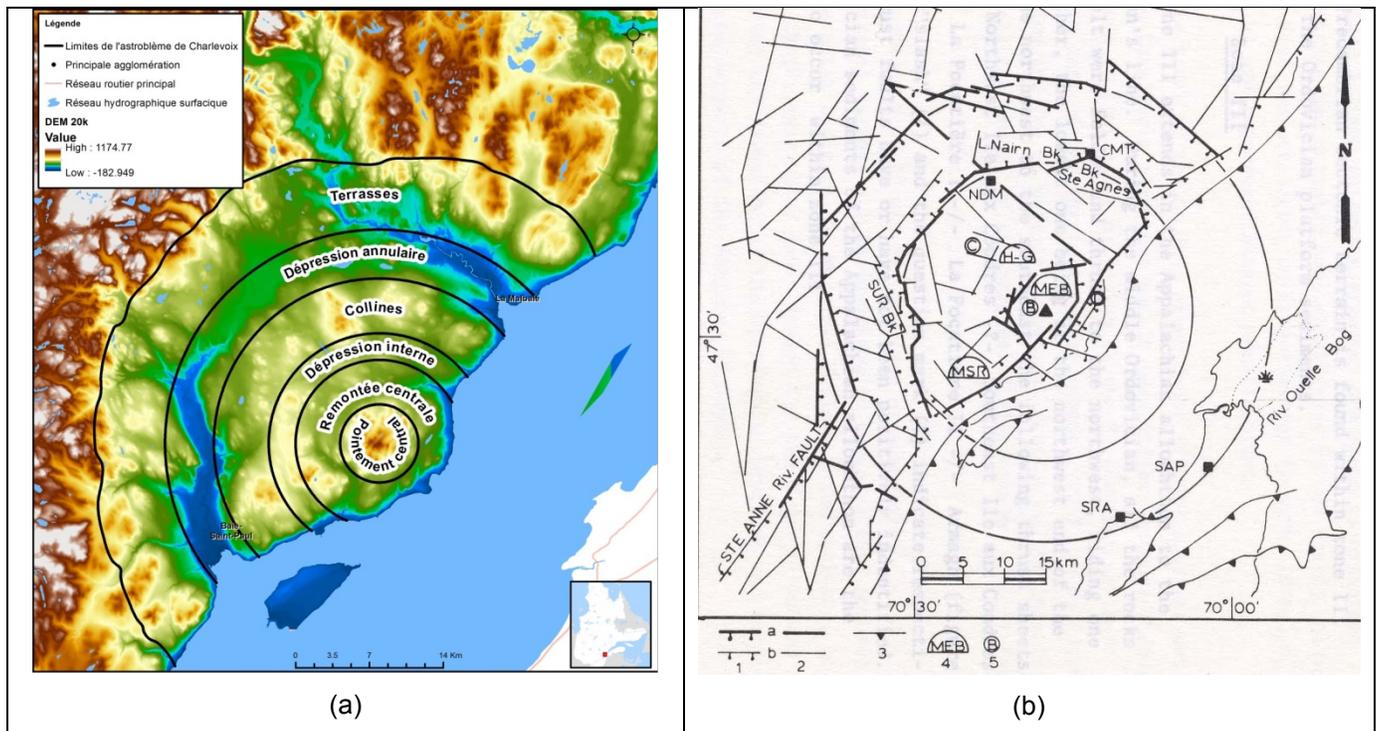


Figure 4-6 : a) Topographie et domaines annulaires caractérisant l'astroblème de Charlevoix, les limites des domaines sont schématisées par des lignes courbes. b) Figure tirée de la thèse de D.W. Roy (1979) montrant a) les limites de l'astroblème de Charlevoix en trait gras, b) les autres fractures en trait régulier, 1) les failles normales, 2) les fractures, 3) les failles inverses.

4.1.5.2 Textures et brèches

Parmi les textures typiques des astroblèmes, des cônes d'impact (*shatter cones*) ont été identifiés par Rondot (1968) dans des roches cristallines ainsi que dans les roches ordoviciennes du secteur de Cap-aux-Oies. D'autres manifestations d'impact ont été reconnues par Rondot (1968) tels que des pseudotachylites, diverses brèches et deux affleurements d'impactites.

Des dykes observés dans des roches fracturées et dont la largeur est centimétrique à décimétrique montrent une texture bréchique. La matrice est aphanitique et de couleur rougeâtre, verdâtre ou grise, et elle contient des débris rocheux ou cristallins. Rondot (1989b) nomme ces dykes des mylolisthénites tandis que Lemieux et al. (2003) les désignent comme étant des brèches polygéniques qui correspondent aux seuls types de brèches clairement associés à l'impact.

Outre les éléments particuliers caractéristiques des impacts météoritiques décrits précédemment, l'impact météoritique de Charlevoix ne semble pas avoir généré de nouvelles failles et fractures (Carignan et al., 1997; Tremblay et al., 2003; Lemieux et al., 2003). En effet, le réajustement de la lithosphère suite à cet impact aurait utilisé les failles et fractures existantes tel que mentionné à la section 4.1.4.

4.2 Complément d'informations géologiques obtenues par le PACES

Cette section présente des travaux réalisés dans le cadre du projet PACES-CHCN qui ont bonifié les connaissances géologiques du territoire. Notamment, une analyse de linéaments topographiques a été réalisée pour laquelle des linéaments majeurs et mineurs ont été identifiés (section 4.2.1). De plus, la carte géologique a été révisée (section 4.2.2). On y a interprété la position des failles ductiles et on y a précisé les limites des roches ordoviciennes à partir de l'information stratigraphique provenant de l'interprétation des coupes stratigraphiques. Des travaux de terrain dédiés à l'observation de la fracturation ont été également effectués lors des levés 2013 et 2014 dans le secteur de l'astrolème de Charlevoix. Ces travaux ont conduit à l'attribution d'une cote subjective d'appréciation de l'intensité de la fracturation pour chaque affleurement visité (section 4.2.3) et à l'observation de phénomènes reliés à l'impact météoritique tels des cônes d'impact, des pseudotachylites et des brèches polygéniques (section 4.2.4).

4.2.1 Analyse de linéaments topographiques

Une interprétation des linéaments topographiques a été réalisée dans le cadre du projet PACES-CHCN afin, d'une part, d'améliorer la carte géologique et, d'autre part, de porter un jugement d'ensemble sur le degré de fracturation dans le secteur étudié. Cette interprétation a été réalisée à partir du modèle numérique d'altitude (MNA) avec relief ombragé d'échelle 1 : 20 000 du MERN. Ces structures sont présentées sur la carte #13 – *Géologie du roc* (annexe numérique AN1) et sur la figure 4-7. Deux principaux types de linéaments topographiques ont été identifiés :

- 1) les linéaments rectilignes qui correspondent à des dépressions ou des ruptures dans la continuité de la surface topographique;
- 2) les linéaments liés au grain structural des unités lithologiques et qui sont plus irréguliers et courbés.

Les linéaments topographiques rectilignes sont divisés en deux classes : 1) majeurs et 2) mineurs. Différentes vues ont permis de faire une interprétation d'abord des linéaments majeurs soit ceux qui ont une extension régionale moyenne entre 20 et 50 km et qui sont visibles à l'échelle 1 : 250 000 et des linéaments topographiques dits mineurs ayant des longueurs moyennes entre 5 et 20 km et qui ont été interprétés à partir d'une vue à l'échelle 1 : 50 000. Parmi cette classe, seuls ceux jugés significatifs ont été intégrés mais une étude plus détaillée permettrait d'en faire ressortir beaucoup plus. Ces linéaments peuvent correspondre dans certains cas à des failles fragiles ou plus simplement à des zones de fracturation plus intense.

Le grain lithologique et structural correspond aux expressions topographiques générées par les résistances contrastées des différentes unités lithologiques. Ce grain est donc produit par l'alternance d'unités de compositions différentes ainsi que par la présence d'une foliation minérale parallèle aux contacts lithologiques et qui devient dans certains cas fortement développée. Le grain structural est particulièrement visible sur les parties du territoire dominées par un socle rocheux affleurant. Les images satellitaires présentes dans *Google Earth* et, dans certains cas, les orthophotographies aériennes ont permis de raffiner l'interprétation de ce rubanement. Les trajectoires du grain structural ont ainsi permis de corriger la carte géologique en ajustant les contacts entre les principales unités. Mais le rubanement a surtout permis de délimiter la présence de couloirs de déformation ductile associés à des zones de cisaillement ou failles ductiles régionales.

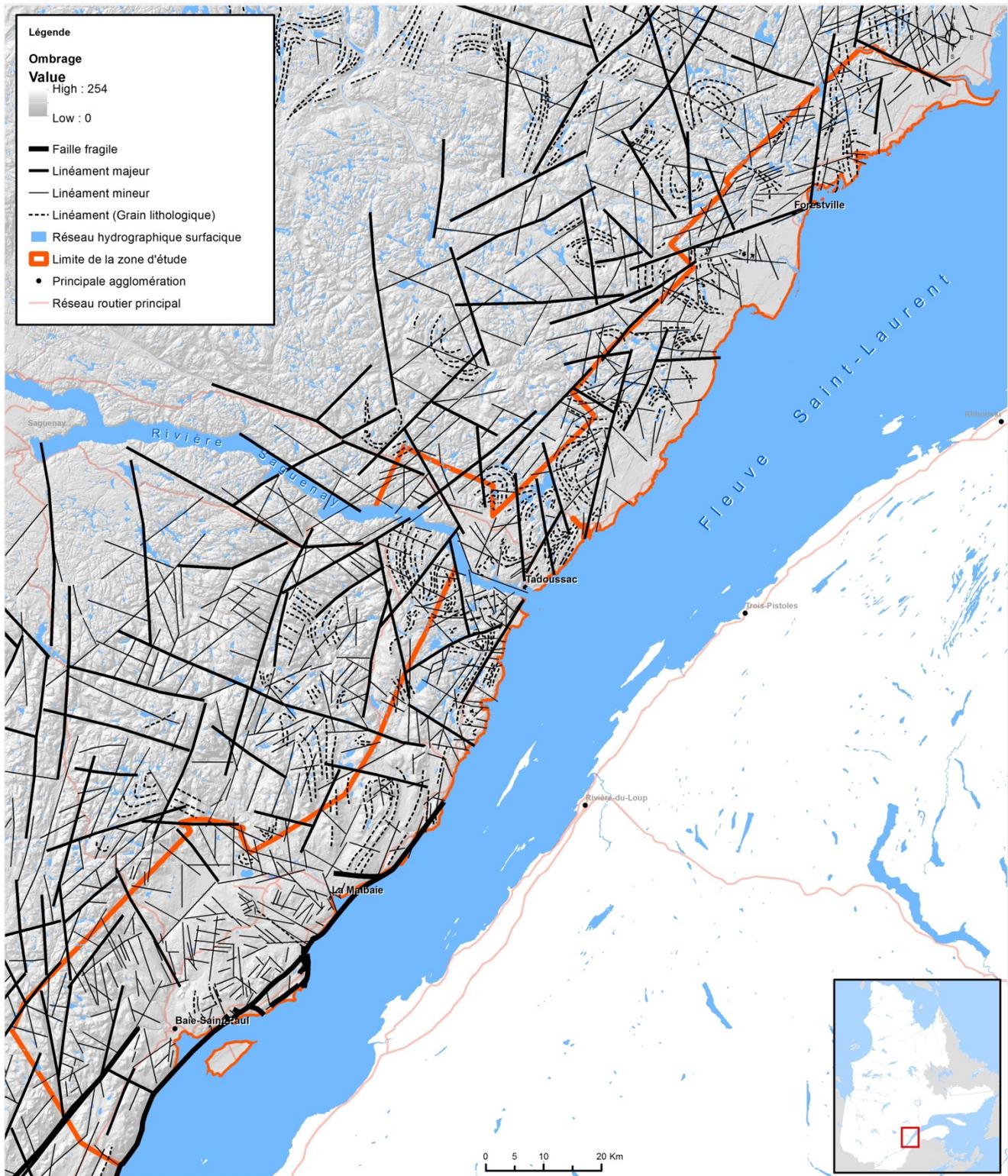


Figure 4-7 : Principales failles fragiles, linéaments majeurs et mineurs interprétés.

4.2.2 Révision de la carte géologique

La carte #13 – *Géologie du roc* (annexe numérique AN1) présente la géologie du territoire CHCN à l'échelle 1 : 225 000 résulte de l'intégration de l'information disponible sur le SIGÉOM (MRN, 2012) par le CERM et provenant majoritairement des cartes de Rondot (1979, 1986, 1989a) et de Morin (1987) (section 4.1.1, figure 4-3). Les unités lithologiques ont été regroupées dans certains cas afin de simplifier la représentation et de permettre la fusion de polygones contigus présents dans le SIGÉOM. Lors des regroupements, les éléments descriptifs (codes lithologiques) ont ainsi été réunis pour faire des unités cohérentes (figure 4-8). La géologie grenvillienne du territoire de CHCN comprend plusieurs ensembles lithologiques variés mais dont les principaux sont :

- 1) Un complexe gneissique comprenant des migmatites, des granites et des lambeaux de roches supracrustales dont des paragneiss, des quartzites et des amphibolites. Ce complexe domine la région de Haute-Côte-Nord.
- 2) Des unités plutoniques de la suite anorthosite-mangérite-charnockite qui dominent la région de Charlevoix et dont fait partie le massif d'anorthosite de Saint-Urbain.

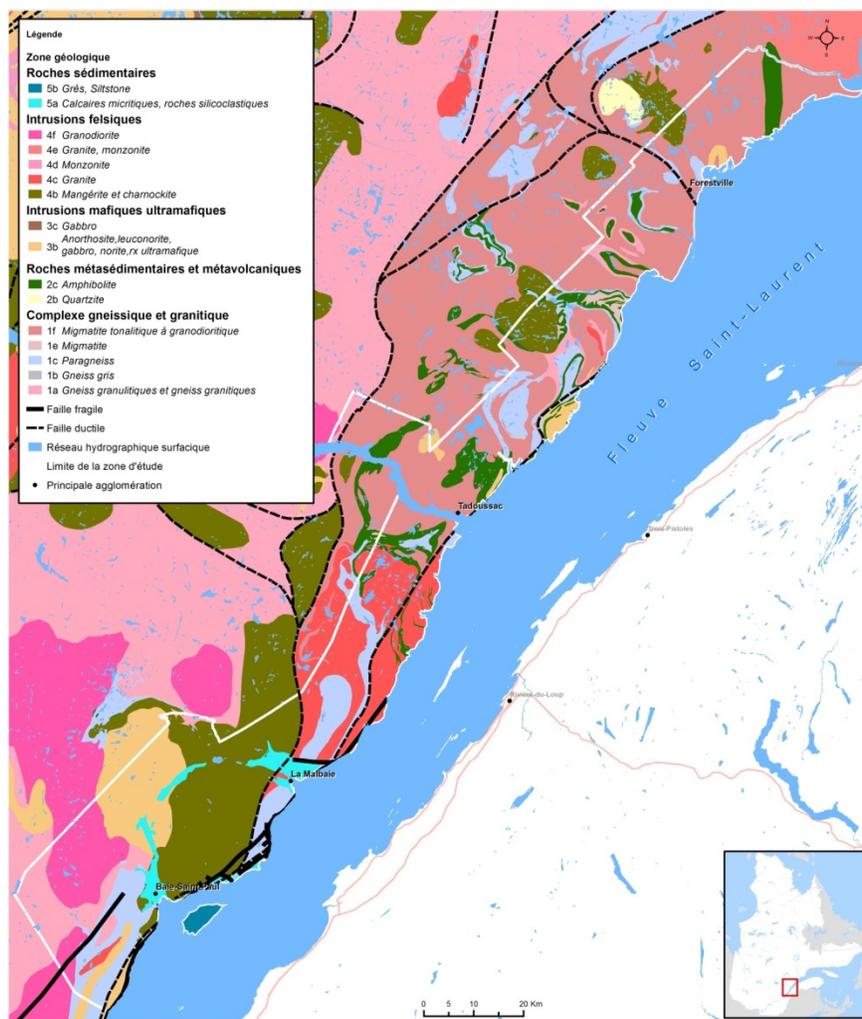


Figure 4-8 : Carte géologique du territoire résultant de l'intégration par le CERM de l'information géologique disponible à l'échelle 1 : 250 000 dans le SIGÉOM (MERN 2012) provenant majoritairement des travaux de Rondot (1979, 1986, 1989) et de Morin (1987).

4.2.2.1 Zones de cisaillement ductile

Les failles ductiles ou zones de cisaillement forment des couloirs d'épaisseur kilométrique à multi-kilométriques caractérisés par une foliation forte à mylonitique de pendage variable. Ces zones se caractérisent par un milieu fortement anisotrope qui peut soit agir comme barrière à l'écoulement souterrain ou être le foyer de réactivation tardive contrôlant la fracturation et devenir des sites favorables à l'écoulement.

Dans la portion SW du territoire, plusieurs failles ductiles de direction NE ont été interprétées à partir des variations du grain lithologique et structural et des données structurales provenant de SIGEOM. Ces failles ont également été validées localement par observation directe sur le terrain. Ainsi au SW de Baie-Saint-Paul, l'une des failles ductiles se subdivise en deux branches l'une continuant sa course le long de la bordure du fleuve Saint-Laurent jusqu'à Tadoussac et l'autre entrant vers l'intérieur des terres pour recouper la rivière Saguenay à l'ouest de Petit Saguenay (figure 4-8). Ces deux failles délimitent des domaines litho-structuraux distincts et visibles sur les cartes aéromagnétiques. Les zones de cisaillement sont communément associées à la présence d'unités sédimentaires comme les paragneiss, les marbres et les quartzites. Dans le secteur de l'astroblème, ces failles ductiles doivent être distinguées des failles plus fragiles comme la Faille du Saint-Laurent qui se retrouve dans le même secteur.

4.2.2.2 Roches ordoviciennes

La présence de dépôts quaternaires dans le secteur de l'astroblème masque en partie l'exposition du socle rocheux et donc les informations utiles à l'interprétation géologique des unités ordoviciennes. Pour cette raison, l'interprétation incluse dans le SIGEOM, et qui pour l'essentiel vient de Rondot, est limitée à des aires d'affleurement de faible superficie. Les limites des roches ordoviciennes ont été extrapolées et généralisées à partir de l'information disponible dans le SIGÉOM (MRN, 2012) et à partir des données de forages intégrées dans les coupes stratigraphiques (annexe numérique AN11) du territoire de Charlevoix. La nouvelle interprétation fait ressortir particulièrement la présence de lambeaux de roches ordoviciennes dans la dépression annulaire de l'astroblème tel qu'illustré à la figure 4-9.

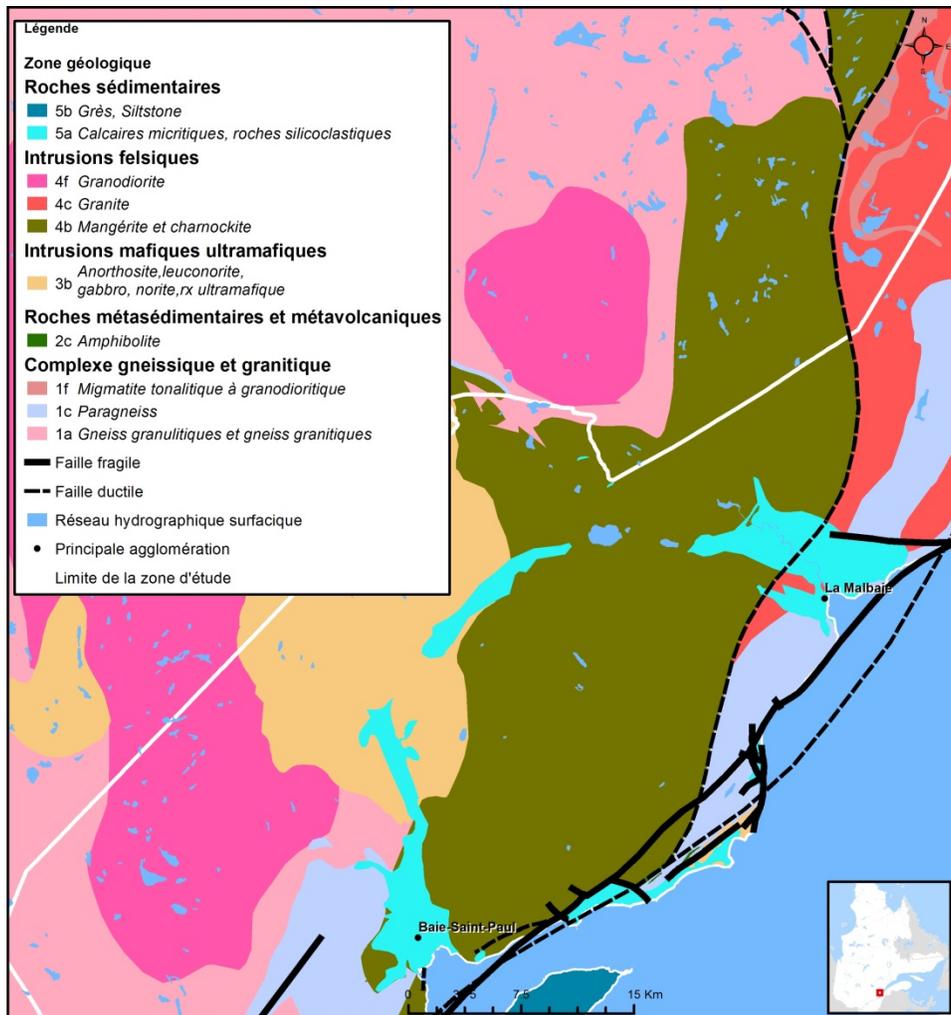


Figure 4-9 : Représentation cartographique des lambeaux de roches ordoviciennes dans le secteur de l'astrolème de Charlevoix.

4.2.3 Levés de terrain pour la fracturation

Les objectifs et la méthodologie utilisée pour les levés de fractures du territoire de Charlevoix ont été décrits au chapitre 2. Rappelons que l'hypothèse de travail au sujet de l'astrolème de Charlevoix visait à vérifier la possibilité d'un degré de fracturation plus élevé dans certaines portions de l'astrolème. La méthode d'estimation visuelle du degré de fracturation utilisée est également décrite au chapitre 2. Ainsi ce degré est estimé à partir d'une cote variant de 1 à 5 soit de peu à très fracturé.

Les résultats du degré de fracturation sont présentés à la figure 4-10. Le nombre de stations n'est pas suffisamment élevé pour permettre une lecture déterminante de la distribution du degré de fracturation. Toutefois, deux secteurs retiennent notre attention quant à leur degré élevé de fracturation soit :

- 1) Le secteur de Saint-Urbain;
- 2) Le secteur Hameau du Cap Blanc à Saint-Irénée.

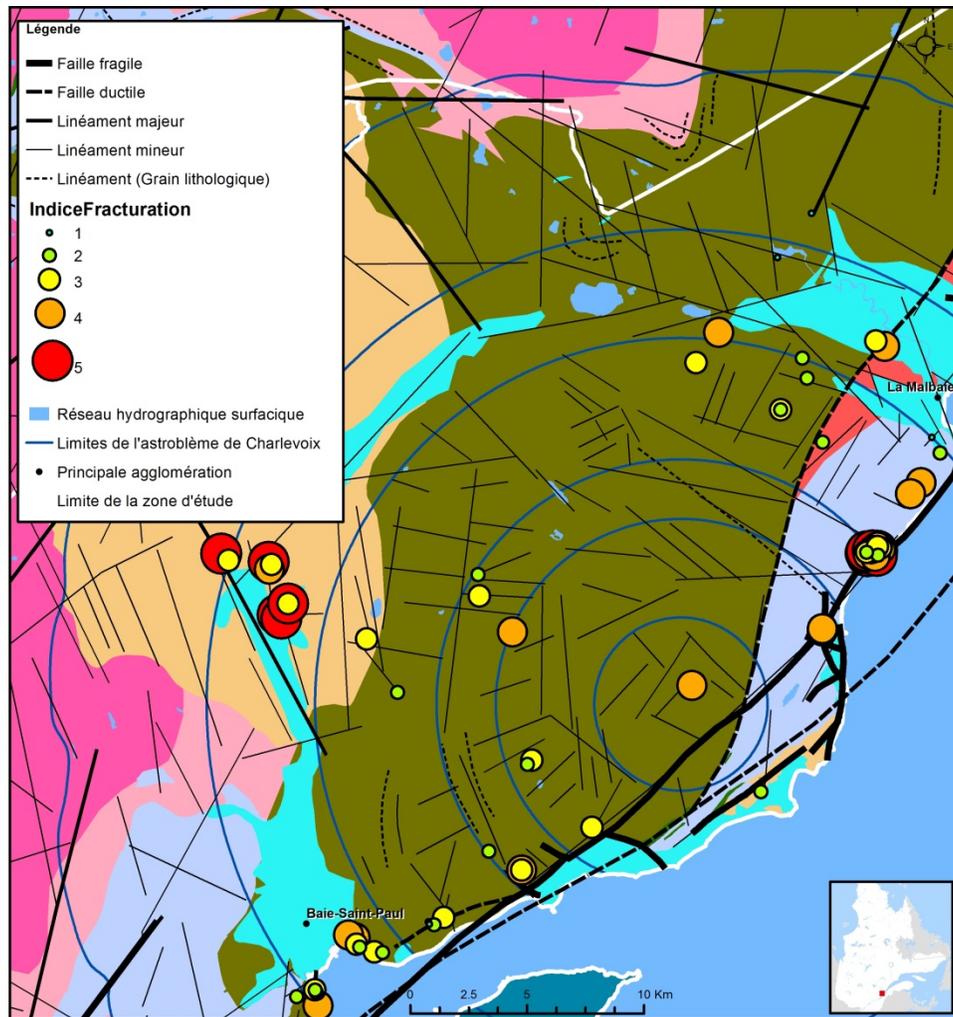


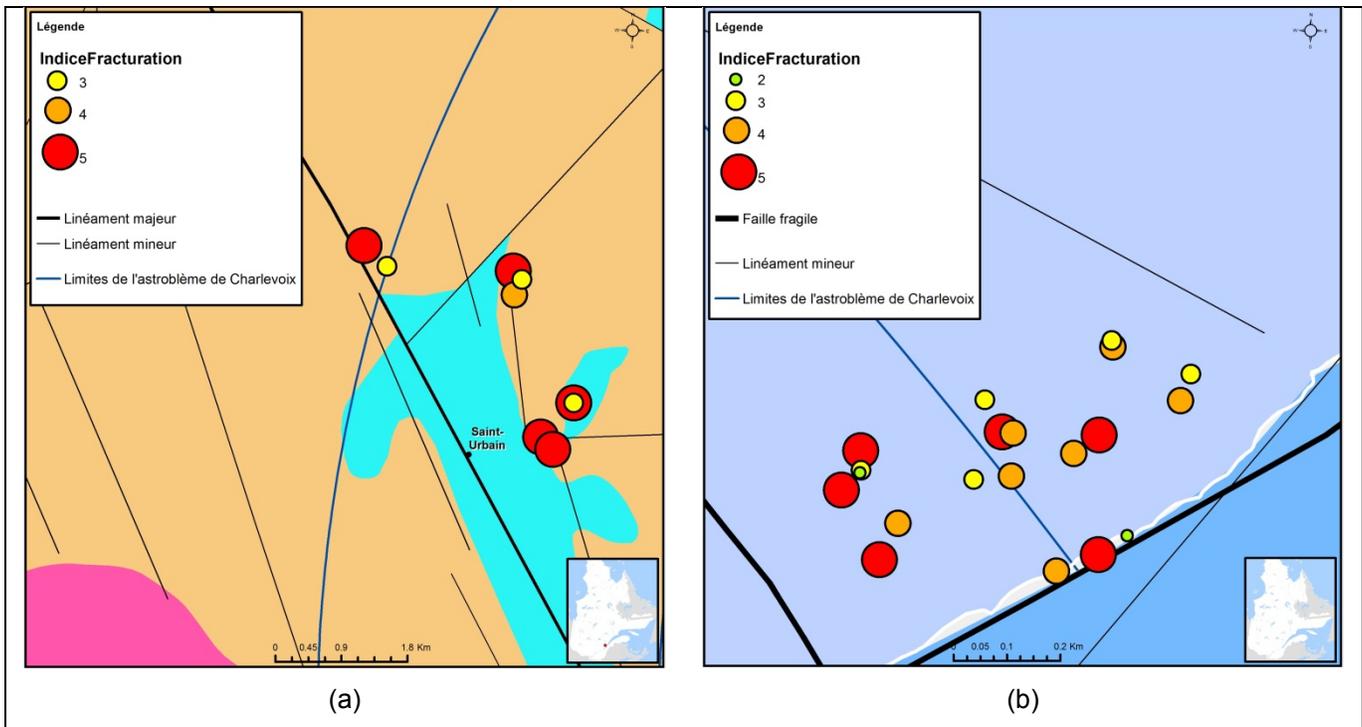
Figure 4-10 : La densité de fracturation observée sur environ 80 affleurements localisés dans le secteur de l'astrolème de Charlevoix est représentée par un indice d'intensité allant de 1 à 5, soit peu à très fracturé. La légende des lithologies est présentée à la figure 4-8.

4.2.3.1 Saint-Urbain

Dans la municipalité de Saint-Urbain, plusieurs affleurements présentent un degré élevé de fracturation estimé (figure 4-11). Ces stations sont situées sur le terrain de l'anorthosite de Saint-Urbain. Le degré élevé de fracturation est attribuable à la présence de joints d'exfoliation fortement à intensivement développés et généralement d'attitude subhorizontale. Une carrière en exploitation au nord de Saint-Urbain montre des niveaux de calcaires qui surmontent l'anorthosite. Les calcaires sont recristallisés mais ne montrent pas un degré de fracturation aussi élevé que celui de l'anorthosite sous-jacente.

4.2.3.2 Hameau du Cap-Blanc à Saint-Irénée

Plusieurs stations ont été visitées dans le développement résidentiel du Hameau du Cap Blanc localisé à Saint-Irénée. Ce secteur se situe au voisinage de la faille du Saint-Laurent, dans le domaine des collines de l'astrolème. Les affleurements observés dans ce secteur présentent également des indices de fracturation élevés variant de 3 à 5 dépendamment de la lithologie (figure 4-11).



**Figure 4-11 : a) Estimation du degré de fracturation dans le secteur de Saint-Urbain et
b) Estimation du degré de fracturation pour le secteur du Hameau du Cap Blanc à Saint-Irénée.**

Les éléments suivants sont retenus de l'analyse des levés de fracture :

- Les indices de densité de fracturation de 4 et 5 se concentrent dans les zones faillées de la dépression annulaire de l'astroblème de Charlevoix et en bordure du Fleuve Saint-Laurent, à proximité de la Faille du Saint-Laurent;
- La présence d'une fracturation élevée dans les quartzites et les paragneiss au Hameau du Cap Blanc (figure 4-12) suggère que ces unités ont un comportement plus fragile favorable à la fracturation. Ce degré de fracturation pourrait être attribuable à la proximité de la Faille du Saint-Laurent et à la présence d'une cassure majeure NW-SE identifiée par Roy (1979) et Robertson (1968) et apparaissant sur la partie de droite de la figure 4-11 qui correspond à un linéament topographique;
- La portion observée de l'anorthosite de Saint-Urbain se caractérise par des joints d'exfoliation fortement développée qui ne retrouvent pas dans les calcaires sus-jacents; figure 4-13).

D'autres lithologies sont quant à elles moins densément fracturées, c'est le cas pour :

- les calcaires qui présentent une densité de fractures variant entre 1 et 4 mais plus généralement à des indices de 2 ou 3 et qui se caractérisent par la présence de paraclases et diaclases (figure 4-14);
- les stations visitées dans le complexe charnockitique qui montrent des degrés de fracturation généralement faible à modérée (varie de 1 à 3; figure 4-15);
- les bandes d'amphibolite observées au Hameau du Cap Blanc qui sont généralement peu fracturées.



Figure 4-12 : Quartzite observée au Hameau du Cap Blanc, l'indice de fracturation est de 5 (photo AFF068-2).



Figure 4-13 : Affleurement observé en bordure de la rivière du Gouffre à la hauteur de la fosse Antonien montrant la fracturation importante de l'anorthosite de Saint-Urbain avec un indice de fracturation de 5 (photo AFF002-3).



Figure 4-14 : Calcaire observé dans une carrière de La Malbaie dont l'indice de fracturation est de 3 (photo AFF014-3). La présence d'une faille et de crochons de plis sont notables.



Figure 4-15 : Charnockite observée dans une carrière à La Malbaie (photo AFF018A-3).

4.2.4 Observations liées à l'astroblème de Charlevoix

Les travaux de terrain réalisés ont également permis d'observer des cônes d'impact dans des roches cristallines affleurantes en bordure de routes récemment construites dans le cadre de projets de développements domiciliaires, particulièrement dans le secteur du chemin de la Seigneurie dans la municipalité des Éboulements ainsi que dans des carrières localisées au sud du rang Sainte-Marie (figure 4-16) dans la municipalité des Éboulements.



Figure 4-16 : *Shatter cones* observés sur un affleurement de charnockite dans une carrière localisée aux Éboulements (photo identifiée AFF023-2).

L'équipe du projet PACES-CHCN a également observé des pseudotachylites sous forme de veinules (figure 4-17a) ou encore en amas centimétriques (figure 4-17b) dans le secteur du chemin de la Seigneurie dans la municipalité des Éboulements.



Figure 4-17 : Pseudotachylite sous forme a) de veinules (photo AFF055A-10) et b) d'amas (photo AFF055B-2) observées dans le secteur du chemin de la Seigneurie aux Éboulements.

De plus, des brèches polygéniques ont été observées dans des séquences rocheuses supracrustales, soit dans les paragneiss fracturés identifiés en bordure des chemins du domaine du Hameau du Cap Blanc à Saint-Irénée (figure 4-18).



Figure 4-18 : Dyke bréchique polygénique d'environ 40 cm d'épaisseur injecté dans une fracture des paragneiss observés en bordure de route dans le chemin du Hameau du Cap Blanc à Saint-Irénée.

4.3 Géologie du Quaternaire

Le Quaternaire est la dernière période géologique ($\approx 2,6$ Ma à aujourd'hui) et correspond à une succession de phases glaciaires dont la dernière est appelée la période glaciaire wisconsinienne (≈ 75 à 10 ka). Au cours du Wisconsin, le glacier a recouvert l'ensemble du territoire québécois et a pu dépasser 3 km d'épaisseur. L'érosion des roches superficielles a sculpté le paysage. Les mouvements du glacier et sa fonte sont responsables d'une bonne partie des sédiments sur l'ensemble du territoire et montre certains cycles d'avancés et de fonte du glacier. Des sédiments lacustres, alluviaux et marins post-glaciaires recouvrent localement les dépôts glaciaires et proglaciaires.

Dans la région de Charlevoix et de la Haute-Côte-Nord, les sédiments meubles recouvrent presque entièrement les roches en place comme en témoigne la carte #12 – *Géologie du Quaternaire* (annexe numérique AN1) résultant de la combinaison des cartes à l'échelle 1 : 50 000 créées dans le cadre des travaux de cartographie de Cousineau et al. (2014) présentée à la figure 4-19. Dans les hautes terres, les dépôts de surface correspondent majoritairement à des tills. Les vallées présentes dans les hautes terres sont généralement comblées par des sédiments fluvioglaciaires. Aux limites des hautes et des basses terres, des sédiments glaciolacustres sont reconnus. Une partie des basses terres a été recouverte par la mer de Goldthwait, ce qui explique la présence de sédiments glaciomarins dans la dépression annulaire de l'astroblème de Charlevoix et dans la partie des basses terres de la Haute-Côte-Nord de quelques à plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. Les sédiments déposés dans d'autres contextes (marins, alluviaux, éoliens, organiques et de versants) ne représentent qu'un faible pourcentage de la superficie cartographiée sur le territoire de CHCN. Les sections suivantes présentent les sédiments cartographiés sur le territoire municipalisé de CHCN.

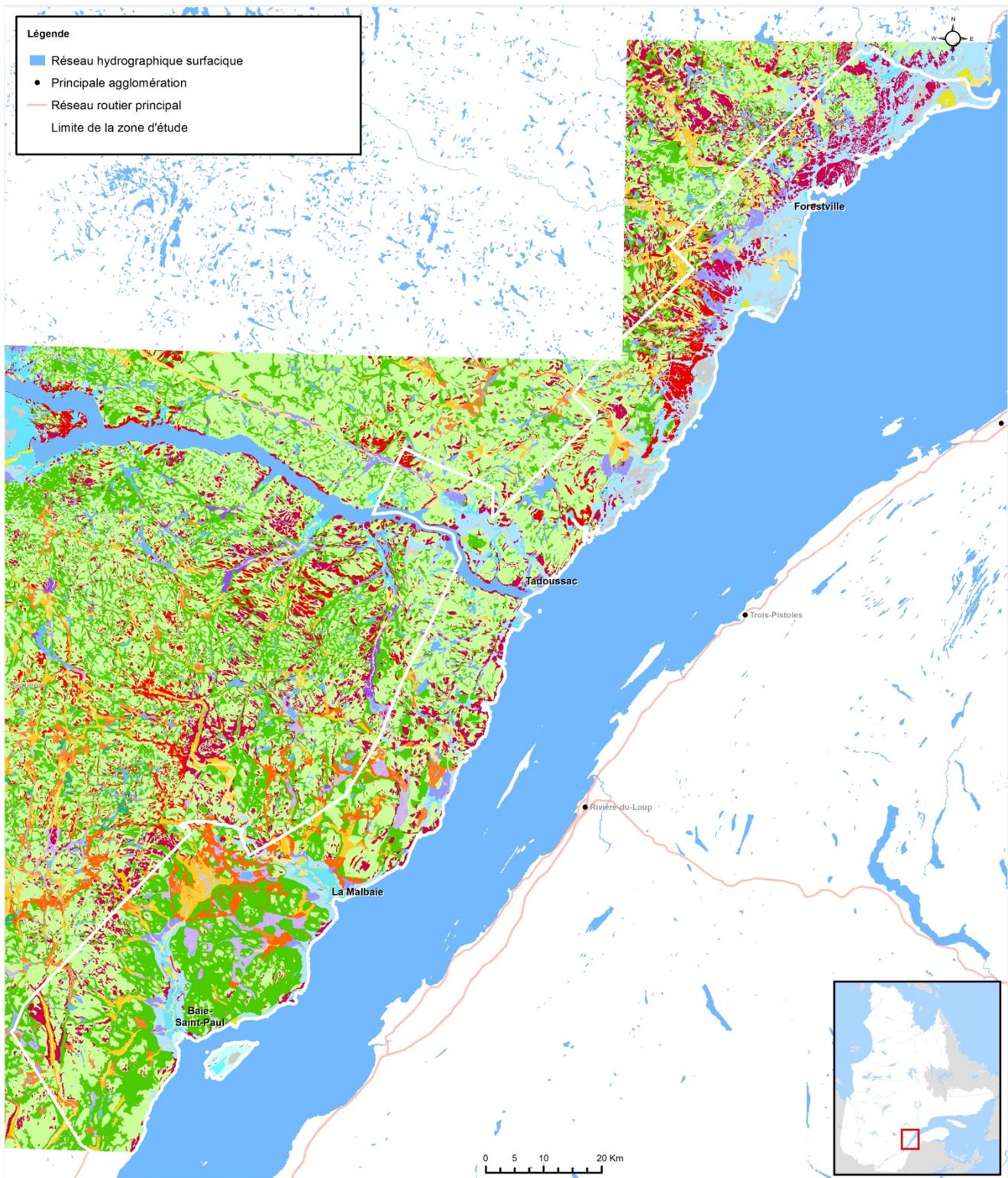


Figure 4-19 : Cartographie des dépôts de surface du territoire de CHCN (Cousineau et al., 2014; légende à la page suivante).

Légende des éléments situés dans la zone d'étude

DEPÔTS QUATERNAIRES POSTGLACIAIRES

DEPÔTS DE VERSANT

- Ce **Dépôts d'éboulements** : cailloux et blocs anguleux géoliffés, formant des cônes ou des tabliers au pied d'escarpements rocheux.
- Cr **Dépôts de glaciers rocheux** : cailloux et blocs anguleux à subanguleux, mis en place sur des pentes raides et se déformant plastiquement à cause de la présence de glace interstitielle.
- Cg **Dépôts de glissement de terrain** : silt et argiles remaniés par des glissements de terrain et occupant le plus souvent des amphithéâtres marqués par des modèles chaotiques ou en gradins au pied de cicatrices de glissement, selon la nature du matériel recouvrant les argilo-silt marins, ces sédiments peuvent comprendre des amas de sable ou de gravier entraînés par les glissements; épaisseur variant de 1 à 15 m.
- C **Dépôts de versant non différenciés**

SÉDIMENTS ORGANIQUES

- O **Sédiments organiques non différenciés**

DEPÔTS ÉOLIENS

- Ed **Sédiments éoliens** : sable fin à stratifications obliques diffusées mis en place par le vent sous forme de dunes paraboliques formées à la surface des sédiments littoraux et alluviaux fraîchement exondés; indiquent des vents dominants provenant du NE ou du SO, pouvant contenir des horizons organiques tels des paléosols, d'une épaisseur variant de 2 à 10 m. L'éolisation des dunes stabilisées et autres surfaces sableuses peut reprendre si la couverture végétale est enlevée, soit lors de feux de forêts ou par l'activité anthropique.

SÉDIMENTS ALLUVIAUX

NOTE

Sédiments mis en place le long des cours d'eau du système fluvial actuel et lors de leur incision dans les formations quaternaires antérieures (Ap, At). Ces sédiments incluent notamment des alluvions mises en place dans les anciens chenaux de proto-rivières (Ax).

- Ap **Alluvions actuelles** : sable, silt sableux, sable graveleux et gravier contenant fréquemment de la matière organique; de 0,5 à 1 m d'épaisseur; levées, barres et plaines alluviales actuelles.
- Ac **Cône alluvial** : galets, graviers, sables stratifiés formant des cônes plus ou moins inclinés au débouché de cours d'eau sur un terrain plus plat; surface généralement chenalisée.
- Ax **Alluvions des terrasses fluviales anciennes** : sable, silt sableux et gravier contenant un peu de matière organique; de 1 à 7 m d'épaisseur; déposés dans des zones débordant des couloirs fluviaux actuels. Surface généralement marquée par des levées et barres alluviales et parfois remaniée par l'action éolienne; l'abaissement du niveau de base est visible par l'étagement des terrasses.
- A **Alluvions non différenciées**

SÉDIMENTS LACUSTRES

NOTE

Sédiments mis en place dans un lac périglaciaire et comprenant principalement des sables et graviers littoraux, pré-littoraux et deltaïques; pouvant aussi inclure des sédiments remaniés à partir d'unités sous-jacentes.

- Lb **Sédiments littoraux et pré-littoraux** : sable, silt sableux, sable graveleux et gravier stratifiés et généralement bien triés; mis en place en eaux peu profondes lors de la phase pléniacustre et lors de l'exondation; surface généralement marquée par des crêtes de plage et parfois remaniée par l'action éolienne; puisqu'il s'agit principalement de faciès d'exondation, ces sédiments forment le plus souvent une couverture mince reposant sur des sédiments fins d'eau profonde.

SÉDIMENTS MARINS

NOTE

Sédiments mis en place lors de l'épisode de la mer de Goldthwait; généralement fossilifères, comprenant principalement des sables et graviers littoraux, pré-littoraux et deltaïques ainsi que des silts et argiles déposés en eau profonde; pouvant aussi inclure des sédiments remaniés à partir d'unités sous-jacentes. Ces sédiments ont été identifiés en dessous de 10 m d'altitude.

- Mb **Sédiments littoraux et pré-littoraux** : sable, silt sableux, sable graveleux et gravier stratifiés et généralement bien triés; d'épaisseur variant de 1 à 13 m; mis en place en eau peu profonde lors de la phase pléniacustre et lors de l'exondation; surface généralement marquée par des crêtes de plage et parfois remaniée par l'action éolienne; lorsqu'il s'agit de faciès d'exondation, ces sédiments forment généralement une couverture mince sur les sédiments d'eau profonde.
- Ma **Sédiments fins d'eau profonde** : silt argileux et argile silteuse, gris moyen à gris foncé, massifs, laminés ou stratifiés, comprenant localement des rythmites; principalement mis en place par décantation durant la phase d'inondation marine.

DERNIÈRE GLACIATION

SÉDIMENTS GLACIOMARINS

NOTE

Sédiments mis en place lors de l'épisode de la mer de Goldthwait à proximité de ou devant une marge glaciaire et composés principalement de silt, sable, argile ou diamiction; ces sédiments contiennent des faunes d'eaux très froides ou sont non fossilifères.

- MGj **Sédiments intertidaux** : silt et silt sableux, généralement massifs ou faiblement stratifiés; d'épaisseur variant de 2 à 5 m; mis en place en zone intertidale ou infratidale dans des baies ou bras de mer abrités, souvent à proximité de grands complexes deltaïques.
- MGd **Sédiments deltaïques et prodeltaïques** : sable, sable graveleux et gravier, stratifiés et bien triés, jusqu'à 20 m d'épaisseur; mis en place à l'embouchure de cours d'eau se déversant dans la mer de Goldthwait; comprenant localement des sédiments silto-sableux prodeltaïques.
- MGb **Sédiments littoraux et pré-littoraux** : sable, silt sableux, sable graveleux et gravier stratifiés, généralement bien triés; d'épaisseur variant de 1 à 10 m environ; mis en place en eau peu profonde; surface généralement marquée par des crêtes de plage et parfois remaniée par l'action éolienne.
- MGa **Sédiments fins d'eau profonde** : silt argileux et argile silteuse, gris moyen à bleu-gris, massifs, laminés ou stratifiés, comprenant localement des rythmites; variant de 1 à 25 m d'épaisseur; principalement mis en place par décantation durant la phase d'inondation glaciomarine.

SÉDIMENTS GLACIOLACUSTRES

NOTE

Sédiments mis en place dans un lac proglaciaire.

- LGd **Sédiments deltaïques et prodeltaïques** : sable, sable grossier et sable graveleux; de 3 à 15 m d'épaisseur; mis en place à l'embouchure des cours d'eau qui se déversaient dans un lac proglaciaire, montrant une surface plane généralement marquée par des chenaux abandonnés et parfois modifiée par l'action éolienne.
- LGb **Sédiments littoraux et pré-littoraux** : sable, sable silteux, gravier sableux et blocs; de 1 à 10 m d'épaisseur; sédiments remaniés le long des rives et à l'intérieur du lac glaciaire, montrant une surface parfois marquée par des crêtes de plage ou modifiée par l'action éolienne.
- LG **Sédiments glaciolacustres non différenciés**

SÉDIMENTS FLUVIOGLACIAIRES

NOTE

Sédiments stratifiés mis en place par les eaux de fonte au contact ou à proximité du glacier. Les unités sises sous la limite marine ou glaciolacustre ont généralement été remaniées par les vagues et les courants lors de la submersion ou de l'exondation.

- Go **Sédiments d'épandage proglaciaire subaérien** : sable, gravier et blocs, stratifiés, montrant une décroissance granulométrique générale vers l'aval; de 1 à 12 m d'épaisseur; formant des replats et des plaines d'épandage dont la surface est souvent marquée par d'anciens chenaux sinueux et peu profonds.
- Gx **Sédiments juxtaglaciaires** : sable et gravier, blocs, stratifiés, parfois mal triés, un peu de till ou de diamiction; jusqu'à 30 m d'épaisseur; formant des eskers, des kames, des deltas-kames et des crêtes morainiques dont la surface est généralement bosselée.
- GxT **Sédiments des moraines frontales de Saint-Narcisse, de Mars-Batiscan et de Rochette**: till, diamiction, blocs, sable et gravier; jusqu'à 10 m d'épaisseur; mis en place au front du glacier; constitués d'une ou plusieurs crêtes dont la surface est généralement bosselée et parsemée de blocs.

SÉDIMENTS GLACIAIRES

NOTE

Diamiction à matrice sablo-silteuse à silto-argileuse mis en place directement par le glacier.

- Tc **Till en couverture généralement continue** : diamiction à matrice sableuse ou silteuse comprenant des faciès de fond et d'ablation; d'épaisseur variant de 1 à 8 m; en surface, cette unité est présente principalement sur les hauts-plateaux et à l'intérieur des dépressions.
- Tm **Till en couverture mince et discontinue** : diamiction comprenant principalement des faciès d'ablation de moins de 1 m d'épaisseur et dont la surface est généralement ponctuée d'affleurements rocheux; la structure du roc sous-jacent transparaît sur les photographies aériennes. Unité présente principalement dans les régions de socle.

PRÉ-QUATERNAIRE

SUBSTRAT ROCHEUX

- Ri **Roches ignées intrusives**
- Rs **Roches sédimentaires et/ou volcaniques, généralement subhorizontales**
- Rm **Roches métamorphiques de haut grade**

- Gravière, sablière (active)
- Cicatrice de glissement de terrain (et sens du mouvement)
- Crête morainique majeure
- Gravière, sablière (abandonnée)
- Kettle (grand)
- Rebord d'escarpement rocheux
- Esker (sens d'écoulement connu)
- Agglomération
- Réseau hydrographique surfacique
- Réseau routier principal
- Réseau hydrographique linéaire
- Limite de la zone d'étude

4.3.1 Les sédiments glaciaires (Tc, Tm)

Les sédiments glaciaires correspondent aux matériaux accumulés sous le glacier et laissés sur place suite à la fonte. Ces sédiments correspondent à des tills caractérisés par un diamicton dont la matrice se compose de sable silteux à silt argileux (Cousineau et al., 2014). Des trois principales unités cartographiées (figure 4-19), c'est le till mince (Tm) qui constitue l'unité de till principale des hautes terres du territoire, les deux autres étant le till en couverture continue (Tc) et le till de fusion (Tf).

Le till mince (Tm) se constitue généralement d'un diamicton à matrice sableuse pouvant contenir des blocs métriques. Il est cartographié en couverture discontinue en alternance avec le roc affleurant (figure 4-20).



Figure 4-20 : Till mince en alternance avec le roc affleurant, secteur de Forestville au nord-est de la rivière Sault-aux-Cochons (photo EB06210037a).

Le till en couverture continue (Tc) comprend des unités de till de fond et d'ablation dont l'épaisseur est supérieure à 1 mètre. L'épaisseur maximale observée à proximité de la rivière de Sault-aux-Cochons au nord de Forestville correspond à 8 mètres (figure 4-21).



Figure 4-21 : Till en couverture continue d'une épaisseur de 8 mètres au nord-ouest de la municipalité de Portneuf-sur-Mer.

4.3.2 Les sédiments fluvioglaciaires (Gx, GxT, Go)

Les sédiments fluvioglaciaires (figure 4-19) résultent de dépôts de sédiments transportés par les eaux de fonte du glacier, soit en marge du glacier (kames) ou encore sous ce dernier (esker). La composition granulométrique de ces dépôts est généralement très faible en silt et argile, ce qui peut constituer des réservoirs de choix pour le captage de l'eau souterraine. Trois unités fluvioglaciaires sont observées sur le territoire de CHCN, des sédiments juxtaglaciaires (Gx), des sédiments morainiques (GxT) et des sédiments d'épandage proglaciaire subaérien (Go).

Les sédiments juxtaglaciaires (Gx) sont constitués de sables, graviers et blocs stratifiés souvent déformés par des failles. Ils correspondent à des eskers orientés généralement nord-sud, des kames, des deltas-kames et des crêtes morainiques. Les épaisseurs observées sur le terrain varient entre 1 et 30 mètres.

Les sédiments morainiques (GxT) correspondent notamment à la partie la plus à l'est de la moraine frontale de Saint-Narcisse (figure 4-22) et à la moraine de Rochette. Elles se composent de diamictons à matrice sableuse, de blocs et de graviers et leur épaisseur varie de 1 à 10 mètres sur le territoire à l'étude. La moraine frontale de Saint-Narcisse a été formée par la réavancée glaciaire (10,8 à 10,5 ka) lors du refroidissement au Dryas récent suivie de deux périodes de stabilisation (Occhiotti, 2007). La réavancée glaciaire à l'est de Charlevoix se serait peut-être poursuivie sous la limite marine, actuellement sous le fleuve Saint-Laurent (Lajeunesse et al., 2008; Lajeunesse et al., 2011) ce qui explique que la moraine de Saint-Narcisse soit observée uniquement sur le territoire de Charlevoix.



**Figure 4-22 : Moraine de Saint-Narcisse
observée dans la municipalité de Saint-Hilarion (photo EB07220202a).**

Les sédiments d'épandage aérien (Go) se composent de sables, graviers et blocs stratifiés dont la granulométrie décroît généralement vers l'aval. La présence de kettles peut être un bon indicateur de plaine d'épandage. Ces sédiments se retrouvent principalement dans les vallées et les dépressions dans les hautes terres (figure 4-23).



Figure 4-23 : Sédiments de plaine d'épandage subaérien observés dans le Parc national des Grands-Jardins, région de Charlevoix (photo JB07310300a).

4.3.3 Les sédiments glaciolacustres (LGb)

Les sédiments glaciolacustres résultent de la mise en place de sédiments par des lacs d'obturation glaciaire; ils se situent au-dessus de la limite marine. Sur le territoire municipalisé, ils sont majoritairement observés dans la région de Charlevoix et correspondent à des sédiments littoraux et sublittoraux (LGb). Ils se composent de sable, sable silteux, gravier sableux et blocs. D'un point de vue stratigraphique, ils sont déposés sur le till, les sédiments fluvioglaciaires ou les sédiments fins glaciolacustres (LGa) qui sont rarement cartographiés en surface. C'est principalement dans le secteur de Saint-Hilarion qu'ils sont cartographiés (figure 4-24).



Figure 4-24 : Sédiments littoraux et sublittoraux (LGb) observés au sud de Saint-Hilarion (photo JB07230218a).

4.3.4 Les sédiments glaciomarins (MGa, MGb, MGd)

Les sédiments glaciomarins se sont mis en place lors de la présence de la mer de Goldwaith. Parmi les dépôts glaciomarins observés sur le territoire municipalisé de CHCN se trouvent les sédiments fins d'eau profonde (MGa) qui sont principalement observés dans les vallées du Gouffre et de La Malbaie, les sédiments littoraux et pré-littoraux (MGb) qui couvrent la majorité des basses terres de la Haute-Côte-Nord et dont la partie amont correspond localement à des sédiments deltaïques et prodeltaïques (MGd).

Dans le secteur de l'astroblème de Charlevoix, Govare (1994) indique que la limite marine correspond à 220 m d'altitude. À Tadoussac, cette limite est d'environ 140 à 150 m d'altitude selon Dionne et Occhietti (1996) et, pour l'ensemble de la Haute-Côte-Nord, la limite marine est estimée à plus de 180 m d'altitude selon les secteurs (Hardy, 1970).

Les sédiments fins d'eau profonde (MGa) se composent de silt argileux et d'argile silteuse gris bleu dont l'épaisseur observée en coupe sur le terrain varie généralement entre 1 et 25 mètres (figure 4-25).



Figure 4-25 : Coupe de dépôts glaciomarins argileux, MGa (photo BP06250075d) observée dans la municipalité de Colombier.

Les sédiments littoraux et pré-littoraux (MGb) se composent de sable, silt sableux, sable graveleux et gravier, et leur épaisseur varie entre 1 et 10 mètres. Les sédiments littoraux (MGb) mis en place en eau peu profonde correspondent à des crêtes de plage (figure 4-26). Ces sédiments couvrent une importante partie des basses terres de la Haute-Côte-Nord tandis qu'ils sont principalement observés dans les vallées du Gouffre et de La Malbaie sur le territoire de Charlevoix.



Figure 4-26 : Sédiments littoraux et pré littoraux glaciomarins, MGb (photo EB06190013a) observé dans la municipalité de Forestville.

Ces dépôts favorisent la formation d'une croûte de sable ferrugineux durcie (ferricroûte) qui est observée à quelques mètres sous la surface (figure 4-27), principalement sur la Haute-Côte-Nord. Lorsqu'elle est présente, cette strate se comporte comme une couche imperméable et retient l'eau ce qui favorise la formation de milieux humides.



Figure 4-27 : Sédiments glaciomarins littoraux et pré-littoraux oxydés correspondant à une ferricroûte (photo BP06260087b), observés au nord de la municipalité de Colombier.

Les sédiments deltaïques et prodeltaïques (MGd) glaciomarins peuvent atteindre 20 mètres d'épaisseur (figure 4-28). Ils se composent de sable, sable graveleux et gravier bien trié. Ces dépôts se localisent en amont des sédiments littoraux et pré-littoraux (MGb). En effet, ils ont été mis en place à l'embouchure des cours d'eau se déversant dans la mer de Goldthwait.



Figure 4-28 : Sédiments glaciomarins deltaïques, MGd (photo BP07020111a) observés le long du Fleuve Saint-Laurent dans la municipalité de Portneuf-sur-Mer.

Sur la Haute-Côte-Nord, ces deltas sont observés aux altitudes 90 et 120 mètres et correspondent à deux niveaux façonnés lors du retrait de la mer. L'un de ces deltas est observable sur plusieurs centaines de mètres de longueur et jusqu'à 80 mètres de hauteur. Il apparaît en coupe le long de la côte du fleuve à Portneuf-sur-Mer et constitue un des éléments d'étude doctorale de M. Pierre Dietrich de l'Université de Strasbourg en France.

4.3.5 Les sédiments marins (Ma, Mb)

Ces sédiments sont observés en surface sur l'Isle-aux-Coudres, à Baie-Saint-Paul ainsi qu'à Portneuf-sur-Mer sur la Haute-Côte-Nord. Ces sédiments ont été mis en place lors de la période post-glaciaire de la mer de Goldthwait et se localisent à environ 10 mètres d'altitude.

Les sédiments marins déposés en eau profonde (Ma) correspondent à des sédiments fins constitués majoritairement de silt et d'argile (figure 4-29). Ce dépôt se retrouve au centre de l'Isle-aux-Coudres et couvre une superficie d'un peu plus de 3 km².



Figure 4-29 : Sédiments marins profonds observés à l'Isle-aux-Coudres (photo BP08090470b).

Les sédiments marins littoraux et pré-littoraux (Mb) se composent de sable pouvant aller de silteux à graveleux et de gravier. En surface, ils correspondent à des crêtes de plage dont l'épaisseur observée en coupe varie entre 1 et 13 mètres. Ils sont cartographiés à l'Isle-aux-Coudres, Baie-Saint-Paul et Portneuf-sur-Mer. Sur la Haute-Côte-Nord, ils forment des flèches littorales, des tombolos et s'étendent le long du littoral (figure 4-30).



Figure 4-30 : Sédiments marins composés de sable moyen stratifié (photo BP06250078b) observés à l'est de la municipalité de Colombier.

4.3.6 Les sédiments alluviaux (Ax, Ap)

Les sédiments alluviaux sont mis en place le long des cours d'eau actuels. Deux types d'unités se distinguent : les alluvions de terrasses anciennes (Ax) et les alluvions actuelles (Ap).

Les alluvions de terrasses anciennes (Ax) se caractérisent par des sables, silt sableux et gravier (figure 4-31) contenant des traces de matières organiques. Ils forment des terrasses dans les vallées bordant les cours d'eau actuels dont l'épaisseur observée fait entre 1 et 7 mètres d'épaisseur.



Figure 4-31 : Alluvions des terrasses fluviales anciennes montrant un horizon de sédiments grossiers de la rivière Sainte-Marguerite à Sacré-Cœur (photo BP06270097b).

Les alluvions actuels se caractérisent par des sables, silt sableux, sable graveleux et des graviers et correspondent à des levées, barres et plaines alluviales. Un important dépôt de ce type est cartographié dans le secteur de la rivière Portneuf (figure 4-32).



Figure 4-32 : Alluvions actuels de la rivière Portneuf (photo BP06200059a).

4.3.7 Les sédiments éoliens (Ed)

Les sédiments éoliens, cartographiés essentiellement dans le secteur de la Haute-Côte-Nord, se composent de sable fin à moyen et forment des dunes paraboliques. Les dunes de Tadoussac dont l'épaisseur peut atteindre 10 mètres sont un exemple de ce type de dépôt (figure 4-33).



Figure 4-33 : Dunes de Tadoussac, sédiments éoliens (photo BP07080151a).

4.3.8 Les sédiments organiques indifférenciés (O)

Les sédiments organiques (O) se constituent de tourbe fibreuse. Les environnements de dépôts favorables à leur développement sont les sols mal drainés comme les unités de sédiments fins ou la présence d'un horizon de ferricroûte. Sur le territoire de la Haute-Côte-Nord, ces sédiments sont exploités pour leur valeur économique.

4.3.9 Les dépôts de versant (C, Ce, Cr, Cg)

Les dépôts de versant identifiés sur le territoire sont les dépôts d'éboulis (Ce) et les dépôts de glissements (Cg).

Les dépôts d'éboulis (Ce) majoritairement observés au nord-ouest de Baie-Saint-Paul se composent de cailloux et de blocs anguleux (figure 4-34).

Les dépôts de glissement de terrain (Cg) se composent de sédiments fins remaniés par les glissements de terrain. C'est le type de dépôts de versant le plus souvent observé sur le territoire de CHCN.



Figure 4-34 : Tablier d'éboulis (photo BP06210070g) dans le secteur de Baie-Saint-Paul.

4.4 Résultats stratigraphiques des travaux d'investigation

L'un des objectifs du projet PACES-CHCN consiste à proposer les limites des principaux aquifères régionaux (chapitre 6). Pour ce faire, il est requis d'avoir un maximum d'information sur la nature et l'architecture des dépôts, c'est-à-dire leur géométrie, leur extension latérale, leur épaisseur et leur séquence d'empilement.

Les données cartographiques présentées dans les sections précédentes de ce chapitre constituent des informations stratigraphiques essentielles en plus des données ponctuelles existantes colligées dans la base de données à référence spatiale. Ces données existantes proviennent de rapports de forage, de levés géophysiques (sismiques), de sondages au piézocône et de coupes stratigraphiques. Toutefois, la distribution spatiale de ces données ponctuelles correspond à des grappes (figure 4-35a) et des secteurs de plusieurs dizaines de km² n'ont d'autres données stratigraphiques que celles provenant des cartes géologiques et des dépôts de surface. De plus, certaines données ponctuelles présentent une séquence stratigraphique partielle, c'est-à-dire qu'elle ne traverse pas la totalité des dépôts jusqu'au roc (figure 4-35b). Pour augmenter le nombre de données et en améliorer la distribution, des données stratigraphiques additionnelles doivent être acquises. Cette section présente l'acquisition de données stratigraphiques complémentaires obtenues par les levés géophysiques et les sondages au piézocône pour plusieurs sites localisés sur l'ensemble du territoire, l'interprétation des coupes stratigraphiques régionales couvrant l'ensemble du territoire de CHCN, l'épaisseur des dépôts et la topographie du roc.

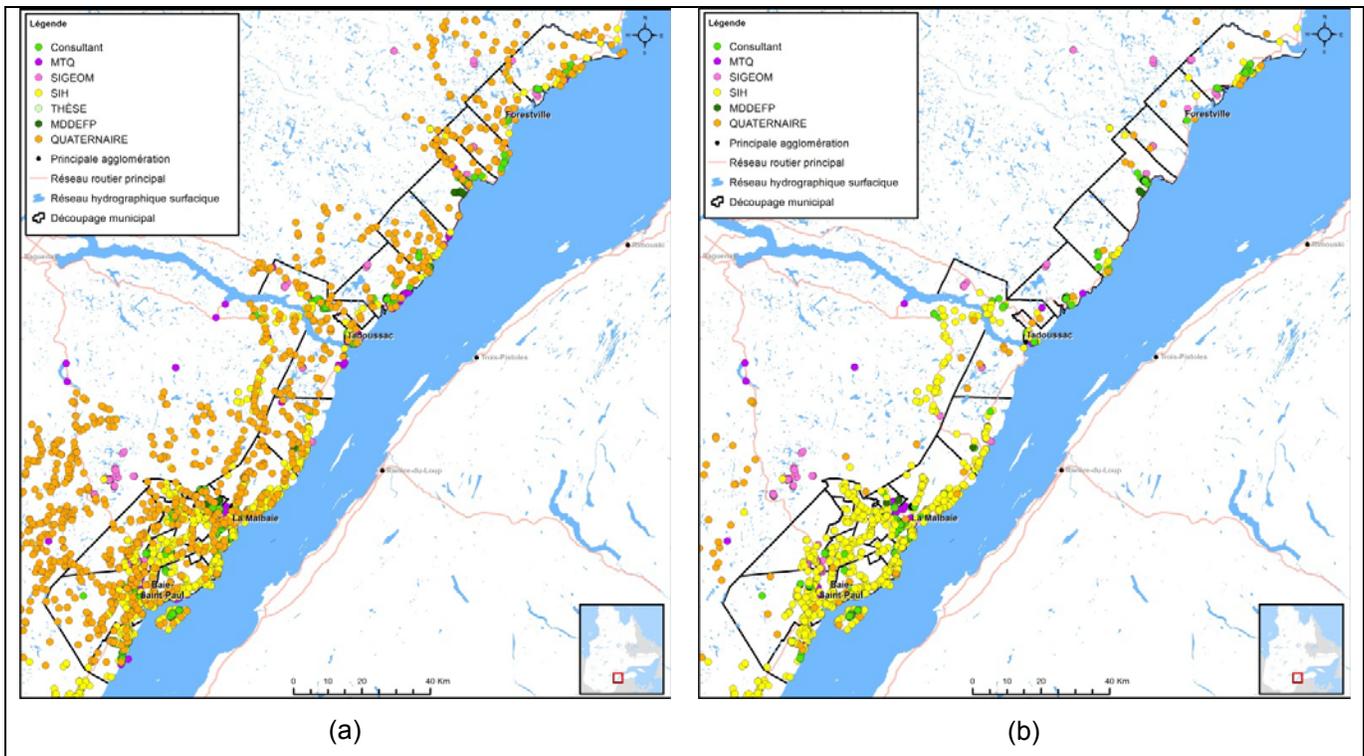


Figure 4-35 : Localisation des données ponctuelles existantes totales (a) et des données ponctuelles existantes atteignant le roc (b).

Dans le but d'augmenter les connaissances stratigraphiques sur le territoire CHCN et le nombre de données ponctuelles atteignant le roc (données requises pour estimer l'épaisseur des dépôts), et d'obtenir une distribution plus régulière des données stratigraphiques, plus de 170 levés géophysiques ponctuels et 11 sondages au piézocône ou par rotopercussion ont été réalisés (section 2.2). Ainsi, des données stratigraphiques additionnelles ont été obtenues sur onze sites d'investigation qui sont décrits dans cette section : Colombier, Forestville, Portneuf-sur-Mer, Longue-Rive, Les Escoumins, Les Bergeronnes, Sacré-Cœur, Saint-Siméon, La Malbaie, Saint-Urbain, Isle-aux-Coudres. Le rapport complet présentant les résultats levés géophysiques est disponible à l'annexe numérique AN3 et le rapport des sondages au piézocône et par rotopercussion est disponible à l'annexe numérique AN4. Considérant les coûts liés à la réalisation de forages et les superficies pour lesquelles de nouvelles données stratigraphiques sont requises, il a été décidé de mettre l'emphase sur les levés géophysiques, une méthode de détermination indirecte mais qui permet de couvrir plus de territoire.

Ces données stratigraphiques obtenues à partir de levés et sondages donnent de l'information sur la nature des dépôts et leur épaisseur, et pour certaines sur la profondeur du socle rocheux. Ces nouvelles données sont intégrées à la base de données à référence spatiale.

4.4.1 Colombier

Sur le territoire de la municipalité de Colombier, la stratigraphie a été investiguée à partir de onze levés géophysiques ponctuels réalisés avec la méthode d'*Induction électromagnétique de transition ou TDEM (Time-Domain Electromagnetism)* (chapitre 2) qui ont permis d'élaborer deux sections géoélectriques (annexe numérique AN3). Un sondage par rotopercussion (chapitre 2) a également été réalisé le long de la section géoélectrique (annexe numérique AN4) COLNLT1 tel que localisé sur la figure 4-36.

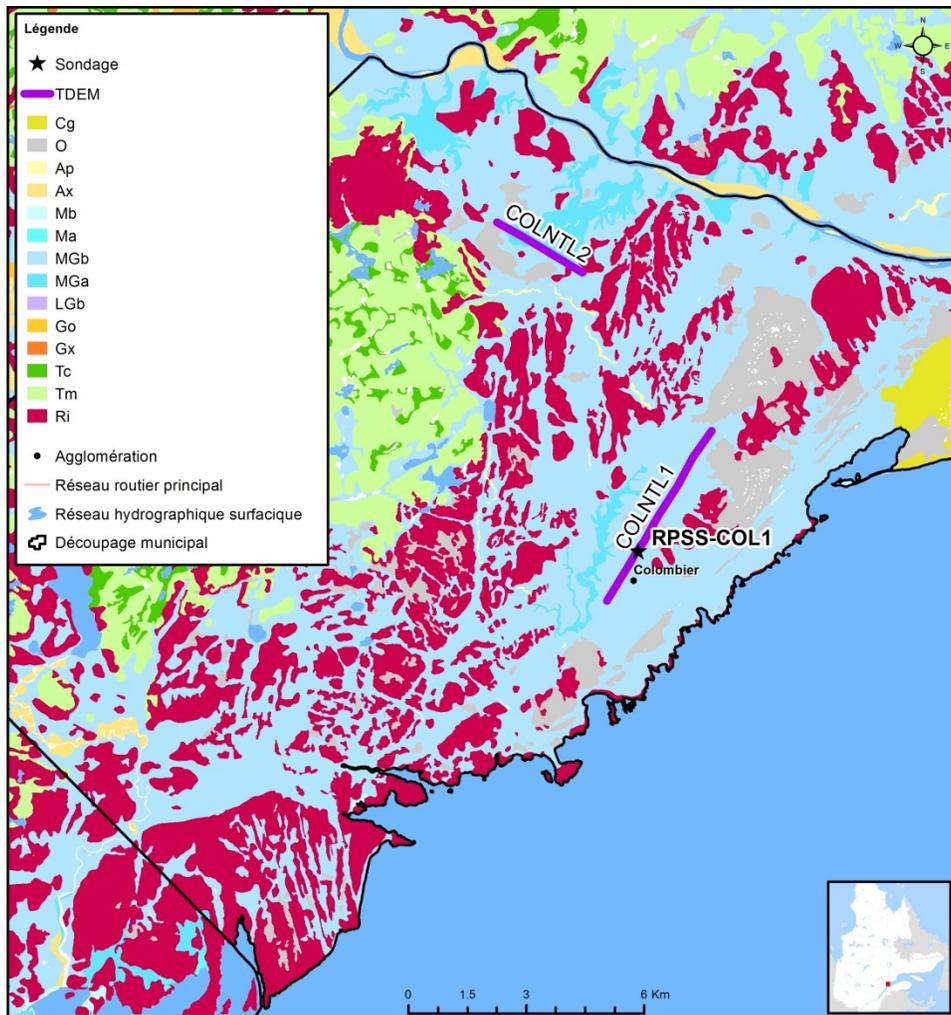


Figure 4-36 : Localisation des deux sections géoélectriques (COLNTL1 et COLNTL2) et du sondage par rotapercussion (RPSS-COL1).

Le sondage par rotapercussion a intercepté les horizons suivants (annexe numérique AN4) :

- 0-2 m : sable;
- 2-22 m : argile et sable;
- 22-35 m : argile.

Les levés géophysiques indiquent une couche d'argile épaisse atteignant jusqu'à 90 m d'épais par endroit (annexe numérique AN3) et localement recouvert d'une couche de sable dont l'épaisseur est d'environ 5 mètres (figure 4-37a). Seule la station 3 de la section géoélectrique COLNTL2 (figure 4-37b) a permis d'interpréter le roc sous une mince couche d'argile.

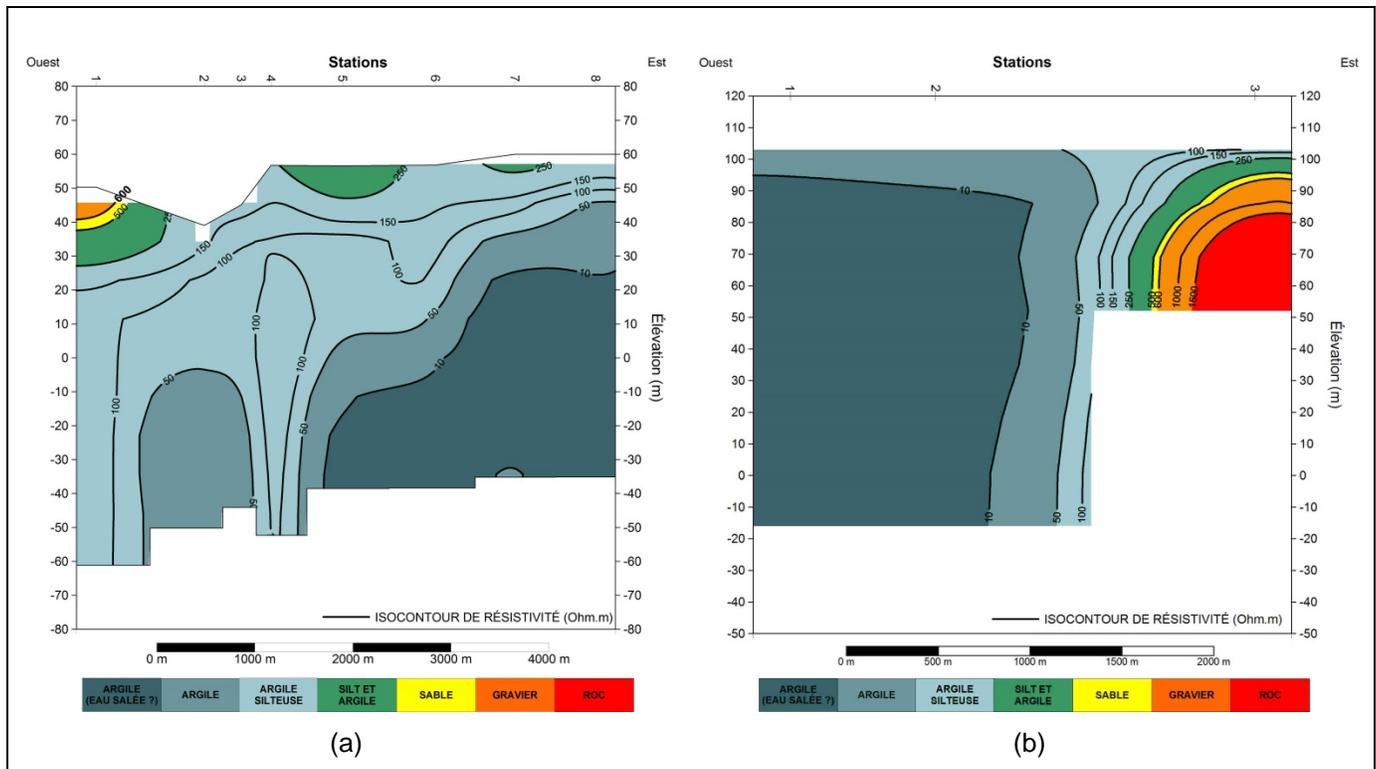


Figure 4-37 : Sections géoélectriques COLNTL1 (a) et COLNTL2 (b).

Le secteur de Colombier se caractérise par d'épais horizons de matériaux fins pouvant atteindre plus de 90 mètres. Ces dépôts sont localement recouverts de sable dont l'épaisseur moyenne varie entre 2 et 10 mètres. Les méthodes utilisées ne permettent pas d'investiguer au-delà d'une centaine de mètres de profondeur. Ainsi, les sédiments profonds lorsque présents et le roc n'ont pas été identifiés au-delà de cette limite.

4.4.2 Forestville

Sur le territoire de la municipalité de Forestville, la stratigraphie a été investiguée à partir de trente levés géophysiques ponctuels réalisés avec la méthode d'*Induction électromagnétique de transition* (chapitre 2) dont les résultats sont présentés en cinq sections géoélectriques (annexe numérique AN3). Trois sondages par rotoperçusion (chapitre 2) dont deux ont été convertis en piézomètre ont également été réalisés sur le territoire dont deux le long de sections géoélectriques (figure 4-38) :

- RPSS-FOR2 au nord de la section géoélectrique FORNLT2;
- RPSS-FOR3 au nord de la section géoélectrique FORNLT1.

Ces sondages ont permis de caler et d'étendre les interprétations des données obtenues par les levés géophysiques.

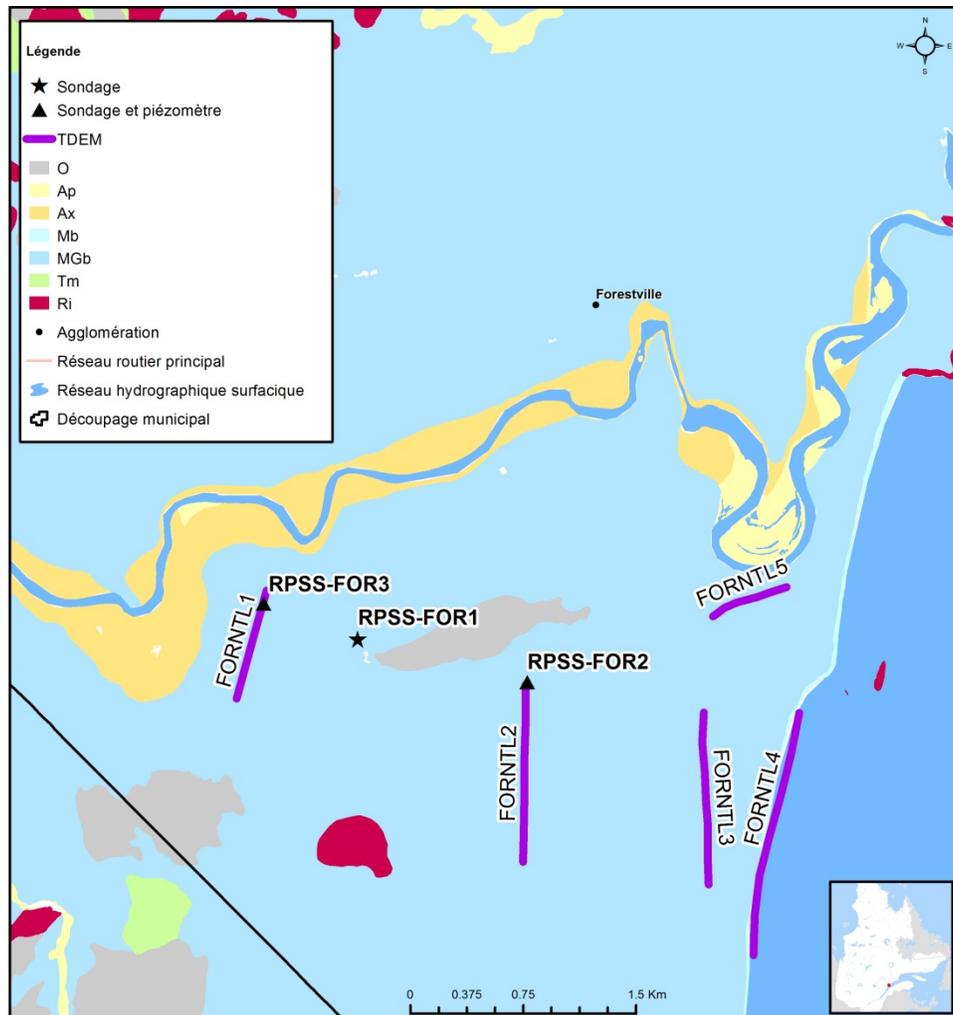


Figure 4-38 : Localisation des cinq sections géoélectriques (FORNTL1, FORNTL2, FORNTL3, FORNTL4 et FORNTL5) et des trois sondages par rotoperçusion (RPSS-FOR1, RPSS-FOR2 et RPSS-FOR3).

Les sondages par rotoperçusion ont intercepté les horizons suivants (annexe numérique AN4) :

- RPSS-FOR1 :
 - 0-15 m : sable avec traces de cailloux;
 - 15-20 m : couche compacte, blocs, cailloux;
 - 20-32 m : argile silteuse interlitée de sable.
- RPSS-FOR2 :
 - 0-2 m : sable et cailloux;
 - 2-7 m : sable et beaucoup de cailloux;
 - 7-12 m : sable fin très compact;
 - 12-20 m : argile silteuse, sable fin très compact.
- RPSS-FOR3 :
 - 0-12,5 m : sable et cailloux;
 - 12,5-20 m : sable silteux;
 - 20-28 m : argile.

Les levés géophysiques indiquent une couche d'argile atteignant jusqu'à 80 m d'épaisseur par endroit (figure 4-39a et figure 4-39c; annexe numérique AN3) ou variant entre 40 et 50 mètres d'épaisseur lorsque des dépôts

de sable et gravier sont identifiés sous la couche d'argile (figure 4-39b et figure 4-39d). Le roc est interprété sous 70 mètres de dépôts sur une seule géosection soit FORLNT2 (figure 4-39b).

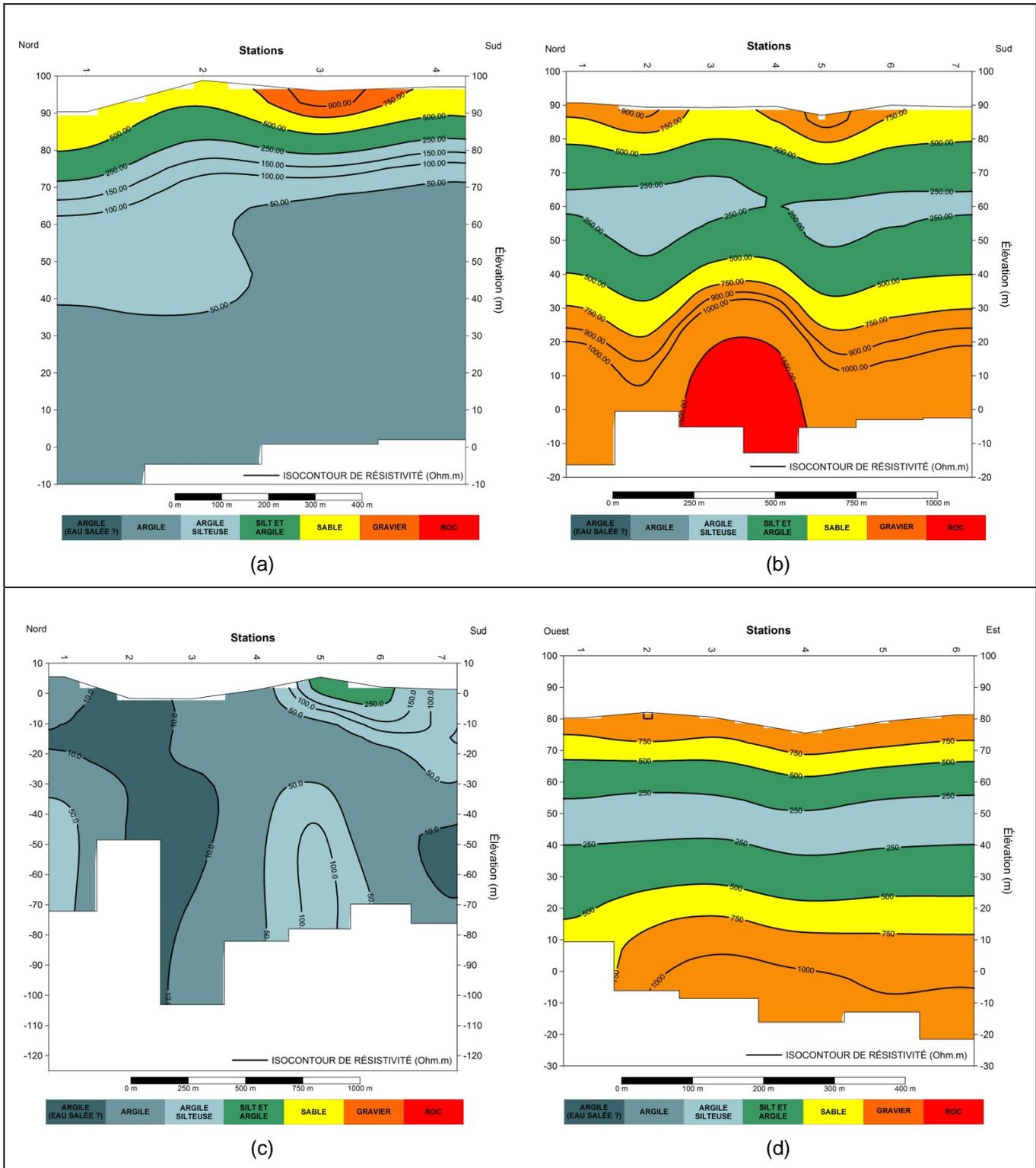


Figure 4-39 : Sections géoélectriques FORNTL1 (a), FORNTL3 (b), FORNTL4 (c) et FORNTL5 (d).

localement plus de 80 mètres. Sous ces couches de silt et d'argile de 40-50 mètres d'épaisseur, des dépôts plus grossiers composés de sable, gravier et cailloux sont interceptés sur 30-40 mètres d'épaisseur ou plus. Le roc est interprété sur une section géoélectrique à 70 mètres de profondeur enfoui sous les dépôts. Les méthodes utilisées limitent l'investigation à une centaine de mètres de profondeur.

4.4.3 Portneuf-sur-Mer

Sur le territoire de la municipalité de Portneuf-sur-Mer, la stratigraphie a été investiguée à partir de seize levés géophysiques ponctuels réalisés avec la méthode *TDEM* (chapitre 2) dont les résultats sont présentés à l'annexe numérique AN3. Trois sondages par rotopercussion (chapitre 2) dont deux ont été convertis en piézomètre, ont également été réalisés sur le territoire. Deux de ces sondages ont permis de caler et d'étendre les interprétations des levés géophysiques (figure 4-40) :

- RPSS-PSM1 au site du levé géophysique ponctuel PORL0ST12;
- RPSS-PSM2 au site du levé géophysique ponctuel PORL0ST3.

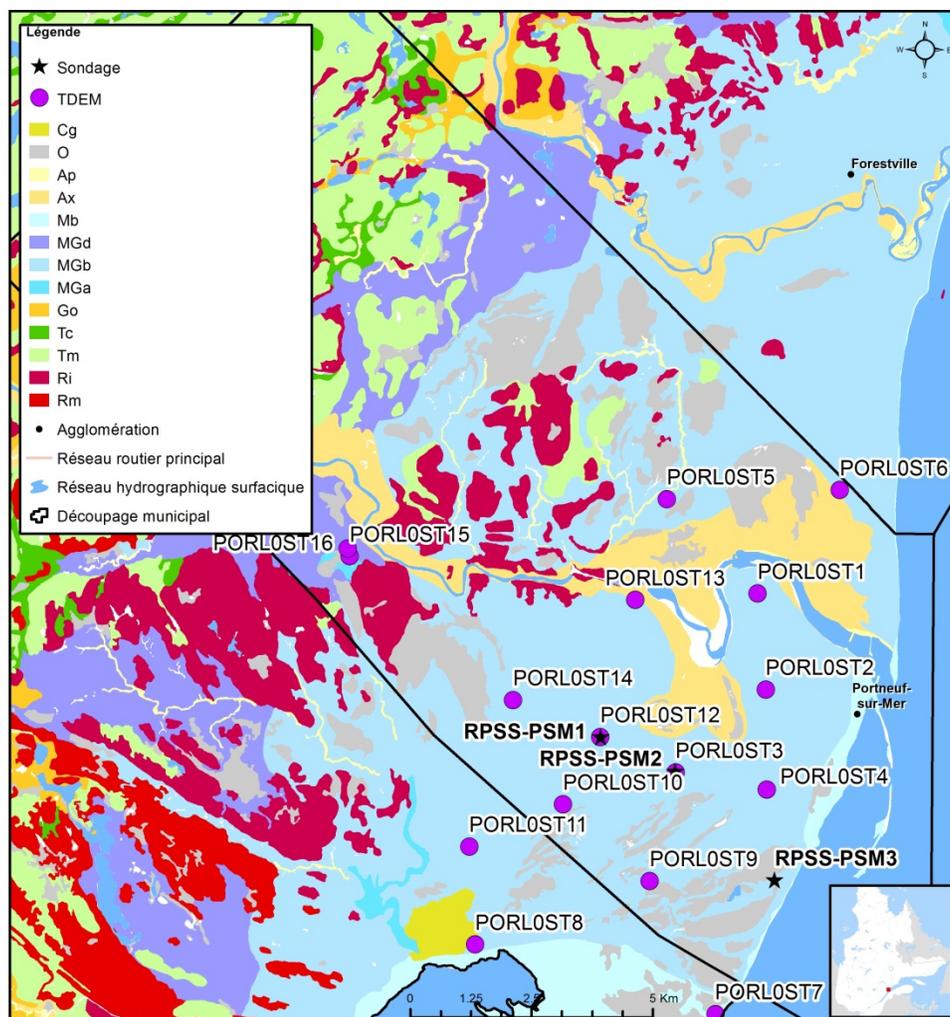


Figure 4-40 : Localisation des seize levés géophysiques ponctuels (PORL0ST1 à PORL0ST16) et des sondages par rotopercussion (RPSS-PSM1, RPSS-PSM2 et RPSS-PSM3).

Les sondages par rotoperçussion ont intercepté les horizons suivants (annexe numérique AN4) :

- RPSS-PSM1 :
 - 0-21 m : sable moyen et gravier;
 - 21-28 m : sable silteux.
- RPSS-PSM2 :
 - 0-6 m : sable et gravier;
 - 6-15 m : silt sableux;
 - 15-24,5 m : silt argileux, argile silteuse;
 - 24,5-28,5 m : argile et argile silteuse interlitée.
- RPSS-PSM3 :
 - 0-20 m : sable compact;
 - 20-21,5 m : silt sableux compact;
 - 21,5-28,5 m : argile silteuse.

La majorité des stations indique une couche de sable d'épaisseur moyenne variant entre 5 et 20 mètres qui recouvre une couche d'argile dont l'épaisseur varie entre 60 et 100 mètres (figure 4-41a et figure 4-41c). La station PORL0ST5 se caractérise par une résistivité électrique de l'ordre de 400 Ω m à 60 m de profondeur, ce qui pourrait correspondre au socle rocheux cristallin (figure 4-41b). C'est la seule station où le roc a pu être interprété.

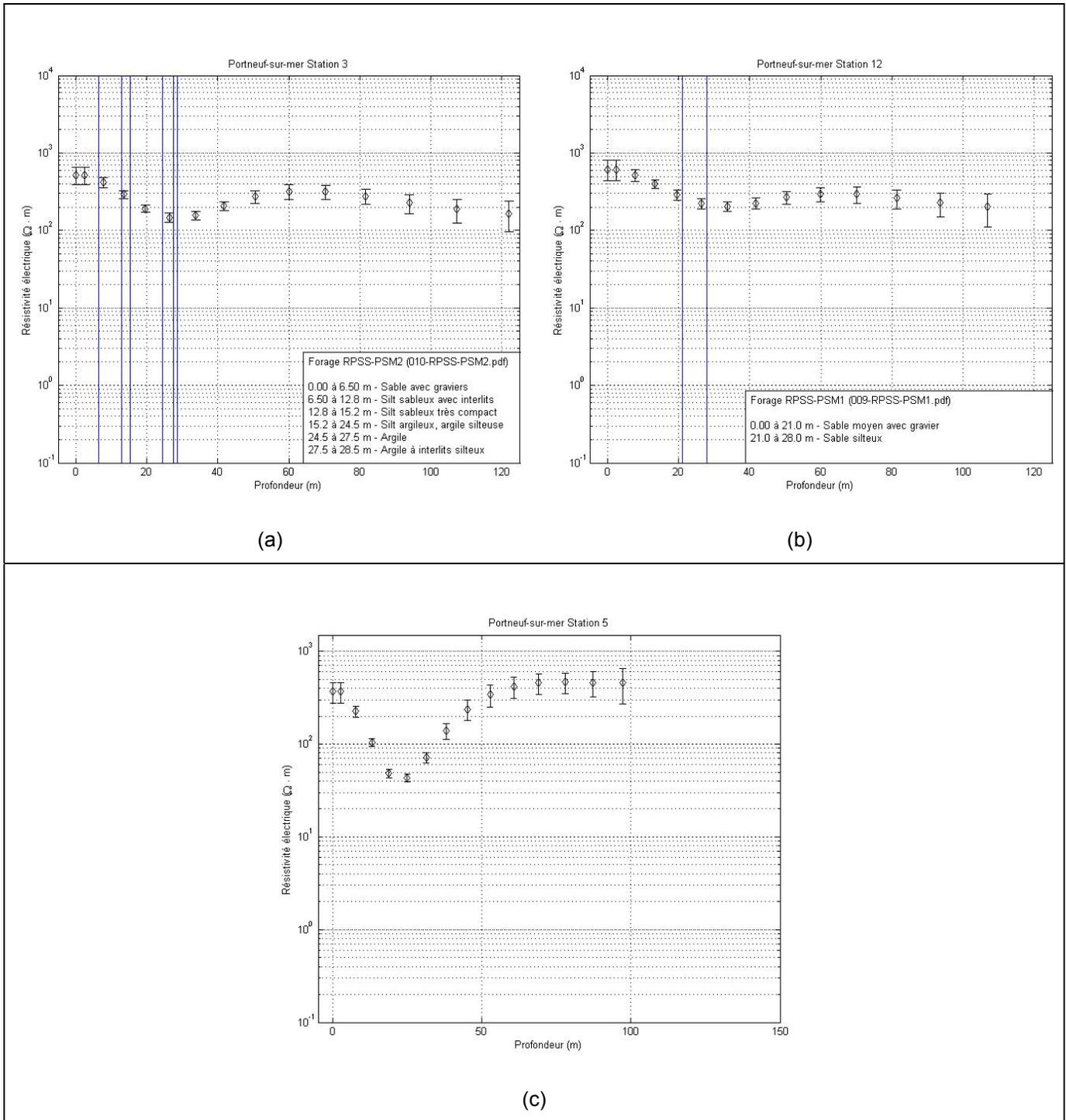


Figure 4-41 : Résistivité électrique correspondant aux levés géophysiques ponctuels P0RL0ST3 (a), P0RL0ST5 (b) et P0RL0ST12 (c). La profondeur se trouve sur l'axe horizontal.

En résumé, les dépôts meubles du secteur de Portneuf-sur-Mer sont constitués en surface d'une couche de sable et gravier ou de sable compact de 5 à 20 mètres d'épaisseur. Sous-jacent à cette couche, des horizons de sable silteux, silt sableux, silt argileux, argile silteux, silt ou argile sont interprétés et ont des épaisseurs pouvant atteindre plus d'une centaine de mètres selon les levés géophysiques. D'autres méthodes d'investigation permettraient de caractériser la stratigraphie au-delà d'une centaine de mètres de profondeur.

4.4.4 Longue-Rive

Sur le territoire de la municipalité de Longue-Rive, la stratigraphie a été investiguée à partir de cinq levés géophysiques ponctuels réalisés avec la méthode *TDEM* (chapitre 2) dont les résultats sont présentés à l'annexe numérique AN3. Ces levés sont localisés sur la figure 4-42.

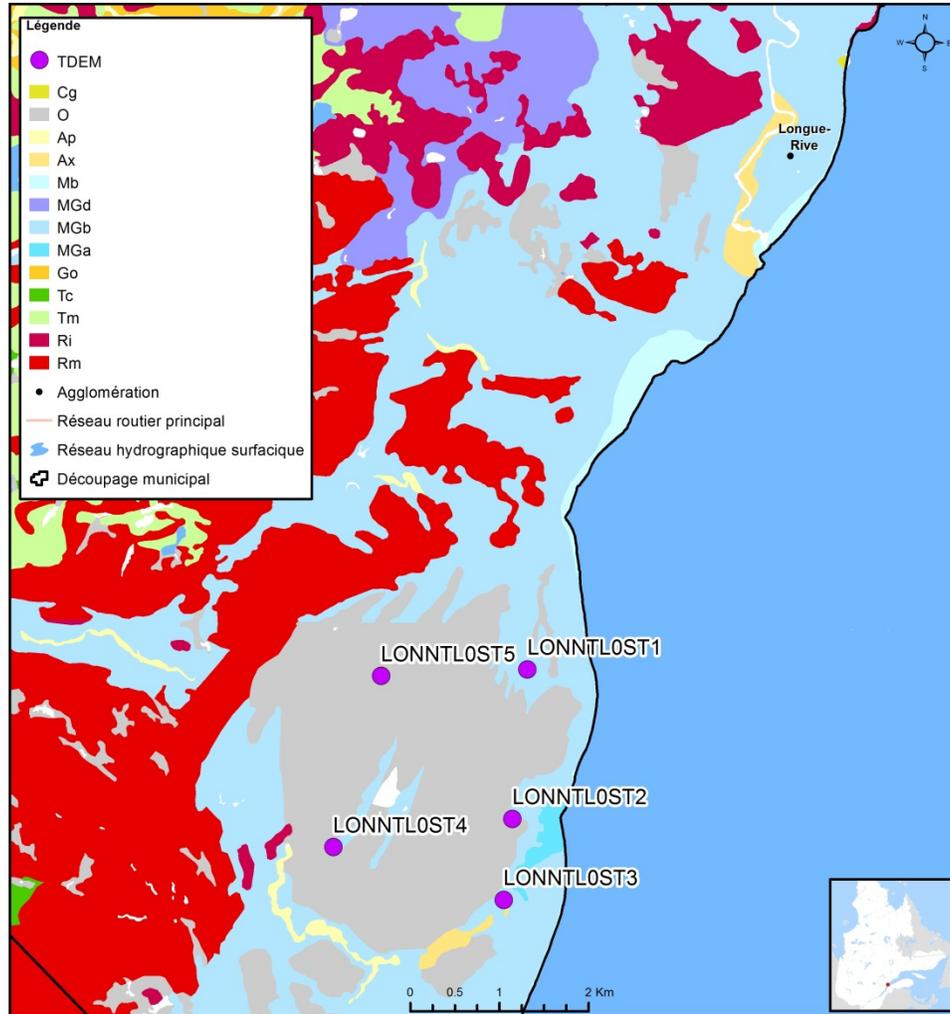


Figure 4-42 : Localisation des cinq levés géophysiques ponctuels (LONNTL0ST1 à LONNTL0ST5).

La majorité des stations indique une couche de sable en surface dont l'épaisseur est d'environ 10 mètres. Cette couche recouvre une épaisse couche d'argile interprétée jusqu'à 50 à 60 mètres de profondeur (figure 4-43a et figure 4-43b). Aucune station n'indique un intervalle de résistivité représentative de la signature du roc calcaire ou cristallin.

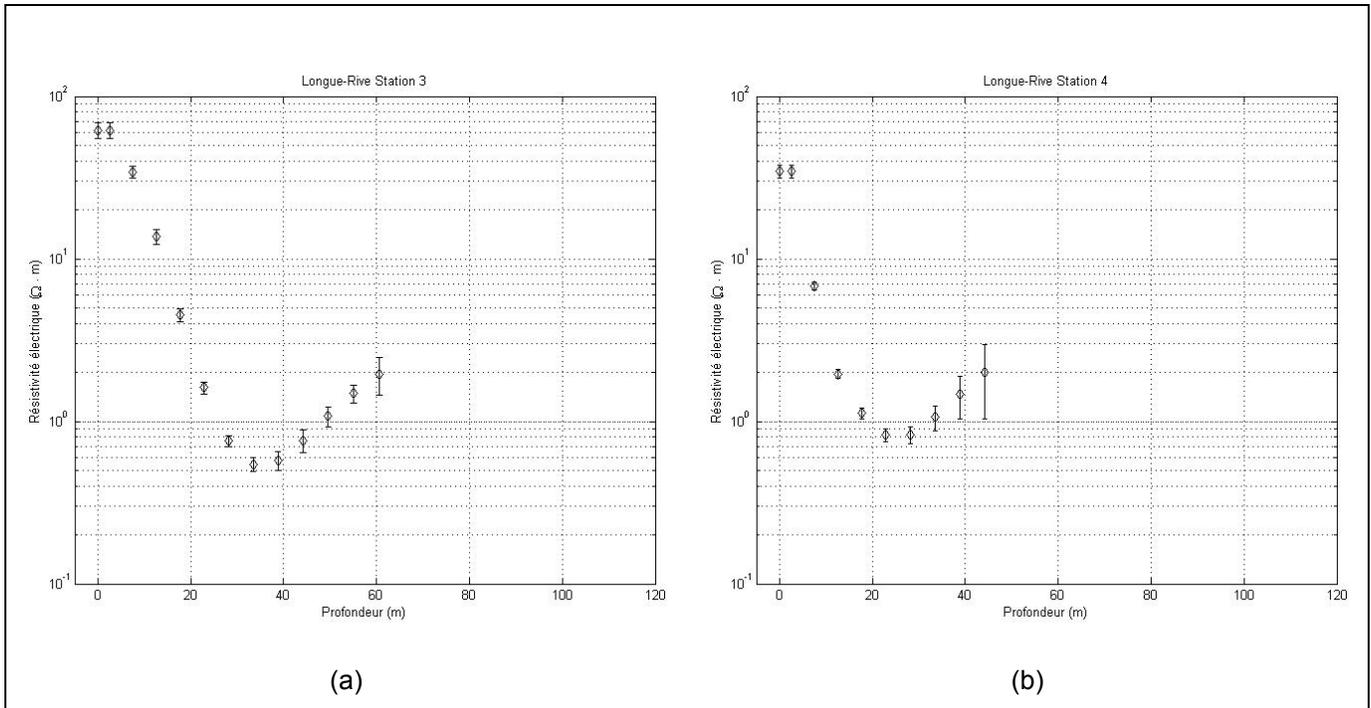


Figure 4-43 : Résistivité électrique correspondant aux levés géophysiques ponctuels LONNTL0ST3 (a) et LONNTL0ST4 (b). La profondeur se trouve sur l'axe horizontal.

En résumé, les dépôts meubles du secteur de Longue-Rive sont constitués en surface d'une couche d'environ 10 mètres de sable suivi d'un horizon d'argile de plus de 50 à 60 mètres de profondeur. Les méthodes utilisées ne permettent pas d'investiguer au-delà de 50 à 60 mètres de profondeur dans ce secteur.

4.4.5 Les Escoumins

Sur le territoire de la municipalité des Escoumins, la stratigraphie a été investiguée à partir de seize levés géophysiques ponctuels réalisés avec la méthode *TDEM* (chapitre 2) dont les résultats sont présentés en quatre sections géoélectriques (figure 4-44; annexe numérique AN3) : LESNTL1, LESNTL2, LESNTL3 et LESNTL4.

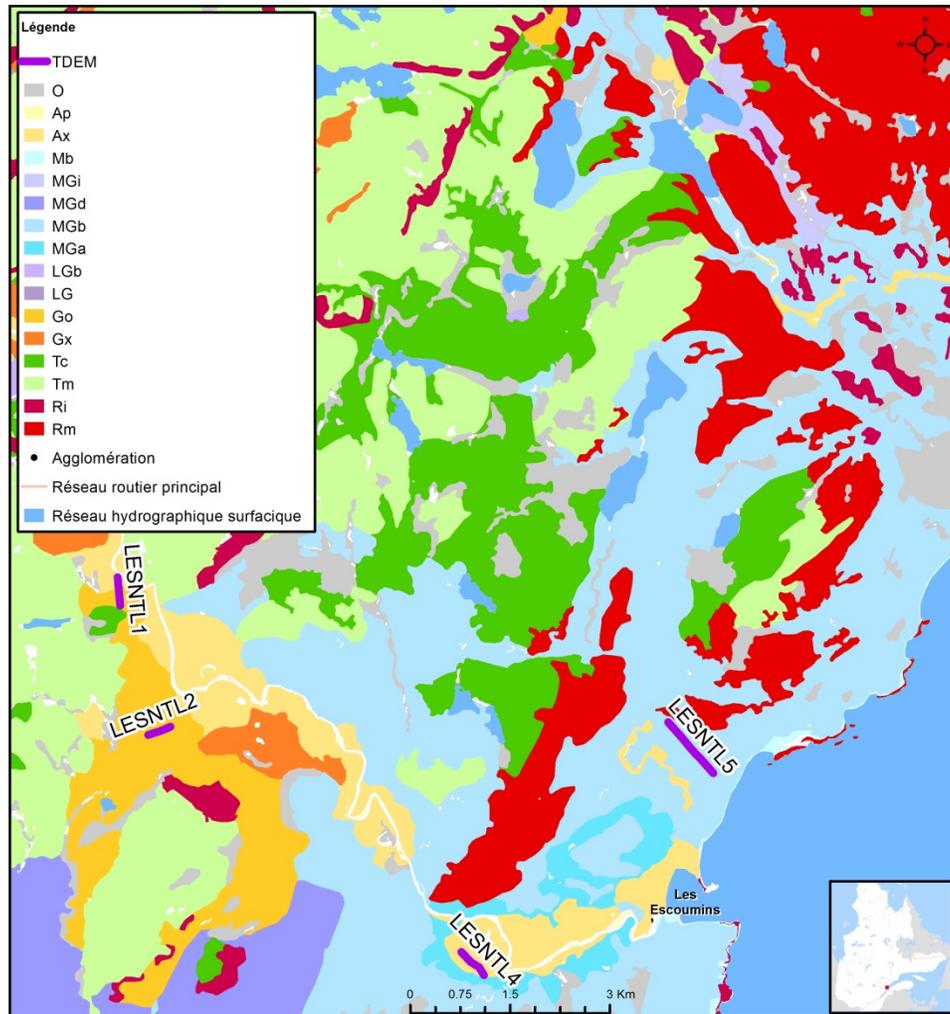


Figure 4-44 : Localisation des quatre sections géoélectriques (LESNTL1, LESNTL2, LESNTL3 et LESNTL4).

La section LESNTL1 (figure 4-45a) montre une couche de sable en surface de 10 à 15 mètres d'épaisseur qui recouvre un dépôt de silt et d'argile d'environ 25 mètres d'épaisseur. Une couche de sable et gravier de 10 à 15 mètres d'épaisseur est confinée entre les matériaux fins de silt et d'argile et le socle rocheux cristallin. La section LESNTL2 (figure 4-45b) montre un contexte similaire où le sable en surface n'est présent que localement.

Les sections LESNTL4 (figure 4-45c) et LESNTL5 (figure 4-45d) présentent des couches de matériaux fins (silt et argile) dont l'épaisseur varie entre 15 et 80 mètres (figure 4-45d). Comme les sections LESNTL1 et LESNTL2, les matériaux fins recouvrent une couche de sable et gravier avant d'atteindre le socle rocheux cristallin.

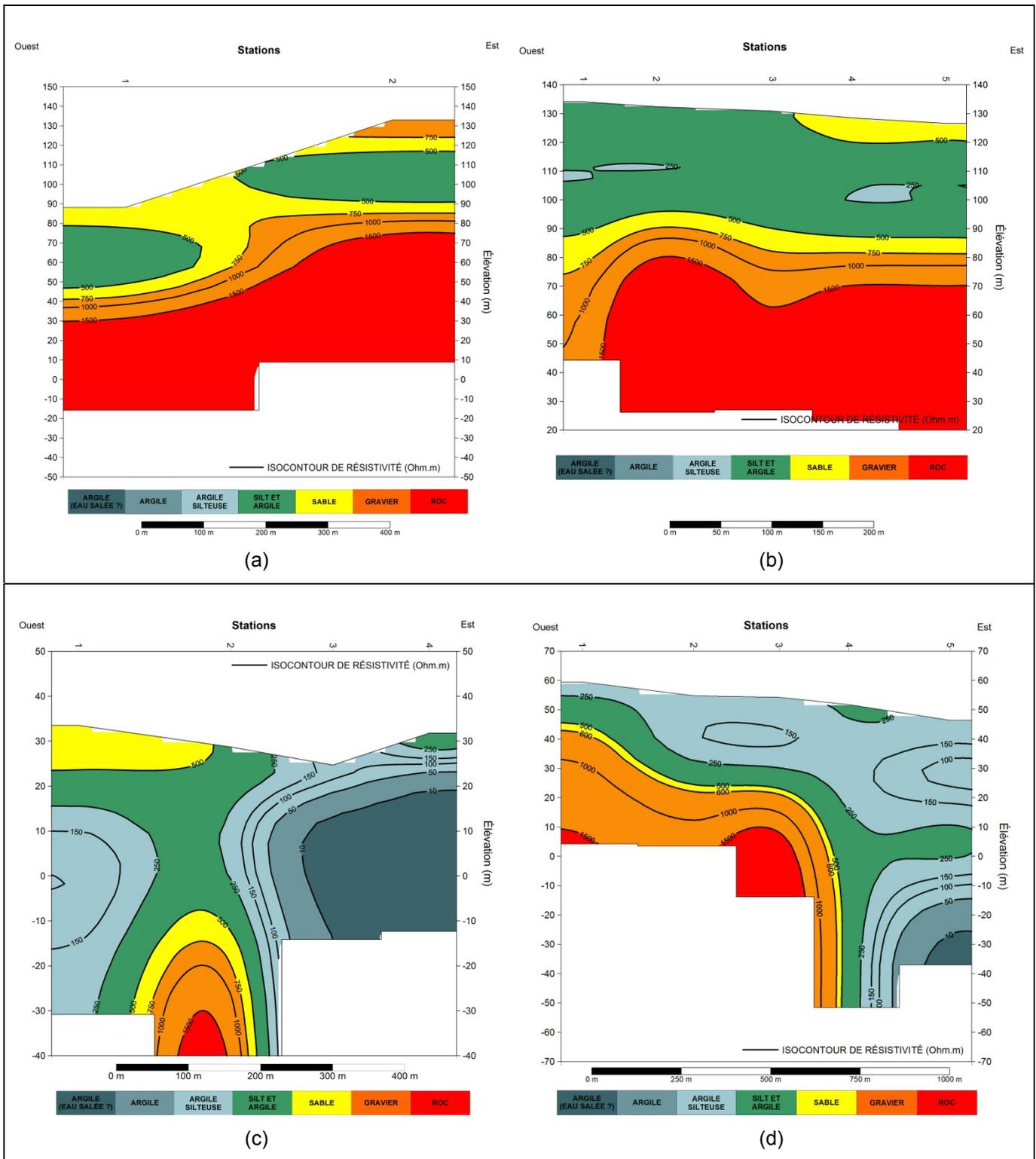


Figure 4-45 : Sections géoélectriques LESNTL1 (a), LESNTL2 (b), LESNTL4 (c) et LESNTL5 (d).

En résumé, les dépôts meubles du secteur ouest des Escoumins (figure 4-44) sont constitués d'un horizon sablonneux d'environ 10 mètres de sable suivi d'un horizon de silt et d'argile de 25 mètres sus-jacent à une couche de sable et gravier d'une quinzaine de mètres d'épais avant d'atteindre le roc. À l'est (figure 4-44), des

dépôts de silt et d'argile d'épaisseur de 15 à plus de 80 mètres sont identifiés. Ils sont localement recouverts d'un horizon d'une dizaine de mètres d'épaisseur de sable. Sous les matériaux fins sont interprétés des couches de sable et gravier sur 20 à 30 mètres d'épaisseur avant d'atteindre le roc. Les méthodes utilisées permettent d'investiguer une profondeur variant de 40 à 100 mètres de profond selon le levé ponctuel.

4.4.6 Les Bergeronnes

Sur le territoire de la municipalité des Bergeronnes, la stratigraphie a été investiguée à partir de trois levés géophysiques ponctuels réalisés avec la méthode *TDEM* (chapitre 2) dont les résultats sont présentés à l'annexe numérique AN3. Quatre sondages par rotopercussion (chapitre 2) et un sondage au piézocône convertis en piézomètre ont permis d'investiguer le secteur (annexe numérique AN4). Le sondage par rotopercussion RPSS-BER2 est localisé au même endroit que le sondage au piézocône. Trois de ces sondages ont permis de caler et d'étendre les interprétations des données obtenues par les levés géophysiques (figure 4-46) :

- RPSS-BER2 au site du levé géophysique ponctuel BERNTL1ST3;
- RPSS-BER3 au site du levé géophysique ponctuel BERNTL1ST2;
- RPSS-BER4 au site du levé géophysique ponctuel BERNTL1ST1.

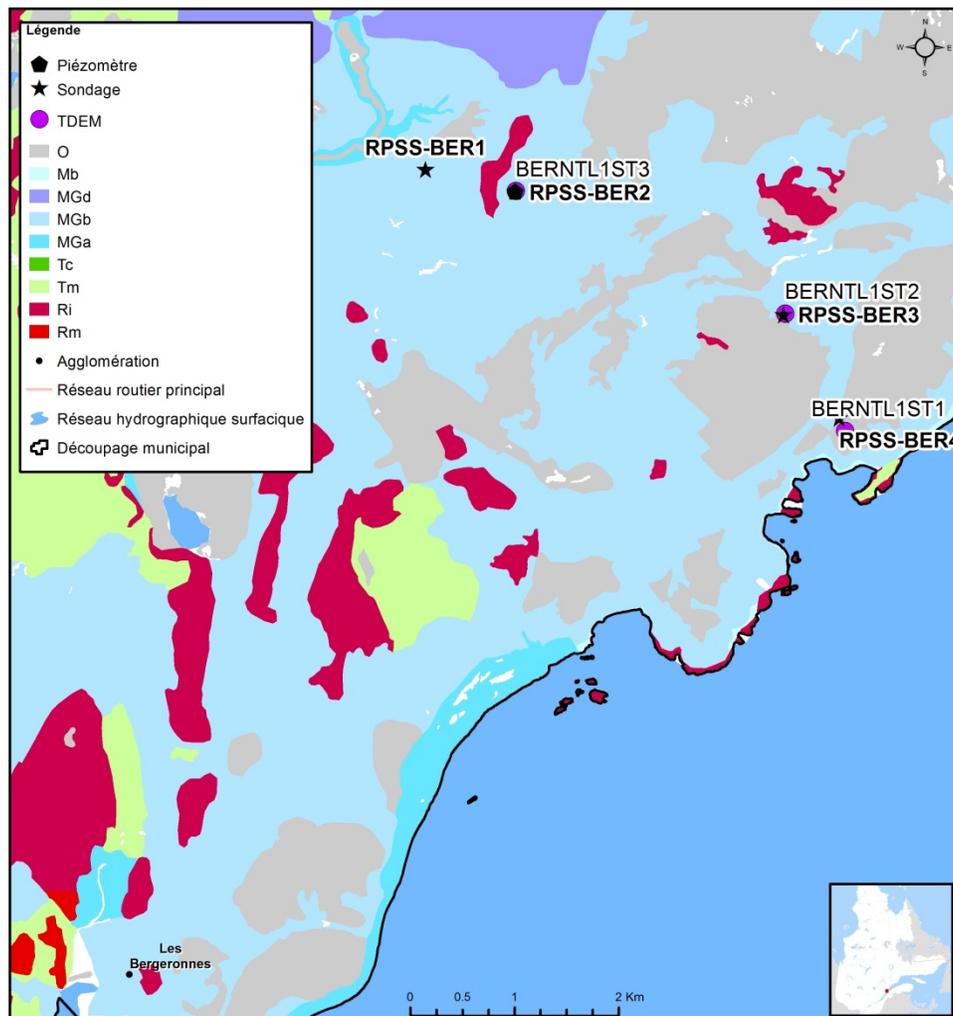


Figure 4-46 : Localisation des trois levés géophysiques ponctuels (BERNTL1ST1, BERNTL1ST2 et BERNTL1ST3) et des trois sondages par rotopercussion (RPSS-BER1, RPSS-BER3, RPSS-BER4) et d'un sondage au piézocône (RPSS-BER2).

Les sondages par rotopercussion ont intercepté les horizons suivants (voir annexe numérique AN4) :

- RPSS-BER1 :
 - 0-5 m : sable;
 - 5-13 m : sable fin ou silt;
 - 13-28m : argile silteuse.
- RPSS-BER2 :
 - 0-12 m : sable;
 - 12-29 m : sable fin, silt;
 - 29-29,5 m : argile silteuse.
- CPT-BER2 :
 - 0-1 m : argile et silt;
 - 1-1,5 m : silt sableux;
 - 1,5-10,5 m : sable fin interlité de sable moyen;
 - 10,5-22 m : sable moyen interlité de sable grossier.
- RPSS-BER3 :
 - 0-2 m : sable;
 - 2 m : roc.
- RPSS-BER4 :
 - 0-6 m : argile;
 - 6-9 m : till (argile, cailloux);
 - 9-18 m : beaucoup de cailloux (roc?).

De façon générale, les sondages par rotopercussion et au piézocône placés sur une même coupe stratigraphique (figure 4-47) montrent qu'une couche de sable pouvant atteindre 25 mètres d'épaisseur recouvre l'argile dont l'épaisseur varie entre 5 et plus de 15 mètres lorsqu'elle est présente. Le roc est recouvert par des dépôts meubles sur des épaisseurs variant entre 2 et plus de 30 mètres.

Bien que les sondages RPSS-BER2 et CPT-BER2 soient localisés au même endroit, leur stratigraphie globale se distingue, notamment entre 10 et 22 mètres le CPT-BER2 indique un sable moyen interlité de sable grossier tandis que le RPSS-BER2 indique plutôt du sable fin et silt.

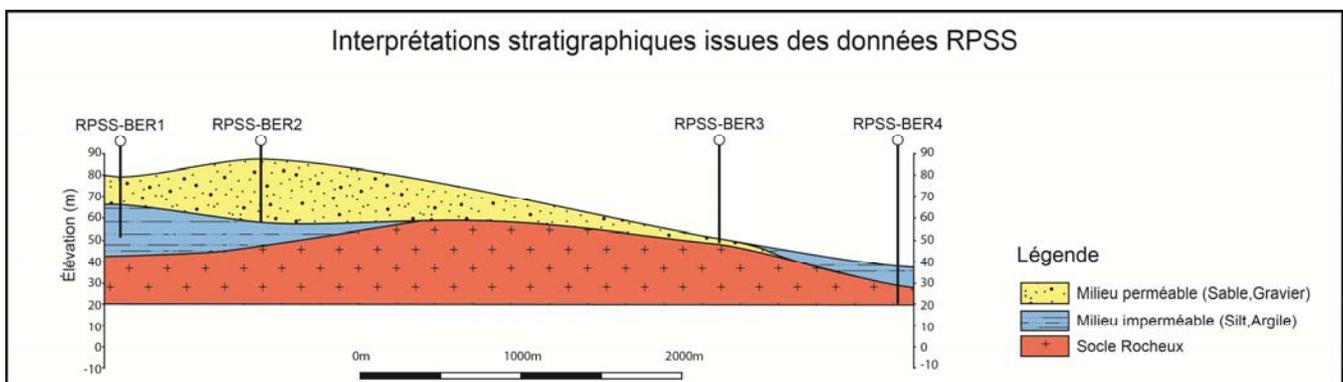


Figure 4-47 : Coupe stratigraphique orientée NW-SE présentant la stratigraphie obtenue à partir des sondages par rotopercussion.

Les données obtenues par les levés géophysiques indiquent toutefois une épaisseur de dépôt pouvant atteindre 60 mètres, ce qui contredit l'information obtenue par les sondages par rotopercussion (figure 4-48). La présence de blocs au sein du dépôt pourrait expliquer cette contradiction. Ce secteur nécessite des travaux d'investigation

additionnels pour mieux comprendre le contexte stratigraphique, principalement l'épaisseur des dépôts meubles recouvrant le socle rocheux.

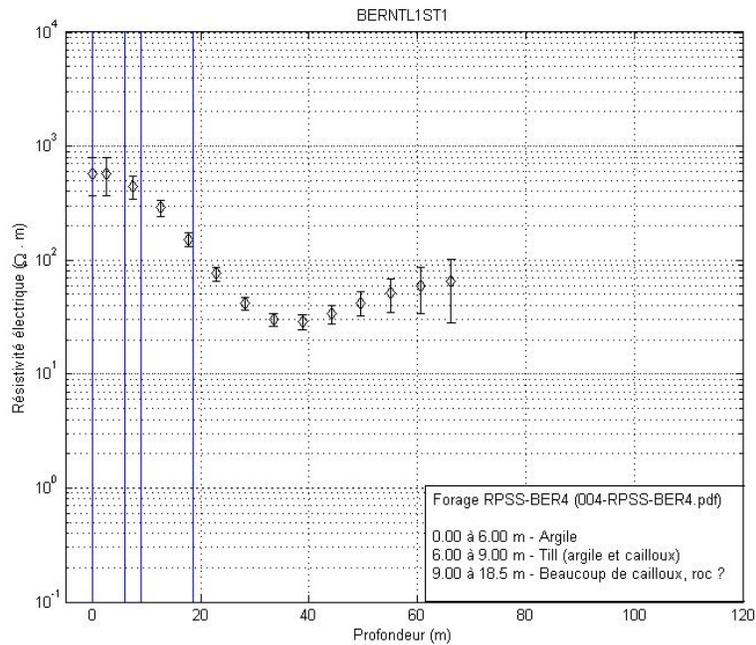


Figure 4-48 : Résistivité électrique correspondant au levé géophysique ponctuel BERNTL1ST1.

Bien que ce secteur nécessite des travaux additionnels, les informations obtenues par les travaux effectués dans le cadre du projet PACES-CHCN peuvent être résumés. Ainsi, les dépôts meubles du secteur des Bergeronnes sont constitués localement d'un horizon superficiel de sable dont l'épaisseur est d'environ 5-10 mètres. Sous-jacent à cette couche se trouve un horizon d'argile discontinu d'épaisseur variant entre 6 et plus de 15 mètres d'épaisseur. Toutefois, l'épaisseur d'argile peut atteindre plus de 60 mètres selon les levés géophysiques. Les méthodes utilisées permettent d'investiguer une profondeur variant de 25-30 à 65 mètres de profondeur.

4.4.7 Sacré-Coeur

Sur le territoire de la municipalité de Sacré-Coeur, la stratigraphie a été investiguée à partir de treize levés géophysiques ponctuels réalisés avec la méthode d'*Induction électromagnétique de transition* ou *TDEM* (*Time-Domain Electromagnetism*) (chapitre 2) pour lesquels quatre d'entre eux sont présentés sur une section géoélectrique SACNTL1 (figure 4-49; annexe numérique AN3). Deux sondages par rotopercussion (chapitre 2) dont un a été converti en piézomètre ont également été réalisés sur le territoire à proximité de la section géoélectrique (figure 4-49). Ces sondages ont permis de caler et d'étendre les interprétations des données obtenues par les levés géophysiques.

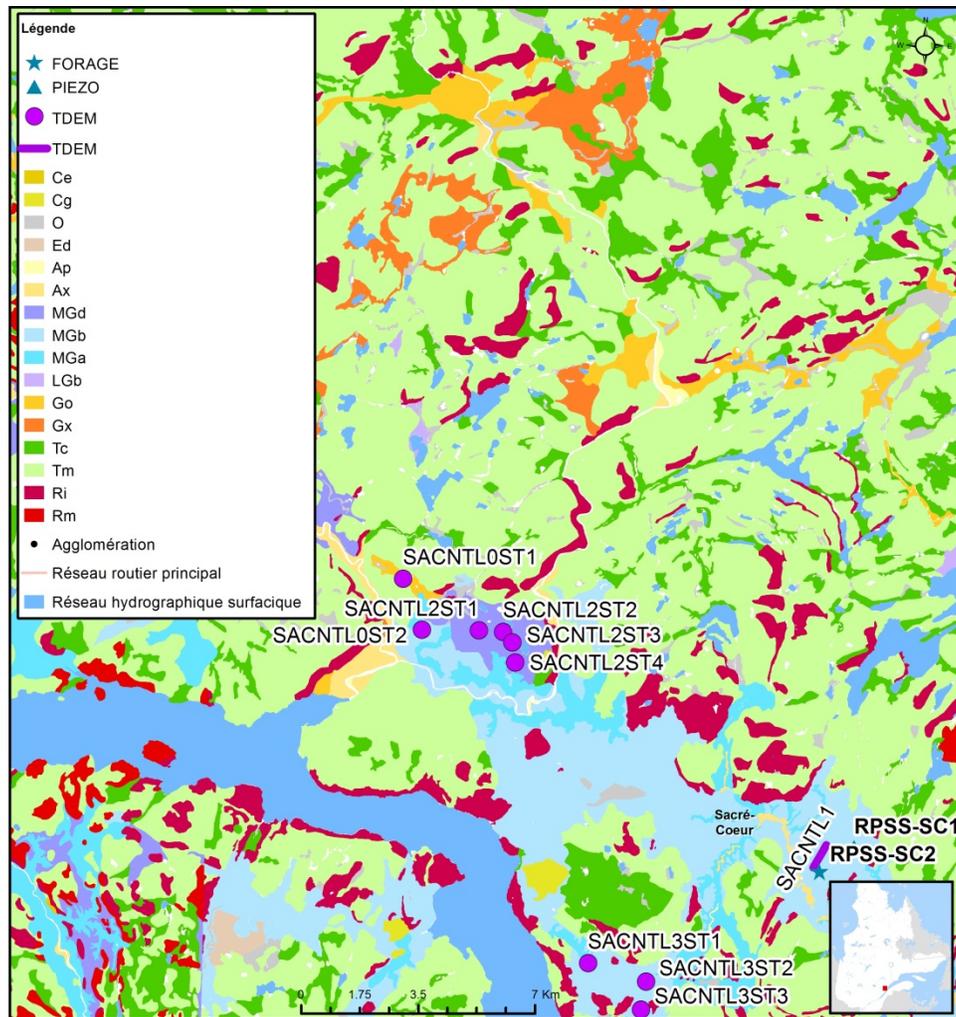


Figure 4-49 : Localisation des neuf levés géophysiques ponctuels (SACNTL0ST1, SACNTL0ST2, SACNTL2ST1 à SACNTL2ST4, SACNTL3ST1 à SACNTL3ST3), de la section géoélectrique (SACNTL1) et des deux sondages par rotopercussion (RPSS-SC1 et RPSS-SC2).

Les sondages par rotopercussion ont intercepté les horizons suivants (voir annexe numérique AN4) :

- RPSS-SC1 :
 - 0-13 m : argile et silt argileux;
 - 13-15 m : sable fin;
 - 15-27 m : silt, sable fin, argile.
- RPSS-SC2 :
 - 0-20 m : argile interlitée de silt et de sable;
 - 20-29 m : silt sableux.

Les deux levés localisés le plus au nord-ouest (SACNTL0ST1 et SACNTL0ST2) montrent des épaisseurs de sable et gravier entre 50 et 70 mètres (annexe numérique AN3). À la station SACNTL0ST1 la signature correspondant au roc cristallin apparaît à 50 m de profondeur (figure 4-50a). Les quatre levés SACNTL2ST1 à SACNTL2ST4 (annexe numérique AN3) montrent des épaisseurs de sable d'environ 10 mètres d'épaisseur qui recouvre une couche d'environ 60 mètres d'argile (figure 4-50b). Le profil de résistivité ne permet pas de reconnaître le socle rocheux. Les trois levés SACNTL3ST1 à SACNTL3ST3 (annexe numérique AN3) indiquent

une couche de sable d'environ 10 m sur une couche d'argile de même épaisseur. Sous l'argile, la résistivité électrique plus de 100 Ωm correspond à la signature du sable et gravier (figure 4-50c).

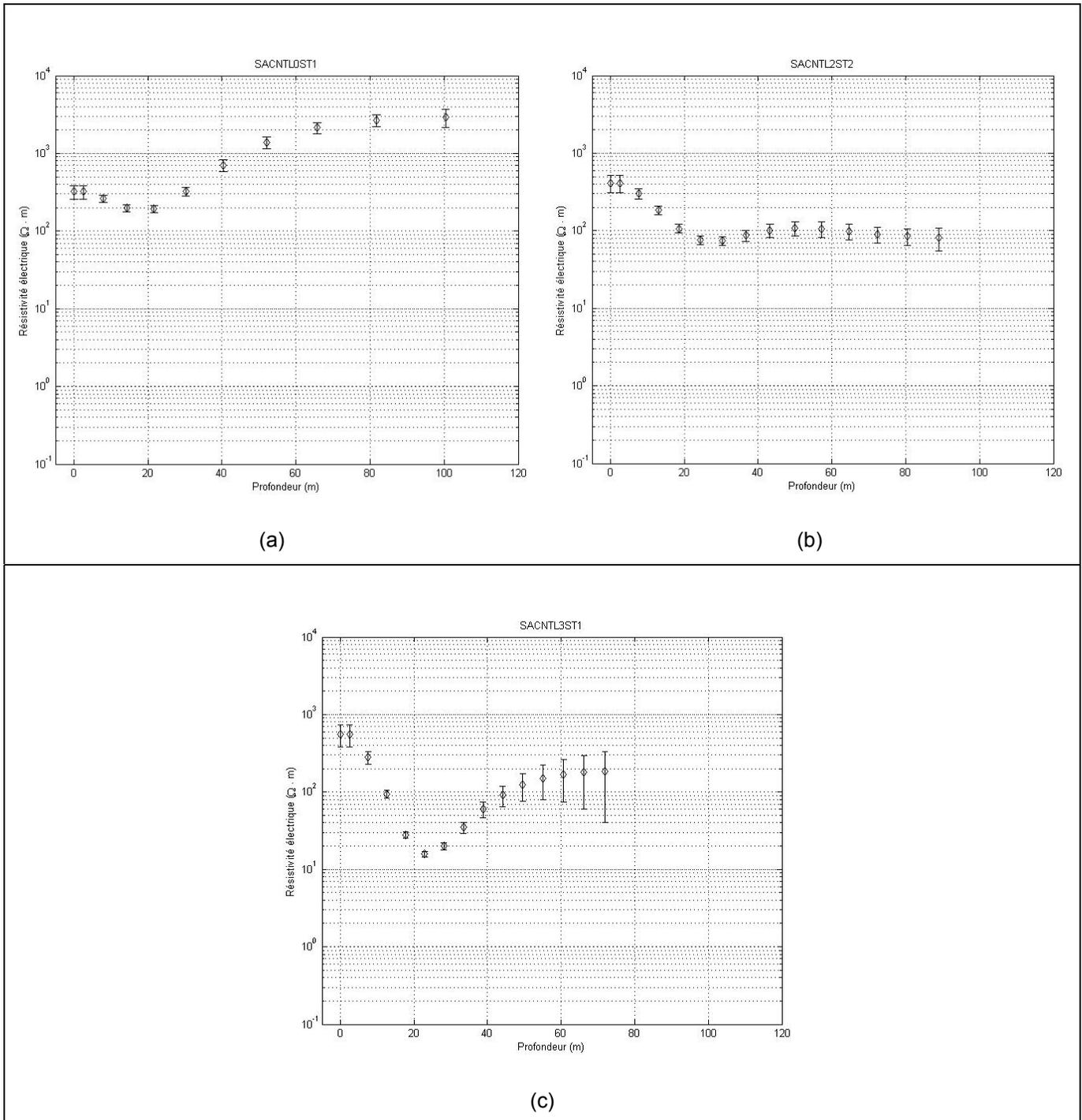


Figure 4-50 : Résistivité électrique correspondant aux levés géophysiques ponctuels SACNTL0ST1 (a), SACNTL2ST2 (b) et SACNTL3ST1 (c).

La section géoélectrique SACNTL1 présentée à la figure 4-51 montre une couche d'argile dont l'épaisseur varie entre 70 et 100 mètres. Cette couche d'argile est localement recouverte d'une mince couche de sable d'environ 5 mètres d'épaisseur.

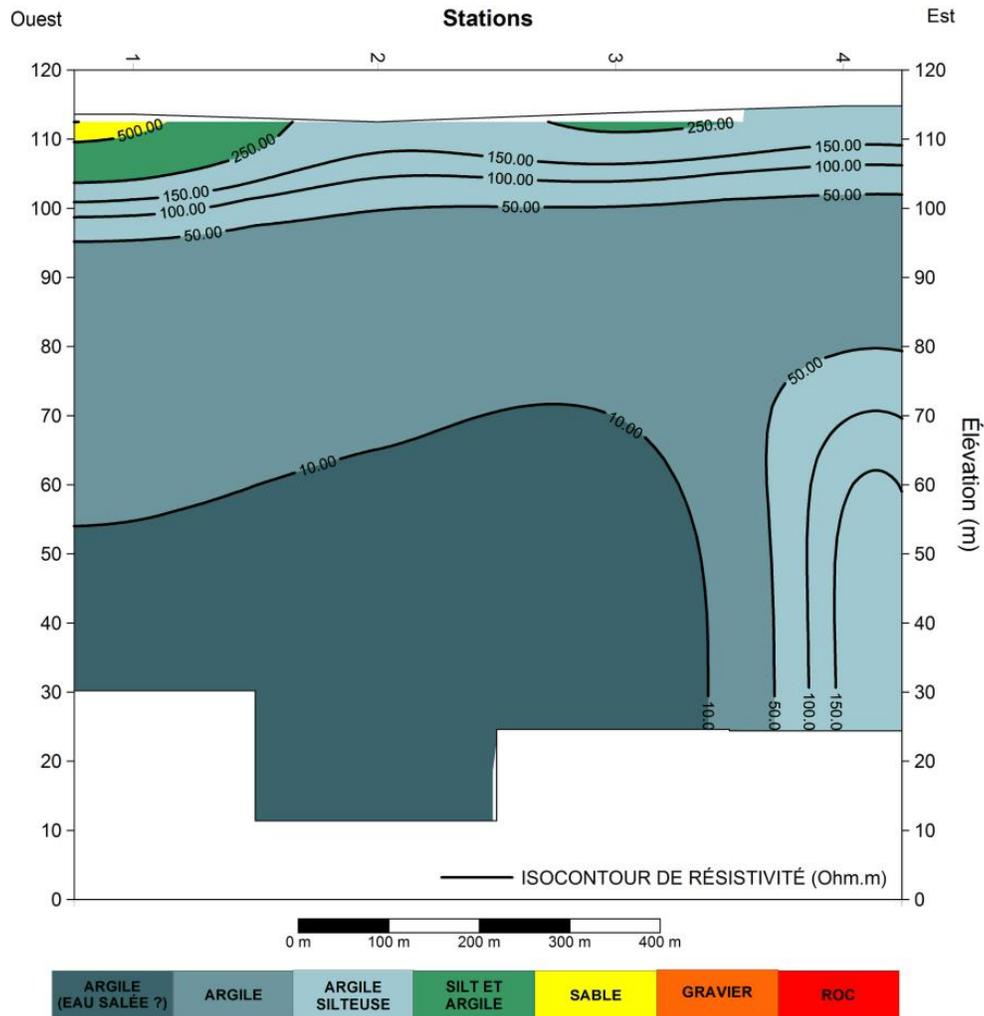


Figure 4-51 : Section géoélectrique SACNTL1.

Trois sites ont été investigués dans la municipalité de Sacré-Cœur. Le site au nord-ouest (figure 4-49) de la municipalité se caractérise par une couche de sable et gravier qui peut atteindre 50 à 70 mètres d'épais avant d'atteindre le roc. Dans ce même secteur, lorsque cette couche de sable est d'une dizaine de mètres d'épaisseur, elle recouvre une couche d'argile dont l'épaisseur est d'environ 60 mètres d'épais. C'est ce même contexte qui est observé dans le secteur nord-est (figure 4-49) de la municipalité investigué par des levés géophysiques.

Le site localisé au sud de la municipalité (figure 4-49) montre une couche de sable d'environ 10 mètres d'épais suivi d'une couche d'argile également d'une épaisseur d'une dizaine de mètres avant d'atteindre une couche de sable et gravier de plus de 50 mètres d'épais. La signature du roc n'a pas été identifiée. Les méthodes utilisées permettent d'investiguer une profondeur maximale de 100 mètres de profondeur.

4.4.8 Saint-Siméon

Sur le territoire de la municipalité de Saint-Siméon, la stratigraphie a été investiguée à partir de onze levés géophysiques ponctuels réalisés avec la méthode d'*Induction électromagnétique de transition* ou *TDEM* (*Time-Domain Electromagnetism*) (chapitre 2) qui sont répartis sur trois sections géoélectriques STSNTL1, STSNTL2 et STSNTL3 (figure 4-52; annexe numérique AN3). D'autres levés géophysiques ont été effectués par résistivité électrique (chapitre 2; annexe numérique AN3). Ces levés ont été utilisés pour appuyer l'interprétation des levés *TDEM*.

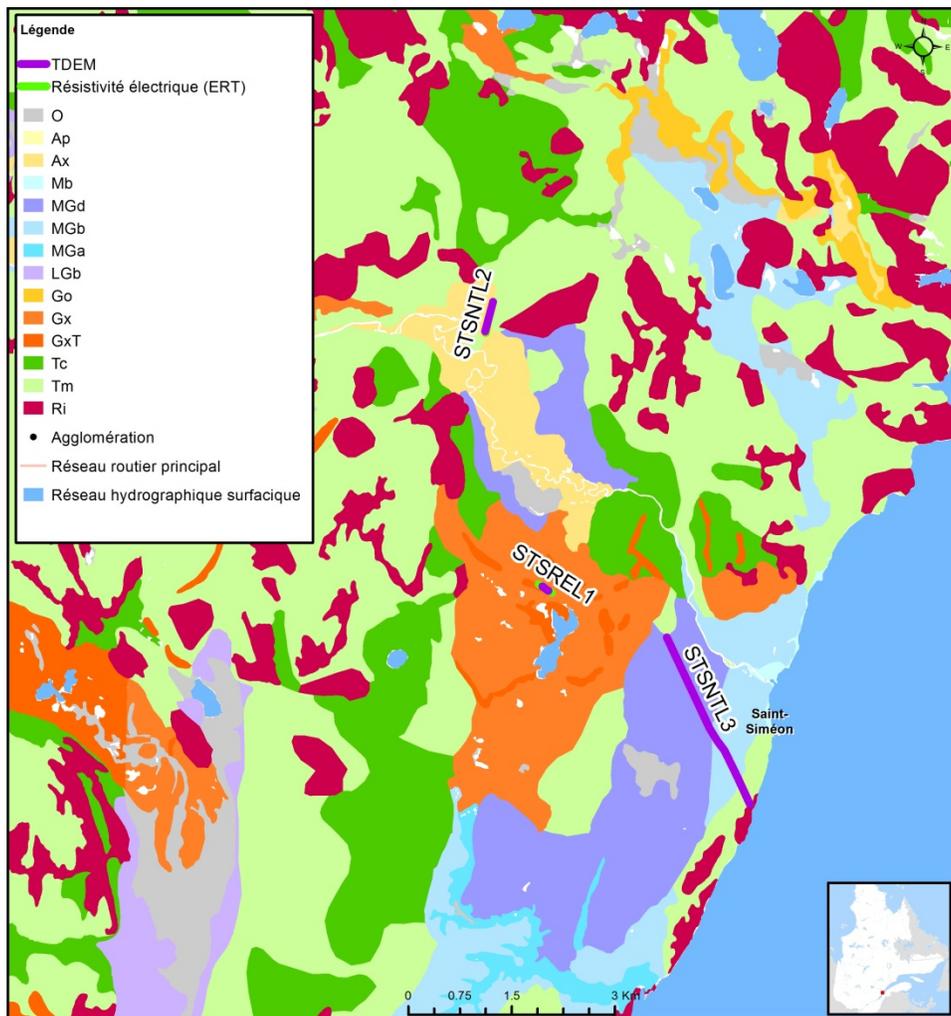


Figure 4-52 : Localisation des trois sections géoélectriques (STSNTL1, STSNTL2 et STSNTL3) et des deux profils de résistivité électrique (STSREL1 et STSREL2).

Les sections géoélectriques STSNTL1, STSNTL2 (figure 4-53a) et STSNTL3 (figure 4-53b) montrent une couche de sable dont l'épaisseur varie entre 5 et 20 mètres. Sous-jacent à cette couche, un horizon d'argile et silt d'une trentaine de mètres d'épaisseur recouvre une couche de sable et gravier d'environ 20 mètres d'épais avant d'atteindre le socle rocheux.

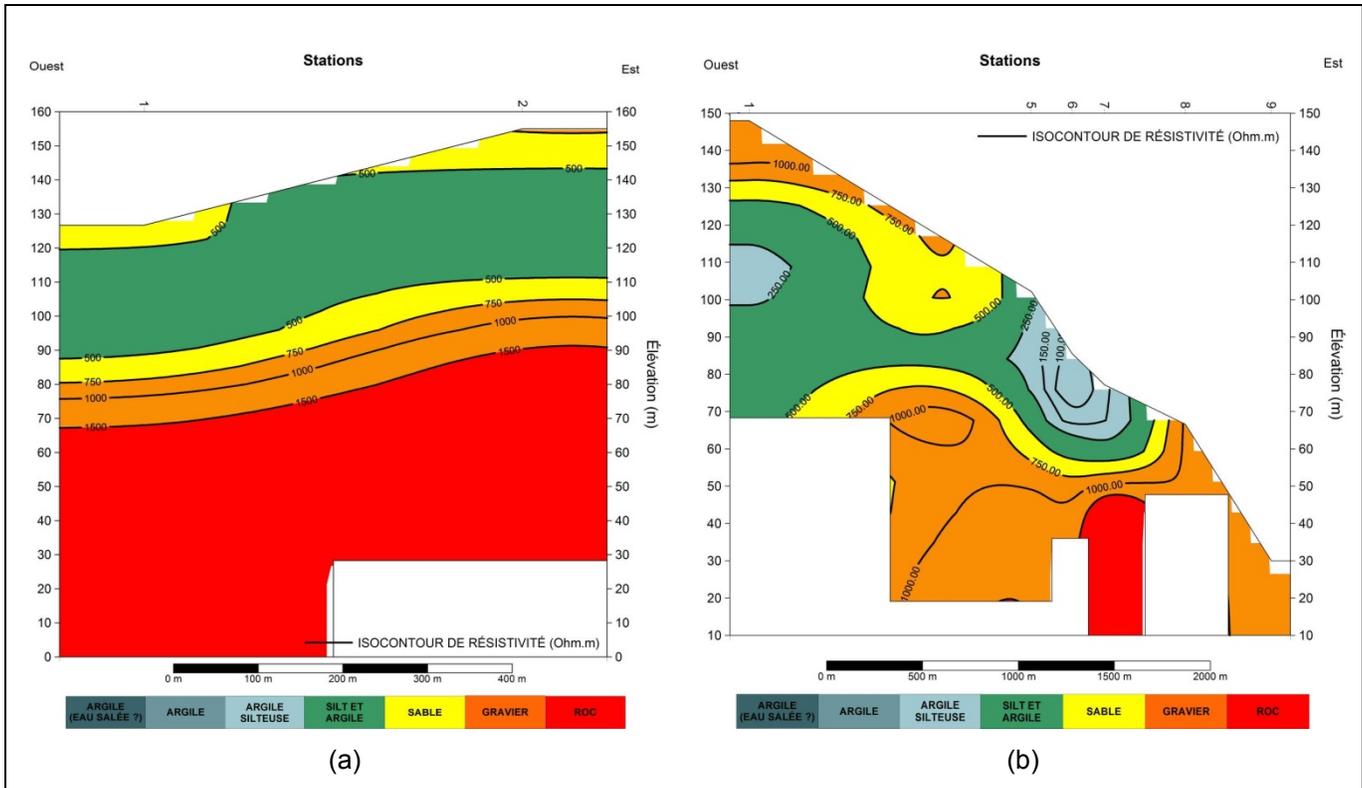


Figure 4-53 : Sections géoélectriques STSNTL2 (a) et STSNTL3 (b).

De façon générale, une couche de sable dont l'épaisseur varie entre 5 et 20 mètres recouvre un horizon de silt et d'argile d'épaisseur moyenne de 30 mètres avant d'atteindre une couche de sable et gravier d'une vingtaine de mètres d'épaisseur recouvrant le roc. Les méthodes utilisées permettent d'investiguer une profondeur maximale de 100 mètres de profondeur.

4.4.9 La Malbaie

Sur le territoire de la municipalité de La Malbaie, la stratigraphie a été investiguée à partir de vingt levés géophysiques ponctuels réalisés avec la méthode d'*Induction électromagnétique de transition* ou *TDEM* (*Time-Domain Electromagnetism*) (chapitre 2) qui sont répartis sur quatre sections géoélectriques LAMNTL1, KANNTL1, KANNTL2 et KANNTL3 (figure 4-54; annexe numérique AN3).

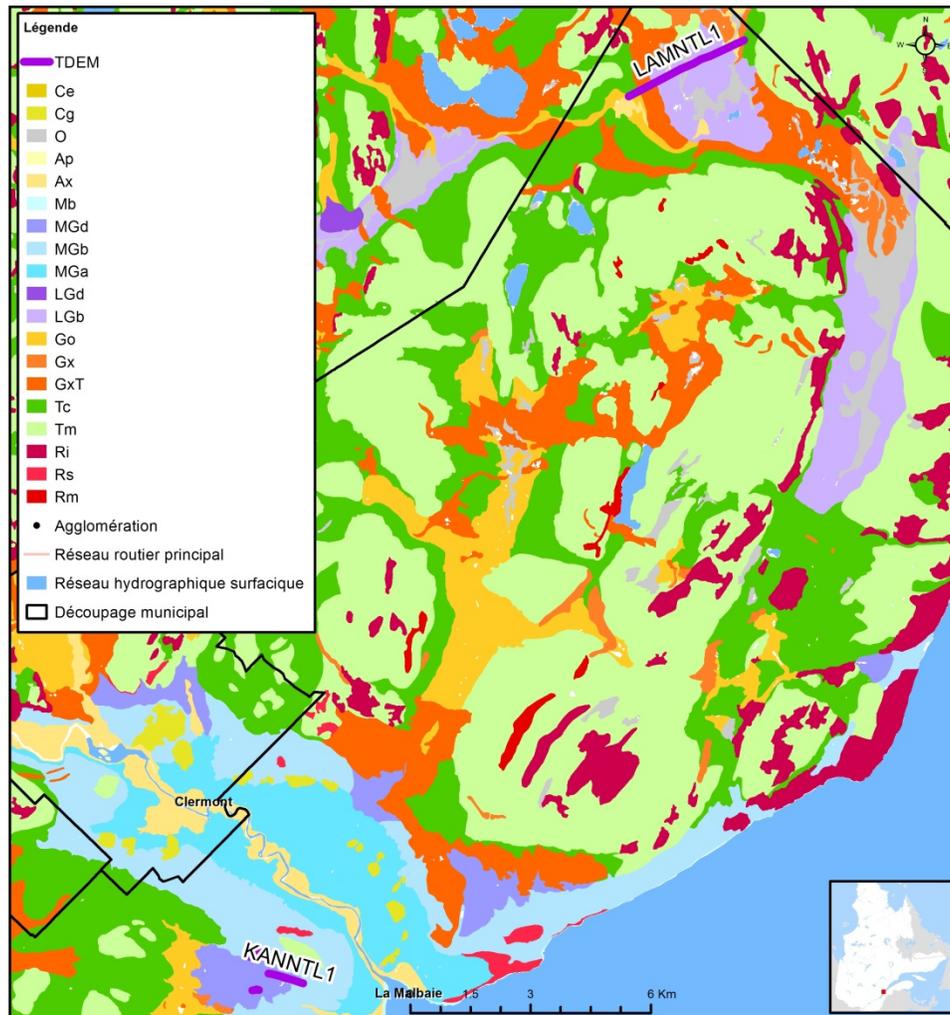


Figure 4-54 : Localisation des quatre sections géoélectriques pour les secteurs La Malbaie (LAMNTL1) et Kane (KANNTL1, KANNTL2 et KANNTL3).

La section géoélectrique LAMNTL1 (figure 4-55figure 4-53a) montre une couche de sable en surface dont l'épaisseur varie entre 2 et 10 mètres lorsqu'elle est présente. Sous-jacent à cette couche, un horizon de silt et argile de 30 mètres d'épaisseur moyenne. Ces matériaux fins confinent une couche de sable et gravier d'une vingtaine de mètres d'épaisseur avant d'atteindre le socle rocheux.

Les sections géoélectriques KANNTL2 (figure 4-55b) et KANNTL3 (figure 4-55c) montrent respectivement des couches d'argile et de silt de 70 et 50 mètres d'épaisseur. La section géoélectrique KANNTL3 montre localement une couche de sable en surface d'environ 5 à 10 mètres d'épaisseur. Cette même section montre environ 30 mètres de dépôts de sable et gravier sous l'argile. Le roc a été interprété par cette méthode d'investigation, il se situerait à 80 mètres de profondeur sous les dépôts.

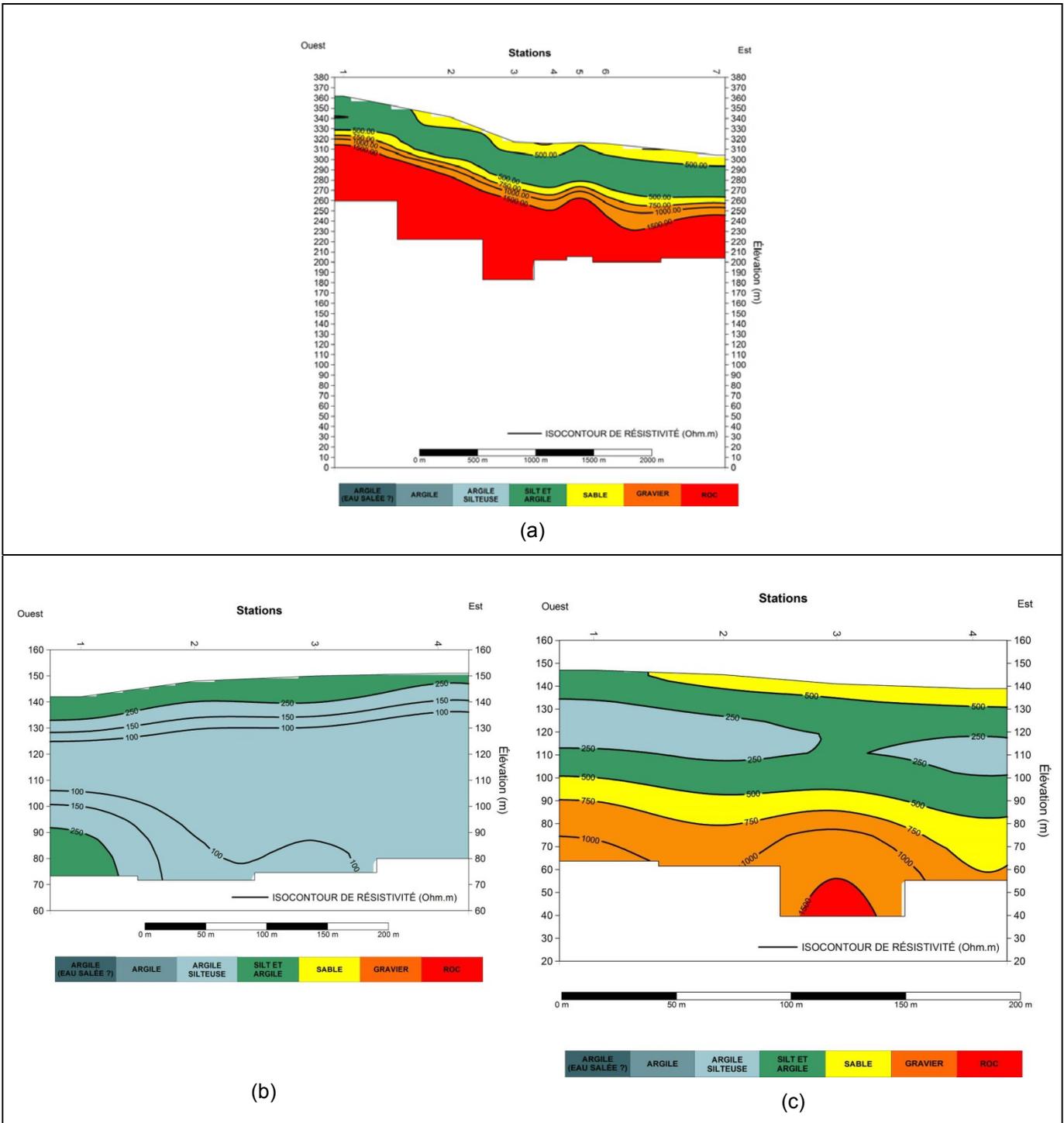


Figure 4-55 : Sections géoélectriques LAMNTL1 (a), KANNTL2 (b) et KANNTL3 (c).

Deux secteurs distincts sont investigués sur le territoire de La Malbaie. Le secteur localisé au nord de la municipalité (figure 4-54) montre une couche décimétrique de sable recouvrant un horizon de silt et d'argile d'environ 30 mètres d'épaisseur qui recouvre une couche de 20 mètres d'épaisseur de sable et gravier avant d'atteindre le roc.

Le secteur localisé à l'est du centre urbain (figure 4-54) montre un horizon d'argile et de silt dont l'épaisseur varie entre 50 à plus de 70 mètres. Cet horizon est localement recouvert d'une couche de sable d'environ 10 mètres d'épais. La couche d'argile recouvre un horizon de sable et gravier de plus de 30 mètres d'épais avant d'atteindre le roc. Les méthodes utilisées permettent d'interpréter une profondeur maximale de 100 mètres.

4.4.10 Saint-Urbain

Sur le territoire de la municipalité de Saint-Urbain, la stratigraphie a été investiguée à partir de vingt-quatre levés géophysiques ponctuels réalisés avec la méthode d'*Induction électromagnétique de transition* ou *TDEM* (*Time-Domain Electromagnetism*) (chapitre 2) qui sont répartis sur quatre sections géoélectriques STUTL1, STUNT2, STUNT3 et STUNT4 (figure 4-56; annexe numérique AN3). Une ligne sismique (STUSRL1) a également été réalisée à l'extrémité sud de la section géoélectrique STUNT2 (figure 4-56), elle sert notamment à estimer l'épaisseur des dépôts et la topographie du roc.

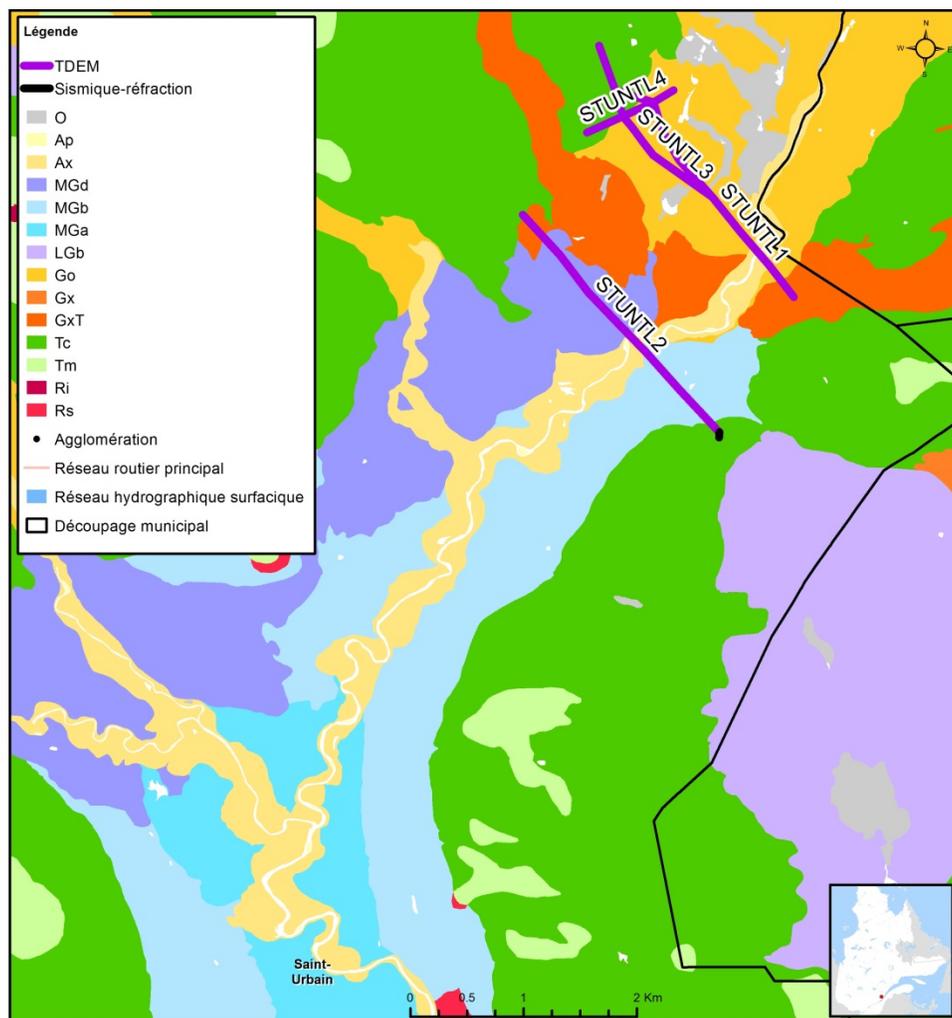


Figure 4-56 : Localisation des quatre sections géoélectriques pour le secteur de Saint-Urbain (STUTL1, STUNT2, STUNT3 et STUNT4).

La section géoélectrique STUNT3 est représentative du contexte stratigraphique général investigué dans la municipalité de Saint-Urbain (annexe numérique AN3). Tel que présenté à la figure 4-57 une couche de sable en surface dont l'épaisseur moyenne est de 10 m. Cette couche recouvre un horizon de silt et argile d'environ 30

mètres d'épaisseur qui confine une couche de sable et gravier d'une vingtaine de mètres d'épaisseur. Sous-jacent à cette couche, un horizon de silt et argile de 30 mètres d'épaisseur moyenne. Au total, une épaisseur de sédiments variant entre 50 et 70 mètres recouvre le socle rocheux. Puisque au niveau du socle rocheux, la résistivité est moindre entre les stations STUNTL3ST6 et STUNTL3ST7, il est possible que du calcaire soit présent.

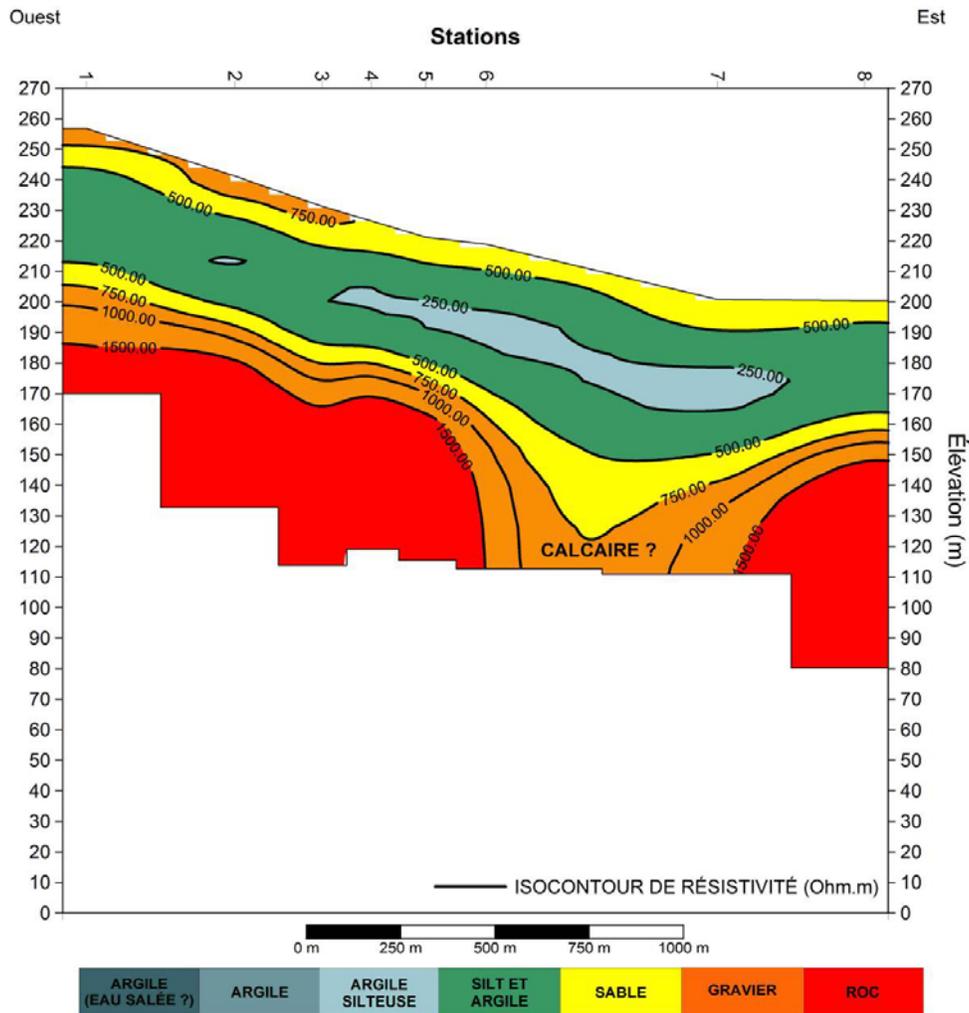


Figure 4-57 : Section géoélectrique STUNTL3.

Le secteur de Saint-Urbain montre successivement une couche de sable et gravier en surface qui recouvre un horizon de silt et d'argile de 30-40 mètres d'épais avant d'atteindre une couche de sable et gravier d'une vingtaine de mètres d'épais qui recouvre le roc. Les roches sédimentaires ordoviciennes sont localement interprétées.

4.4.11 Isle-aux-Coudres

Sur le territoire de la municipalité de l'Isle-aux-Coudres, la stratigraphie a été investiguée à partir de quinze levés géophysiques ponctuels réalisés avec la méthode *TDEM* (*Time-Domain Electromagnetism*) (chapitre 2) qui sont répartis sur une section géoélectrique IACNTL1 (figure 4-58; annexe numérique AN3). Une ligne de résistivité électrique (IACREL1) a également été réalisée au nord de l'Isle-aux-Coudres (figure 4-58), elle permet d'estimer l'épaisseur des dépôts et la topographie du roc.

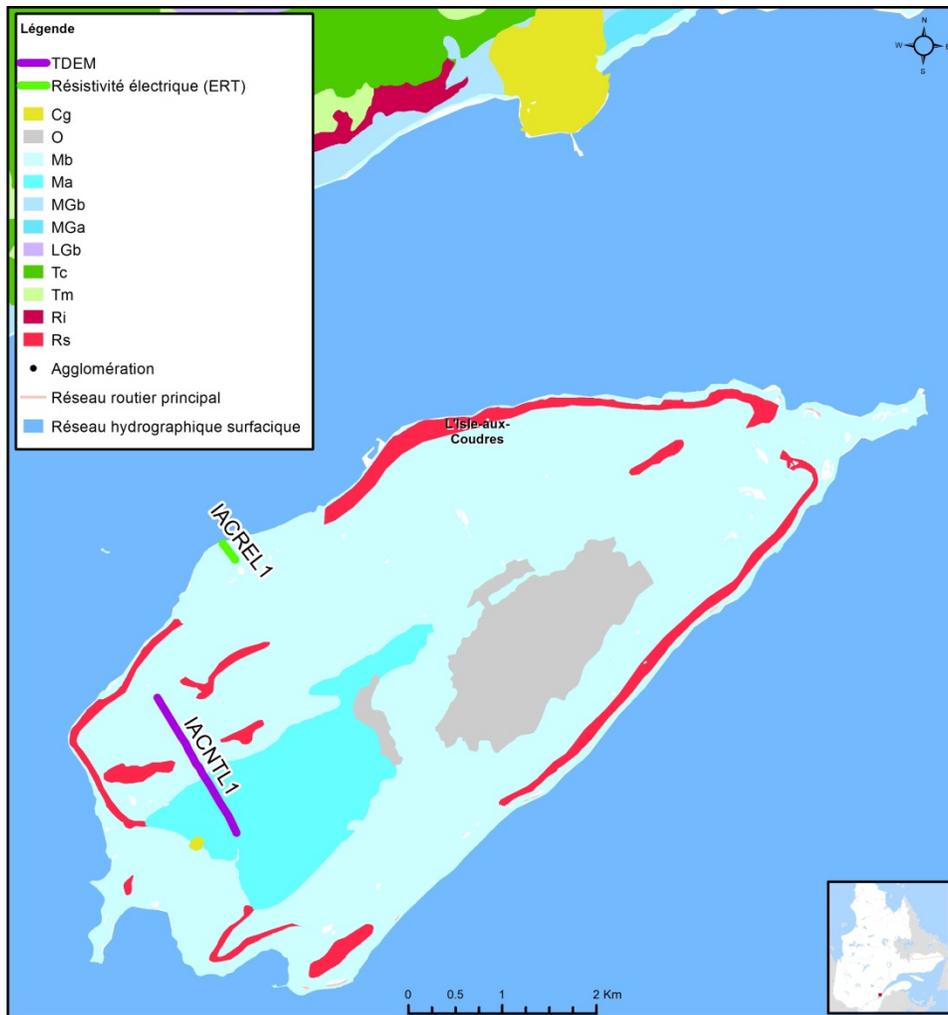


Figure 4-58 : Localisation de la section géoélectrique pour le secteur de l'Isle-aux-Coudres (IACNTL1) et de la ligne de résistivité électrique (IACREL1).

La figure 4-59a montre la section géoélectrique réalisée sur le territoire de l'Isle-aux-Coudres. Les levés ont été réalisés dans un secteur où environ 1 m de sédiments sont présents et recouvrent le socle rocheux sédimentaire de l'Isle-aux-Coudres. L'augmentation de la résistivité entre les stations IACNTL1ST5 et IACNTL1ST6 correspond à la localisation d'une faille NE-SW. La figure 4-59b montre que les roches sédimentaires (en jaune et vert) sont localement recouvertes par une couche de sable de 1 à 5 m d'épaisseur (annexe numérique AN3).

4.5 Coupes stratigraphiques

À l'intérieur de la zone d'étude du projet PACES-CHCN, **147** coupes stratigraphiques (figure 4-60) ont été interprétées. La carte #14 – *Localisation des coupes stratigraphiques* (annexe numérique AN1) présente la localisation de chacun des 147 coupes stratigraphiques et les coupes stratigraphiques sont disponibles à l'annexe numérique AN11. La figure 4-60 localise les 147 coupes stratigraphiques sur le territoire à l'étude.

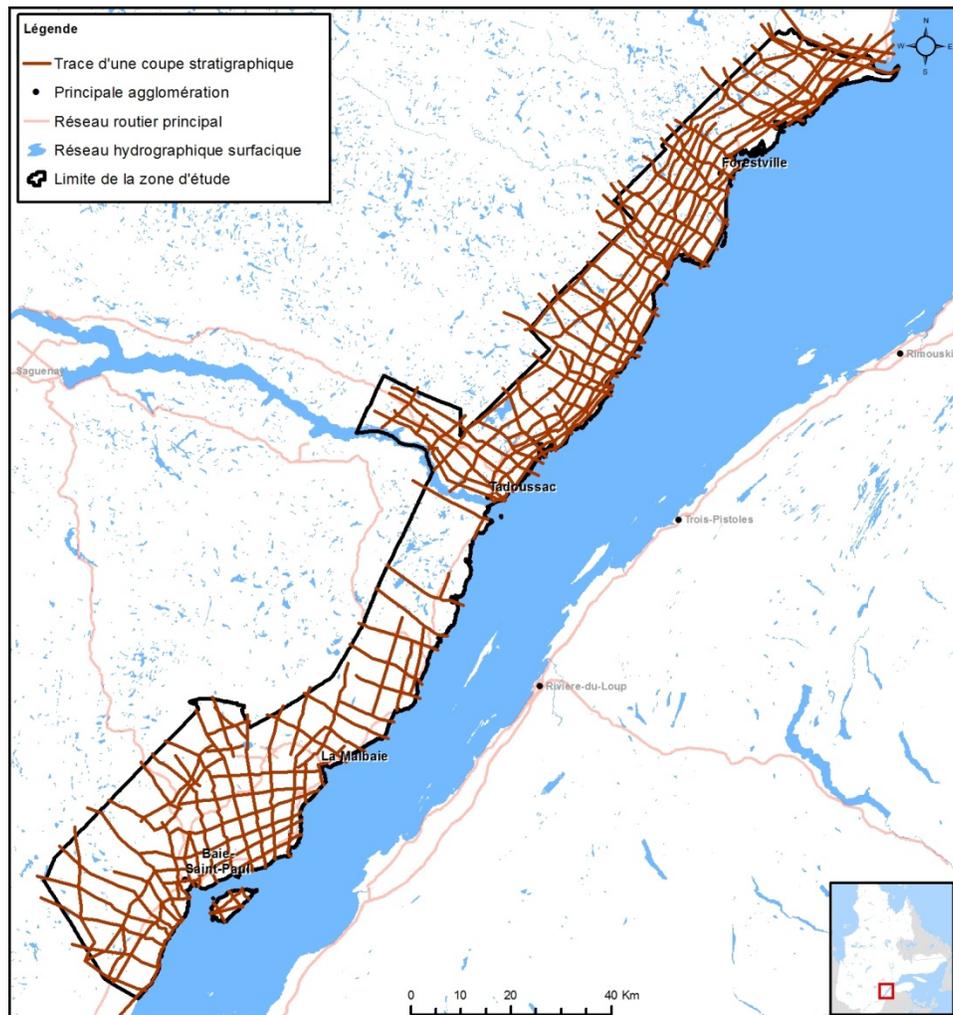


Figure 4-60 : Localisation des 147 coupes stratigraphiques interprétées sur l'ensemble du territoire d'étude.

Deux objectifs sont visés et expliquent cette production importante de coupes stratigraphiques au cours du projet PACES-CHCN:

1. Mieux définir les limites et l'épaisseur des aquifères granulaires non visibles en surface et devant figurer sur les cartes #18a – *Limites des unités hydrogéologiques perméables et imperméables* et #18b – *Limites des unités hydrogéologiques semi-perméables* (annexe numérique AN1).
2. Améliorer le jeu de données sources nécessaire à la création des cartes #15a – *Épaisseur des dépôts meubles*, #16a - *Topographie du roc* et #16b - *Topographie du roc TIN* (annexe numérique AN1) en augmentant la quantité de données sources et en améliorant leur distribution spatiale.

En effet, la principale source d'information indiquant l'épaisseur des dépôts pour le projet PACES-CHCN est une donnée ponctuelle correspondant soit à des puits ou des forages, données présentes en faible quantité sur le territoire à l'étude. De plus, les puits et les forages sont souvent regroupés en grappe près des agglomérations et cette source d'information possède donc une mauvaise distribution spatiale. Or, la qualité de l'interpolation, et par le fait même le résultat de la modélisation, est directement dépendante de la quantité de données sources et de leur distribution spatiale (MacCormack et al., 2011). Un jeu de données affichant une distribution spatiale régulière permet d'obtenir un résultat plus précis qu'un jeu affichant une distribution en grappe. La quantité et la distribution spatiale des données deviennent deux éléments encore plus importants lorsque le phénomène à modéliser est accidenté, c'est-à-dire qu'il varie de façon abrupte et imprévisible comme pour la topographie du roc.

La méthodologie suivie pour générer les 147 coupes stratigraphiques compte six étapes :

1. Simplification de l'information;
2. Identification des données sources;
3. Projection des stations sélectionnées dans une vue en coupe;
4. Interprétation des unités géologiques dans les coupes;
5. Mise en forme finale de la coupe stratigraphique et;
6. Création des diagrammes barrières.

Chacune de ces étapes fait ici l'objet d'une sous-section.

4.5.1 Simplification de l'information stratigraphique

La carte #13 – *Géologie du roc* (annexe numérique AN1) comprend une quinzaine de lithologies. Ces lithologies sont regroupées en trois grands groupes pour faciliter l'interprétation des coupes stratigraphiques : les roches cristallines, les roches sédimentaires ordoviciennes de la Plate-Forme du Saint-Laurent, et les roches sédimentaires appartenant aux Appalaches.

La carte #12 – *Géologie du Quaternaire* (annexe numérique AN1) présente les dépôts sur la base de leur genèse telle que proposé par la légende de la Commission géologique du Canada (Parent et al., 2010). Ainsi, les sédiments cartographiés proviennent de différentes origines de dépôts, notamment les sédiments glaciaires, fluvioglaciaires, marins, alluviaux et organiques pour en nommer quelques-uns. La composition granulométrique de ces dépôts passe des sédiments fins (argile et silt) à des sables et graviers et c'est sur la base de la granulométrie observée que la simplification des dépôts s'effectue. La simplification des dépôts a été répartie en cinq catégories distinctes :

- le **till** inclut les tills continus et les tills minces associés à des sédiments glaciaires;
- le **gravier** inclut principalement les sédiments fluvioglaciaires, notamment ceux des moraines de Saint-Narcisse, des dépôts d'épandage et de petits eskers;
- l'**argile** inclut les sédiments glaciomarins et marins déposés en eau profonde;
- le **sable** inclut les sédiments glaciolacustres, glaciomarins et marins déposés en eau peu profonde et alluviaux;
- les **sédiments organiques** sont présents en couches minces à la surface.

4.5.2 Identification des données sources

Les données utilisées pour créer les coupes stratigraphiques sont :

- les données stratigraphiques simplifiées obtenues pour les stations (puits, forages, levés géophysiques, etc.);
- les affleurements rocheux;
- la géologie du roc, les failles et linéaments (carte #13 – *Géologie du roc*, annexe numérique AN1);
- les dépôts de surface (carte #12 – *Géologie du Quaternaire*, annexe numérique AN1);
- la topographie de la surface du terrain (carte #3 – *Modèle numérique de terrain*, annexe numérique AN1);

- le réseau hydrographique (carte #5 – *Hydrographie*, annexe numérique AN1);
- les limites des bassins versants (carte #6 – *Bassins versants*, annexe numérique AN1);
- la topographie du roc préliminaire¹;
- la localisation de l'intersection avec les autres coupes stratigraphiques.

4.5.3 **Projection des stations dans une vue en coupe**

La sélection des points de contrôle (stations et affleurements) des coupes stratigraphiques s'effectue manuellement en plan à l'aide de la version 3 du logiciel *Strater* de *Golden Software inc.* Le tableau suivant présente les proportions des stations utilisées lors de l'interprétation des coupes stratigraphiques selon leur source.

Tableau 4-1 : Proportion des stations utilisées lors de l'interprétation des coupes stratigraphiques selon leur source.

Sources de la station	Nb utilisées	% utilisées
MDDEFP	6	1
MTQ	69	8
PACES-CHCN	73	8
Projet Quaternaire CHCN	256	29
Rapport hydrogéologique	139	16
SIGEOM	19	2
SIH	317	36
TOTAL	879	100

Les points sélectionnés sont ensuite projetés dans une vue en coupe grâce aux fonctionnalités du module *Subsurface Analyst* du logiciel *Arc Hydro Groundwater* de la compagnie *Aquaveo*. Pour faciliter l'interprétation des unités géologiques dans la vue en coupe, un gabarit a été créé à partir du système d'information géographique (SIG) *ArcGIS 10.1* d'*ESRI* (figure 4-61). Ce gabarit inclut :

- la localisation de la coupe sur les trois cartes suivantes :
 - le modèle numérique d'altitude (carte #3 – *Modèle numérique de terrain*, annexe numérique AN1);
 - la carte de la géologie du Quaternaire (carte #12 – *Géologie du Quaternaire*, annexe numérique AN1);
 - la carte de la géologie du roc avec les failles et les linéaments (carte #13 – *Géologie du roc*, annexe numérique AN1);
- la vue en coupe (exagération verticale variant entre 10 et 30 fois) dans laquelle apparaissent :
 - la surface topographique du terrain avec l'étendue des dépôts de surface;
 - les affleurements rocheux;
 - les stations sélectionnées avec leur stratigraphie simplifiée;
 - la topographie du roc préliminaire;
 - les limites de bassins versant de niveau 1;
 - l'hydrographie principale;
 - le point d'intersection avec les autres coupes stratigraphiques;
- d'autres éléments d'information (légende, métadonnées, etc.).

¹ La topographie du roc préliminaire est obtenue en soustrayant l'épaisseur des dépôts préliminaires du modèle numérique d'altitude. L'épaisseur des dépôts préliminaire est quant à elle estimée à partir de la profondeur du roc indiquée par les stations de la base de données à référence spatiale PACES-CHCN et les affleurements.

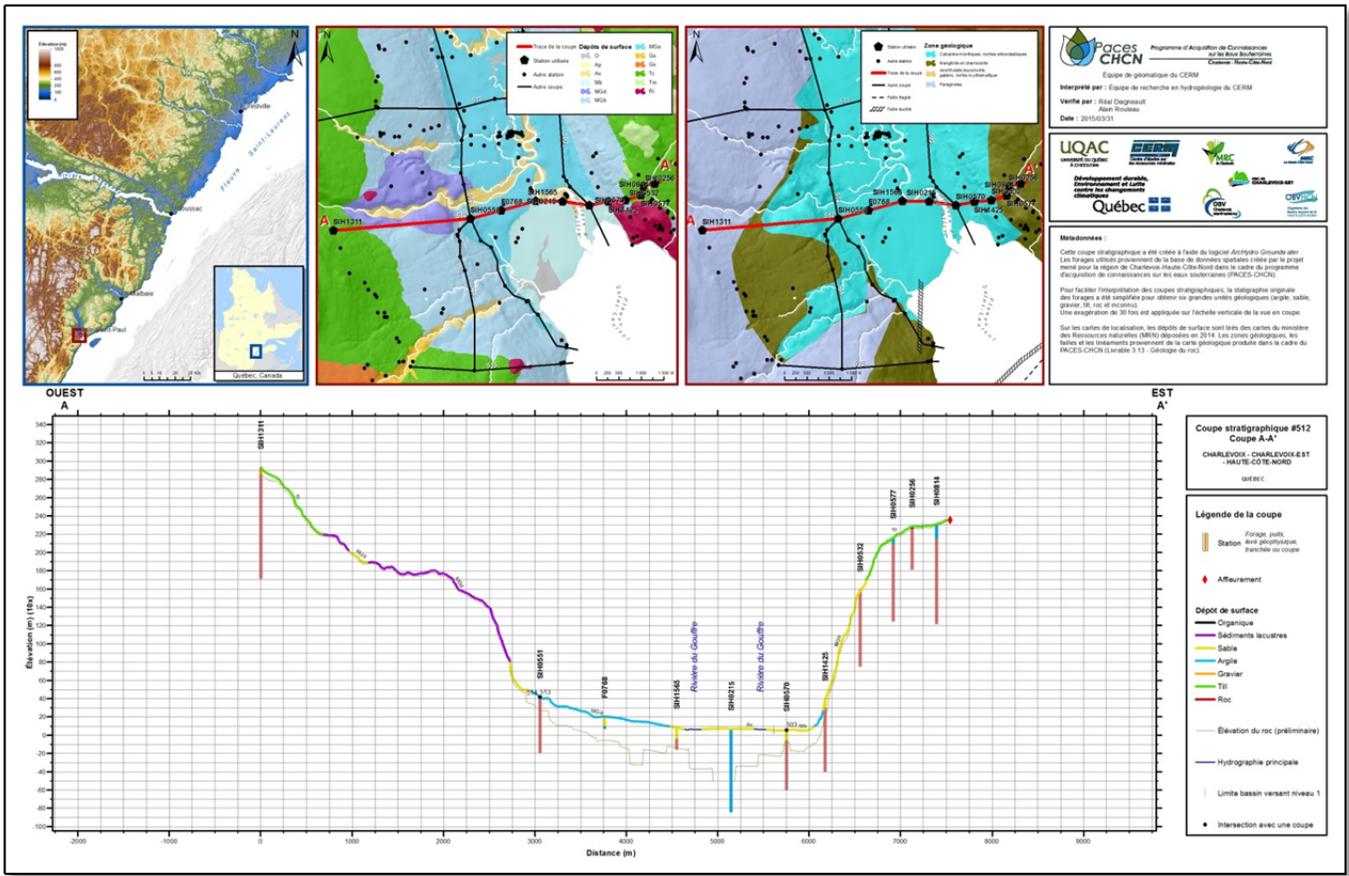


Figure 4-61 : Gabarit utilisé pour l'interprétation des coupes stratigraphiques.

4.5.4 Interprétation des coupes stratigraphiques

La stratigraphie interprétée dans les coupes stratigraphiques est obtenue à partir de l'information ponctuelle (stations) disponible dans la base de données. Dans certains cas, des informations stratigraphiques localisées à proximité peuvent être contradictoires. Par conséquent, l'interprétation peut être localement différente de l'information stratigraphique disponible.

Le socle rocheux est présent sur l'ensemble des coupes stratigraphiques bien que sa profondeur ne soit pas disponible dans toutes les coupes. Dans ces cas, l'interprétation est basée sur certaines hypothèses qui sont discutées dans les prochains paragraphes.

4.5.4.1 Roc cristallin

De façon générale, la profondeur du roc est interprétée à partir de l'information des stations atteignant le roc (forage, géophysique, affleurements). Dans le secteur des basses terres de la Haute-Côte-Nord, l'épaisseur des dépôts peut atteindre plus de 100 mètres et très peu de stations atteignent le roc. Dans ces cas, l'épaisseur des dépôts est estimée de façon conservatrice en plaçant la topographie du roc près de la fin du forage. Lorsque le roc de la Province de Grenville est affleurant ou sous une couche mince de till, la topographie accidentée suggère que le roc est également accidenté sous les dépôts.

Dans le secteur de la rivière du Gouffre à Baie-Saint-Paul, il est connu que les dépôts sont très épais pouvant atteindre plus de 200 mètres. Dans ces cas, le roc n'a pas été interprété dans les coupes stratigraphiques telles qu'illustrées à la figure 4-62.

4.5.4.2 Roches sédimentaires ordoviciennes

Dans les cas où les roches sédimentaires ordoviciennes sont présentes (secteur de Charlevoix seulement), leur topographie est beaucoup plus plane et leur épaisseur a été estimée à partir des observations de Rondot (1972). Les traces des failles fragiles majeures ont été intégrées dans les coupes stratigraphiques.

Dans le secteur de la rivière du Gouffre à Baie-Saint-Paul, les roches ordoviciennes peuvent atteindre plus d'une centaine de mètres d'épaisseur (figure 4-62) et dans ces cas le socle cristallin n'est pas interprété sous les roches sédimentaires.

4.5.4.3 Till

Le till est présent en couche mince sur l'ensemble du territoire de Charlevoix et des hautes terres de la Haute-Côte-Nord sauf dans les endroits où la carte #12 – Géologie du Quaternaire (annexe numérique AN1) montre le roc affleurant. Dans les basses terres de la Haute-Côte-Nord, le till a été exposé en plusieurs endroits à l'érosion lors de l'invasion marine de la mer de Goldthwait. Par conséquent, le till mince n'apparaît que localement en couverture au socle cristallin.

4.5.4.4 Gravier

Le gravier affleure dans les hautes terres de la région mais très peu de stations permettent d'en connaître l'épaisseur. Puisqu'il remplit généralement d'étroites vallées, l'épaisseur dépend directement de la topographie du roc. Localement, des stations indiquent la présence de gravier confiné par des couches d'argile. Dans ces cas, le gravier se présente sous forme de lentille peu étendue latéralement.

4.5.4.5 Argile

L'argile est présente dans les basses terres de l'ensemble du territoire et se limite généralement par les sédiments deltaïques glaciomarins qui correspondent à peu près à la position du glacier en présence de la mer de Goldwaith. Dans le secteur de Charlevoix, l'argile remplit les vallées du Gouffre et de La Malbaie. Tandis que dans le secteur de la Haute-Côte-Nord, l'argile est presque entièrement recouverte d'une couche de sable de quelques mètres d'épaisseur (généralement entre 2 et 15 mètres) correspondant à des dépôts littoraux et pré-littoraux glaciomarins (Cousineau et al., 2014). Puisque le niveau de la mer a varié, des lentilles de sable apparaissent dans les descriptions de forage mais ne sont pas représentées dans les coupes stratigraphiques et sont plutôt intégrées à l'intérieur des massifs argileux.

4.5.4.6 Sable

Les couches superficielles de sable recouvrent presque entièrement les couches d'argile dans les basses terres de la Haute-Côte-Nord. Elles ont généralement une épaisseur inférieure à 10 mètres et sont latéralement continues.

4.5.5 Mise en forme finale des coupes stratigraphiques

Les coupes stratigraphiques interprétées sont numérisées à l'aide des outils d'édition de l'application *ArcMap* d'*ArcGIS 10.1*. La figure 4-62 montre le résultat final de l'interprétation et de la numérisation d'une coupe stratigraphique. Les 147 coupes stratigraphiques sont disponibles dans ce format à l'annexe numérique AN11 et constituent le livrable #14 – *Coupes stratigraphiques* (annexe numérique AN11) du projet PACES-CHCN.

Les mêmes cartes de localisation utilisées lors de l'interprétation des coupes et présentées à la section 4.5.3 se retrouvent dans le format final. Les éléments affichés sur la vue en coupe diffèrent quelque peu et vise plutôt à présenter le contenu de la coupe stratigraphique. Les éléments s'y retrouvant sont les suivants :

- les stations projetées avec leur stratigraphie simplifiée;
- les unités géologiques interprétées;
- les affleurements rocheux;
- la surface topographique du terrain avec l'étendue des dépôts organiques seulement;
- l'hydrographie principale avec le nom des cours d'eau;

- le point d'intersection avec les autres coupes stratigraphiques.

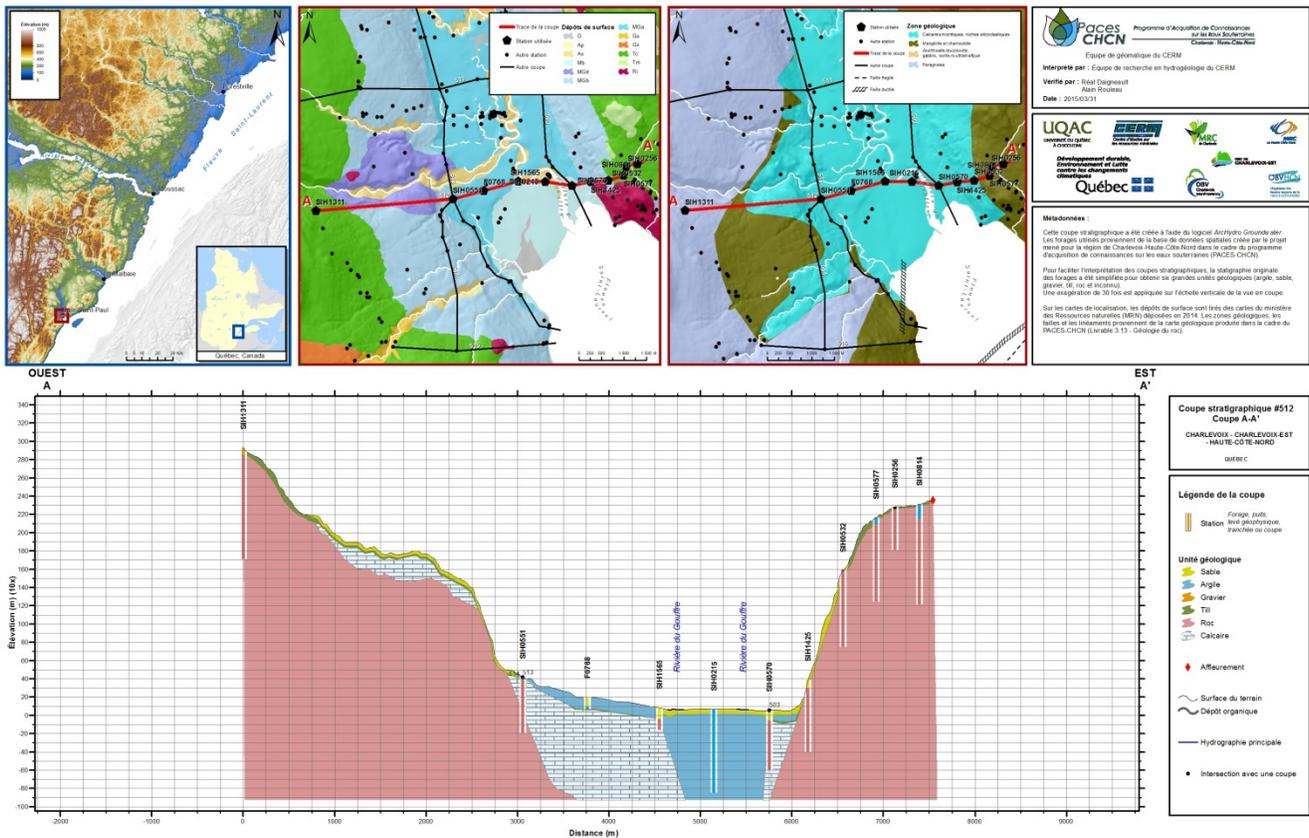


Figure 4-62 : Coupes stratigraphiques #512, secteur de la rivière du Gouffre.

4.5.6 Création des diagrammes barrières

Une fois l'ensemble des coupes stratigraphiques numérisées, elles sont dans un environnement tridimensionnel grâce au module *Subsurface Analyst* du logiciel *Arc Hydro Groundwater* pour ainsi créer des diagrammes barrières (figure 4-63). Ces diagrammes barrières suggèrent la continuité ou discontinuité des couches sur l'ensemble du territoire, ce qui permet d'apprécier les principaux contextes stratigraphiques régionaux. Un autre avantage de la représentation des coupes stratigraphiques sous forme de diagrammes barrières consiste à vérifier la cohérence de l'interprétation aux intersections de coupes. Par conséquent, cette représentation tridimensionnelle est utilisée pour le contrôle de la qualité de l'interprétation stratigraphique. De plus, lors de phases ultérieures au projet PACES-CHCN, l'usage des diagrammes barrières permet d'estimer des volumes équivalents des milieux aquifères, et ainsi estimer des volumes d'eau souterraine contenus dans ces milieux.

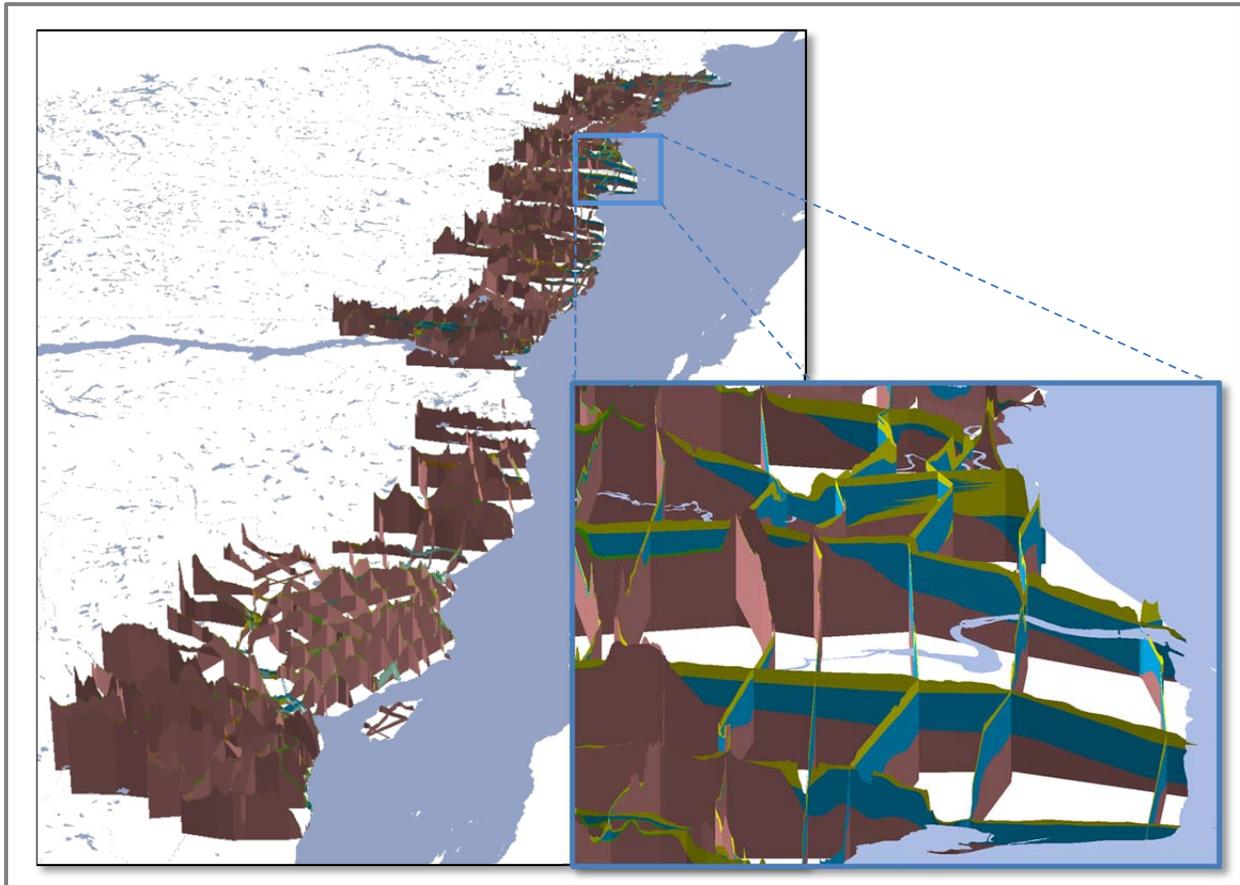


Figure 4-63 : Représentation des 147 coupes stratigraphiques sous forme de diagrammes barrières.

4.5.7 Contextes stratigraphiques régionaux

Les diagrammes barrières permettent d'apprécier les séquences stratigraphiques les plus représentatives du territoire CHCN. Trois contextes principaux dominants caractérisent l'ensemble du territoire CHCN :

- Till sur roc dans les hautes terres du territoire CHCN;
- Sable sur argile sur roc dans les basses terres de la Haute-Côte-Nord;
- Séquences stratigraphiques complexes dans le secteur de l'astroblème de Charlevoix.

Plusieurs autres contextes stratigraphiques sont observés, mais ils sont plutôt observés localement. Ils sont également discontinus lorsqu'ils sont observés. Par exemple, plusieurs séquences montrant du gravier sur till sur roc ou du sable sur till sur roc ou de l'argile sur till sur roc sont observés sur le territoire CHCN.

4.5.7.1 Till sur roc dans les hautes terres du territoire CHCN

Dans les hautes terres autant sur le territoire de Charlevoix que de la Haute-Côte-Nord, le contexte qui domine est celui où le till mince recouvre le roc.

4.5.7.2 Sable sur argile sur roc dans les basses terres de la Haute-Côte-Nord

Les basses terres de la Haute-Côte-Nord sont dominées par la stratigraphie caractérisée par une couche de sable décimétrique en surface suivi d'un horizon épais d'argile pouvant atteindre près de 100 mètres reposant sur le roc. Localement un horizon de sable et gravier est observé sous l'argile.

4.5.7.3 Séquences stratigraphiques complexes dans le secteur de l'astroblème de Charlevoix

Sur le territoire de Charlevoix, les séquences stratigraphiques peuvent être complexes où du sable recouvre un horizon d'argile qui confine un second horizon de sable. Cette séquence est mentionnée à titre d'exemple mais d'autres séquences stratigraphiques complexes sont observées sur le territoire.

Ces diagrammes barrière sont nécessaires à l'interprétation des contextes hydrogéologiques, mais elles contribuent aussi à améliorer la distribution spatiale de l'information sur l'épaisseur des dépôts meubles et la topographie du roc.

4.6 Épaisseur des dépôts et topographie du roc

Les dépôts meubles constituent une limite physique à l'intérieur desquelles les unités stratigraphiques s'enchaînent. Il est donc opportun d'estimer l'épaisseur des dépôts ou encore estimer l'élévation du toit du socle rocheux (topographie du roc).

4.6.1 Épaisseur estimée des dépôts meubles

Les données sources, la méthodologie et les résultats de la carte #15a - *Épaisseur des dépôts meubles* (annexe numérique AN1) sont discutés dans cette section.

4.6.1.1 Données sources

À l'échelle du territoire CHCN, les données sur l'épaisseur des dépôts meubles comprennent :

- des stations indiquant une profondeur au roc (forages, puits, sondages, etc.);
- des affleurements rocheux;
- des données interprétées à partir des coupes stratigraphiques (forages virtuels);
- des points dérivés de la carte #12 – *Géologie du Quaternaire* (annexe numérique AN1) et indiquant un dépôt mince ou nul;
- des stations et des forages virtuels indiquant une épaisseur minimale de dépôts meubles.

La suite du texte détaille chacune des données sources.

Les stations

Les stations sont des données ponctuelles de stratigraphie issues de la base de données spatiales du projet PACES-CHCN. Ces données sont associées à des stations représentant un forage, un puits, un piézomètre ou un levé géophysique.

Dans la base à référence spatiale du projet PACES-CHCN, 5 116 stations possèdent une valeur d'épaisseur de dépôts. Plus précisément sur le territoire à l'étude et en périphérie (inférieur à 1 km de la limite extérieure), **2 774 stations** indiquent une profondeur au roc dont 2 301 stations sont situées sur le territoire des MRC de Charlevoix et de Charlevoix-Est alors que seulement 473 stations sont situées sur le territoire de la MRC de La Haute-Côte-Nord. La figure 4-64 illustre la répartition des données et leur densité sur le territoire. Elle met en évidence notamment la répartition spatiale des données et le regroupement en grappes localisées majoritairement à proximité des principales zones urbaines (*Baie Saint-Paul, La Malbaie, etc.*).

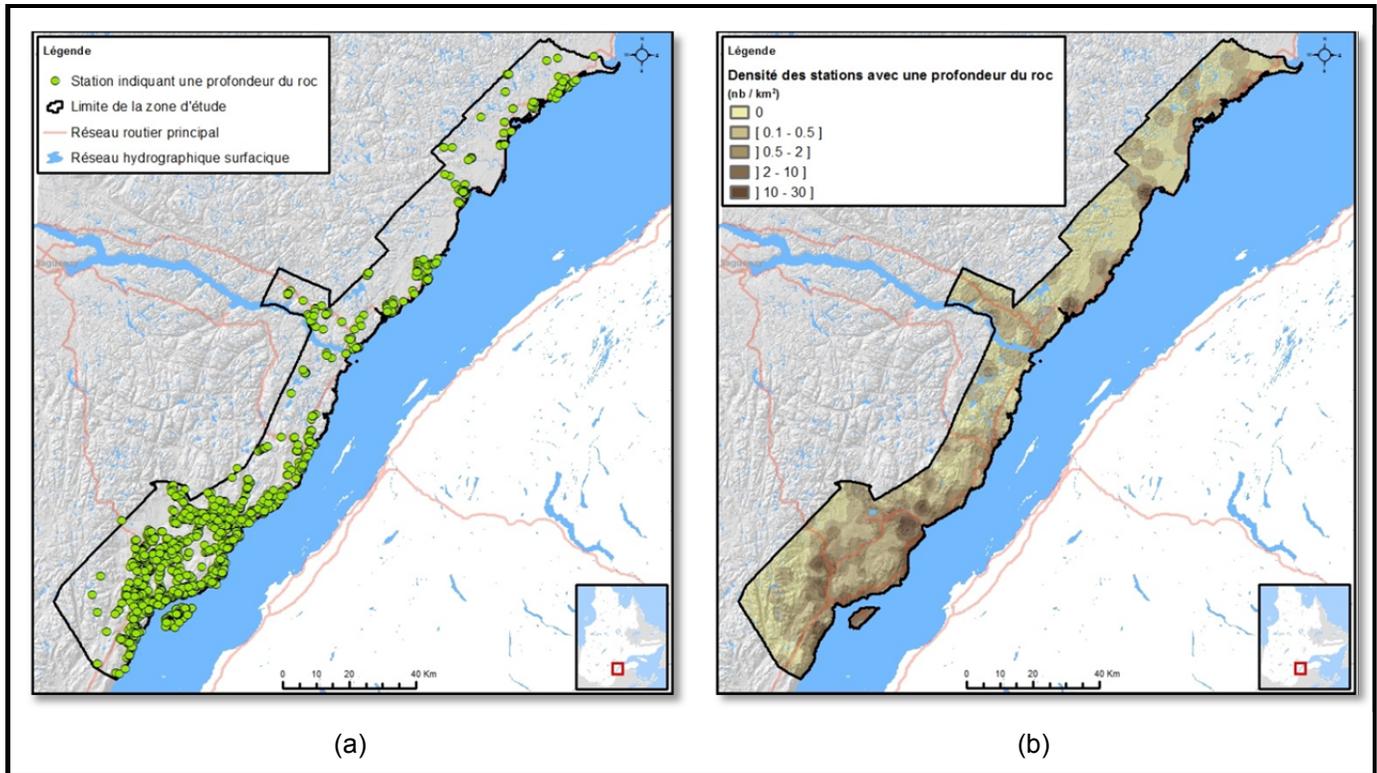


Figure 4-64 : (a) Répartition des stations possédant une valeur d'épaisseur de dépôts et
(b) Densité des stations possédant une valeur d'épaisseur de dépôts.

Les affleurements rocheux

Les affleurements rocheux constituent une donnée importante puisqu'ils indiquent une valeur nulle d'épaisseur de dépôts. Un nombre assez important d'affleurements, soit 18 087, sont localisés dans la base de données spatiales PACES-CHCN. Parmi ces affleurements, moins de la moitié, soit **7 946 affleurements**, sont situés dans la zone d'étude ou en périphérie. Ces affleurements proviennent de sources diverses :

- **40** de la compilation géoscientifique du MERN (SIGEOM);
- **6 931** des cartes papier numérisées et vectorisées par le CERM;
- **842** du projet de cartographie des dépôts quaternaires;
- **133** des travaux de terrain réalisés par le CERM dans le cadre du PACES.

La figure 4-65 illustre la localisation de ces affleurements.

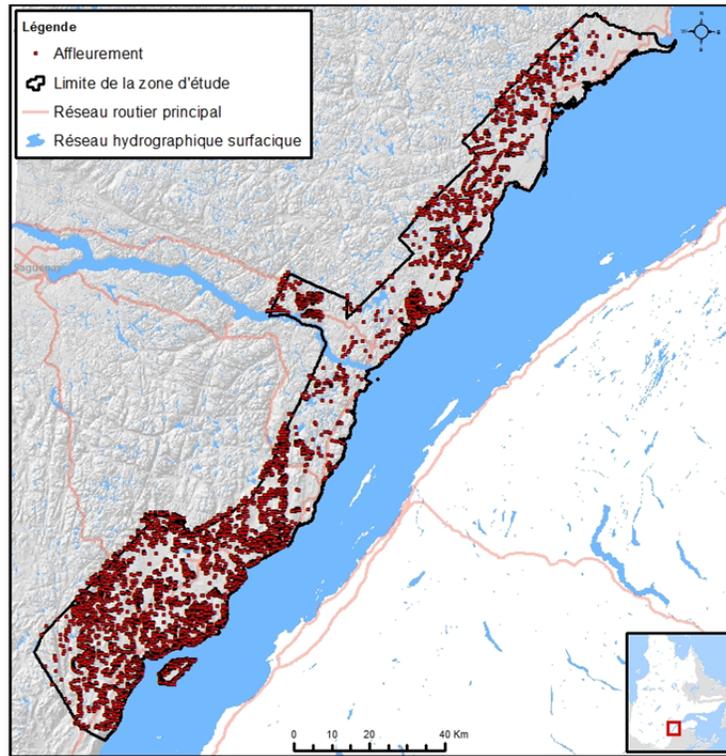
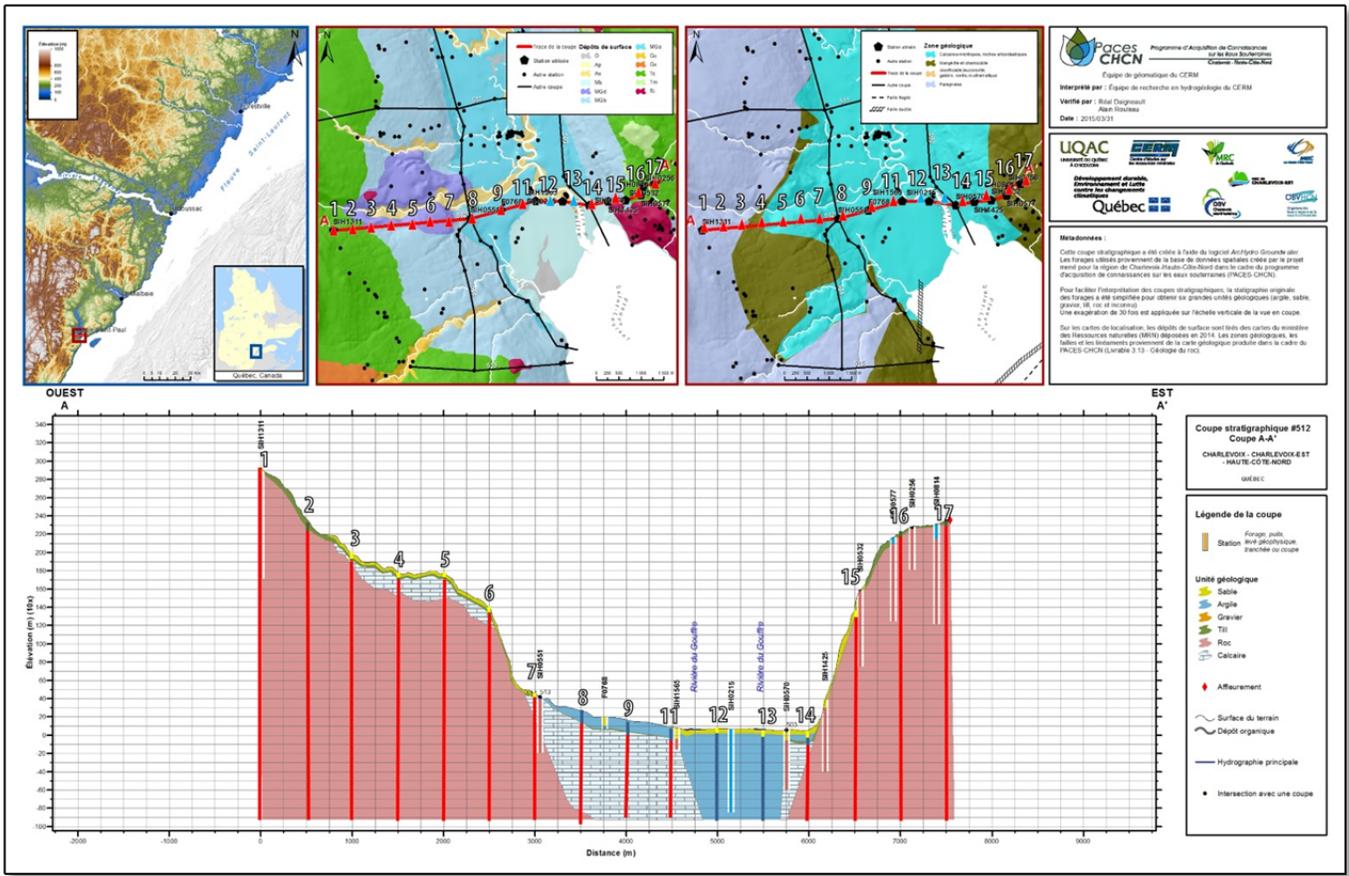


Figure 4-65 : Localisation des affleurements pour le territoire de CHCN.

Les forages virtuels

Les 147 coupes stratigraphiques élaborées sur le territoire à l'étude permettent d'augmenter la quantité de données et d'améliorer la distribution spatiale de l'information sur la profondeur du roc, et ce, même si cette dernière demeure une valeur estimée entre les stations. À l'aide d'un processus informatique, les coupes stratigraphiques sont discrétisées en nouveaux forages (d'où les forages virtuels) selon un pas de 500 mètres. Le détail de la méthode et les codes *Visual Basic for Applications (VBA)* sont présentés dans Fillastre (2010). La figure 4-66 illustre le résultat de la création des forages virtuels le long d'une coupe stratigraphique. Les triangles rouges présentés sur les deux vues en plan de la figure symbolisent ces forages virtuels et se rapportent aux numéros indiqués sur la vue en coupe. Cette coupe permet de générer 17 nouveaux forages dont 15 contiennent de l'information interprétée sur la profondeur du roc et 2 forages indiquent une épaisseur minimale des dépôts (forages virtuels #12 et #13 sur la figure 4-66). Ce processus permet de générer **5 109 forages virtuels** sur le territoire à l'étude.



Les dépôts minces et le roc

Selon la carte #12 - *Géologie du Quaternaire* (annexe numérique AN1), des dépôts de faible épaisseur (*égale ou inférieure à 1 mètre*) et le roc affleurant caractérisent une superficie importante du territoire de CHCN. Les dépôts minces correspondent au till mince (*Tm*) et le roc affleurant aux codes *R*, *Rm*, *Ri* et *Rs*. Afin d'utiliser cette information dans la modélisation de l'épaisseur des dépôts, les polygones de dépôts minces ou de roc affleurant sont convertis en un quadrillage de points de 100 mètres d'intervalle. La figure 4-67 illustre un exemple du quadrillage de points obtenu.

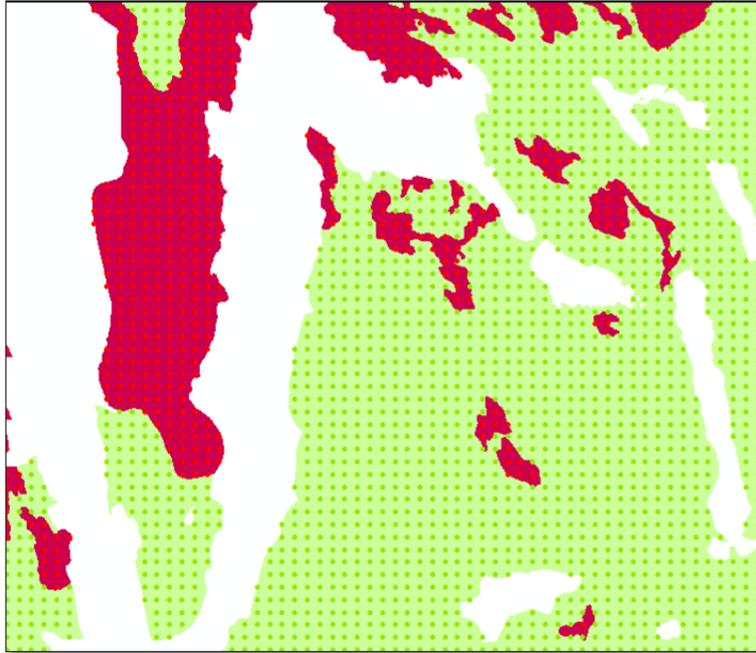


Figure 4-67 : Quadrillage de points créés sur les dépôts minces ou nuls.

Étant donné que le till mince a généralement une épaisseur inférieure à 1 mètre, tous les points du quadrillage correspondant à ce type de dépôts affichent une épaisseur estimée à 1 mètre (en vert sur la figure 4-67). Tous les autres points correspondent à des zones d'affleurements rocheux et affichent une épaisseur nulle (en rouge sur la figure 4-67). Ce quadrillage permet d'obtenir **217 508 points** d'information supplémentaire sur la profondeur du roc.

Stations et forages virtuels indiquant une épaisseur minimale de dépôt

Certaines stations présentes dans la base de données spatiales du projet PACES-CHCN n'atteignent pas le socle rocheux. De même, lors de l'interprétation des coupes stratigraphiques l'information disponible dans certains secteurs ne permet pas d'indiquer une profondeur du roc. Ainsi, aucune valeur de profondeur du roc ne peut être assignée aux forages virtuels se retrouvant dans ces zones (p. ex. les forages virtuels #12 et #13 sur la figure 4-66).

4.6.1.2 *Méthodologie*

La méthodologie suivie pour la modélisation de l'épaisseur des dépôts compte quatre grandes étapes :

- Étape 1 : Division de la zone d'étude;
- Étape 2 : Modélisation sans les stations indiquant une épaisseur minimale de dépôts;
- Étape 3 : Comparaison et modélisation avec les stations indiquant une épaisseur minimale de dépôts;
- Étape 4 : Création d'une mosaïque et application d'un filtre matriciel de lissage.

Ces étapes sont présentées en détail dans la suite de cette section.

Étape 1 – Division de la zone d'étude

La variabilité au niveau des contextes géologiques ont nécessité la division de la zone d'étude en quatre secteurs :

- secteur de Charlevoix;
- secteur de l'Isle-aux-Coudres;
- secteur de la Haute-Côte-Nord;
- secteur de l'Astoblème de Charlevoix.

Ces secteurs sont à nouveau subdivisés en sous-domaines afin de séparer les dépôts minces ou nuls des dépôts plus épais. La figure 4-68 localise ces quatre secteurs d'interpolation ainsi que les deux sous-domaines.

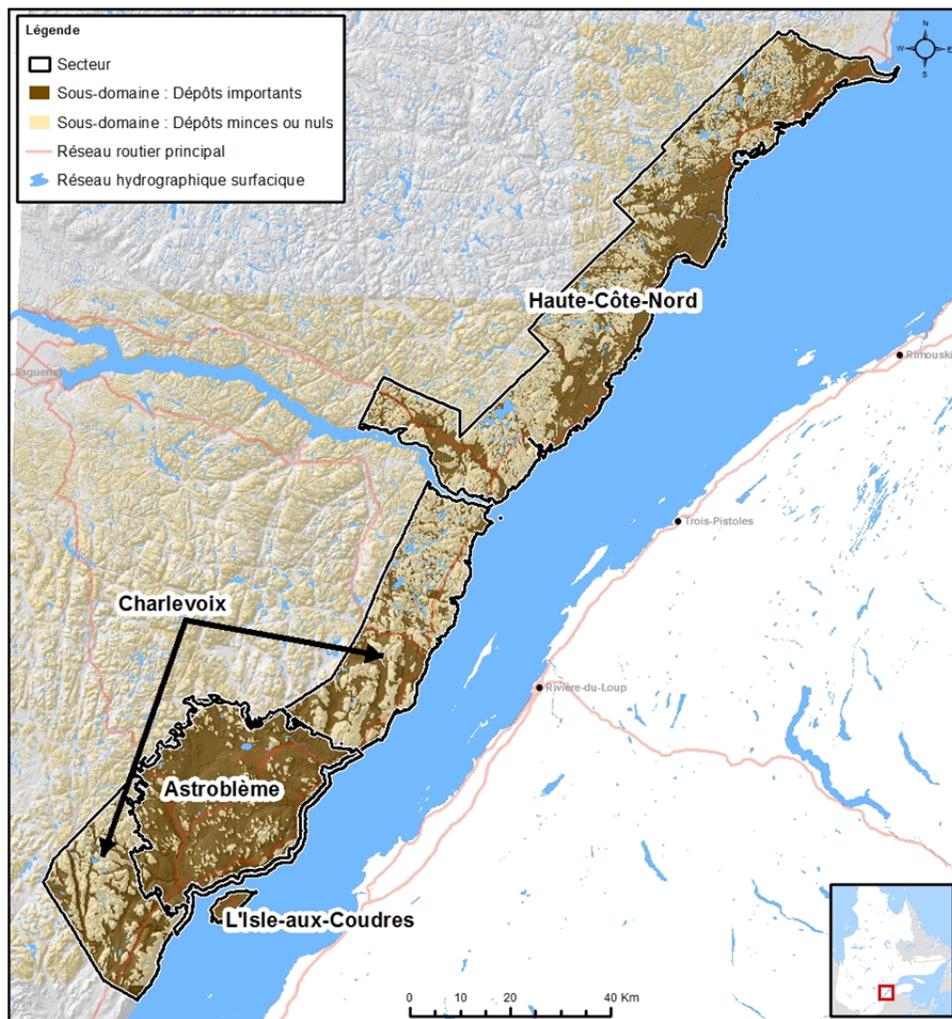


Figure 4-68 : Les quatre secteurs d'interpolation avec leurs sous-domaines.

Une interpolation différente est donc réalisée dans chaque secteur et ce pour chaque sous-domaine. Plus précisément, une interpolation différente est réalisée dans les six zones suivantes :

- Charlevoix – dépôts épais;
- Charlevoix – dépôts minces ou nuls (incluant ceux de l'astroblème);
- Astroblème – dépôts épais;

- L'Isle-aux-Coudres;
- Haute-Côte-Nord – dépôts épais;
- Haute-Côte-Nord – dépôts minces ou nuls.

Les dépôts minces ou nuls (T_m et R) de l'astroblème sont présents en trop faible quantité et ils sont traités avec les autres dépôts minces ou nuls du territoire de Charlevoix. L'Isle-aux-Coudres possède une faible superficie, peu ou pas de dépôts de till mince et peu d'affleurement rocheux. L'interpolation de ce secteur s'effectue donc sans création de sous-domaine.

Les données sources utilisées pour l'interpolation sont sélectionnées dans chacune des zones. Un corridor de 100 mètres est appliqué lors de la sélection des données situées à l'intérieur d'une zone caractérisée par un sous-domaine de dépôts importants pour ainsi ajouter les données ponctuelles indiquant de faibles épaisseurs de dépôts en périphérie. Les données sélectionnées sont les stations et les forages virtuels indiquant une profondeur au roc, les affleurements rocheux et les points du quadrillage indiquant un dépôt mince ou nul. La figure 4-69 montre la répartition de ces données selon leur type et par zone. Les zones jaunâtres correspondent aux quadrillages de points obtenus pour les dépôts minces (T_m) ou nuls (R) indiqués sur la carte #12 – Géologie du Quaternaire (annexe numérique AN1).

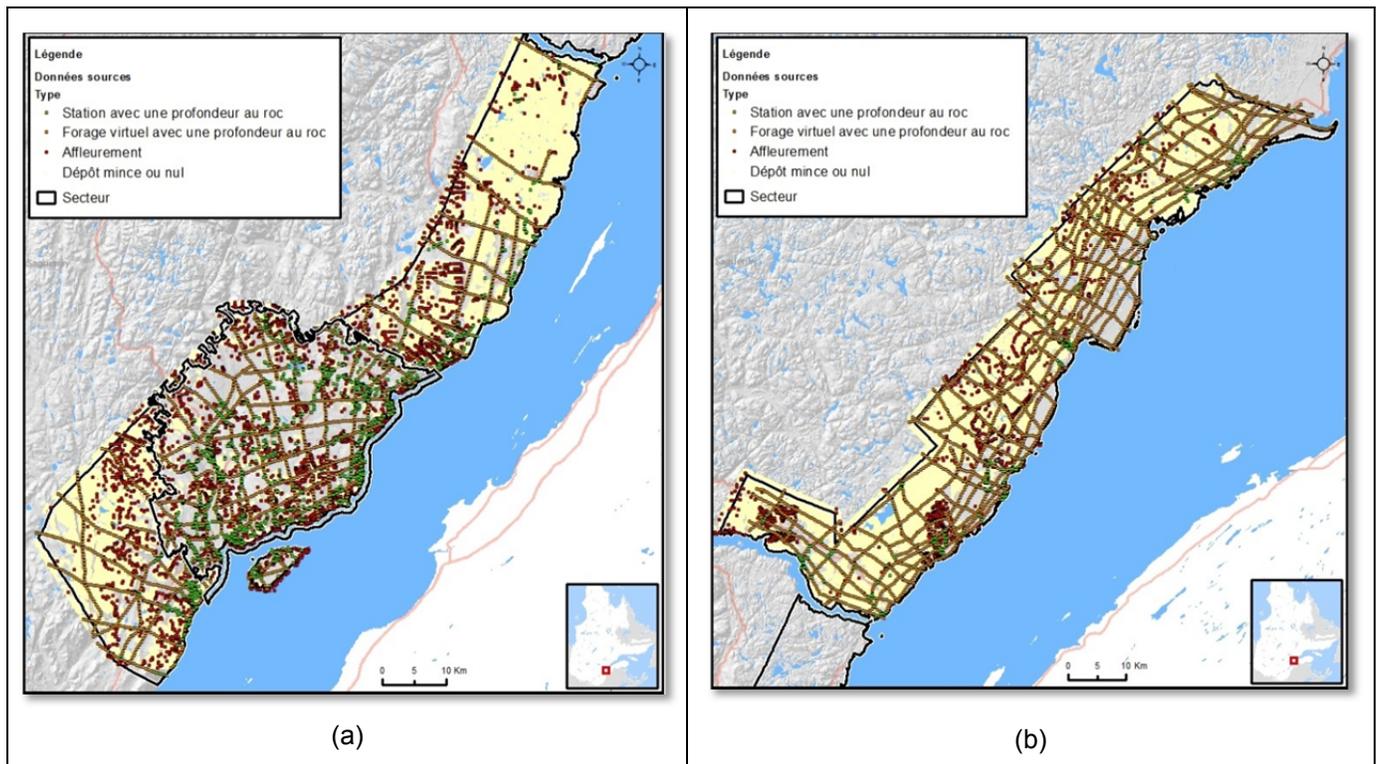


Figure 4-69 : Type de données sources utilisées par secteur :
(a) secteurs de Charlevoix, de l'astroblème et de l'Isle-aux-Coudre, (b) secteur de la Haute-Côte-Nord.

Le tableau 4-2 contient le nombre exact de données pour chaque type et pour chacune des zones d'interpolation.

Tableau 4-2 : La quantité de données sources présentes dans chacune des zones et utilisées pour la première interpolation.

Secteurs		Station avec profondeur au roc	Forage virtuel avec profondeur au roc	Affleurement	Dépôts minces
Charlevoix	Dépôts épais	256	535	438	657
	Dépôts minces ou nuls	272	492	3 113	109 733
Astroblème		1 632	1 046	1 750	193
HCN	Dépôts épais	413	1 812	567	1608
	Dépôts minces ou nuls	61	1 173	1 777	105 132
L'Isle-aux-Coudres		71	51	175	199

Étape 2 – Première modélisation sans les stations indiquant une épaisseur minimale de dépôts

Pour chacune des zones la méthode d'interpolation choisie est le krigeage ordinaire (Dugrain, 2011). Le tableau 4-3 présente les paramètres du semi-variogramme dans chacune des zones pour la première interpolation.

Tableau 4-3 : Paramètres des semi-variogrammes théoriques pour chacune des zones.

Secteur		Modèle	Pépite	Portée	Palier
Charlevoix	Dépôts épais	Sphérique	25	2 100	133
	Dépôts minces ou nuls	Sphérique	0	1 500	0.33
Astroblème		Sphérique	25	2 100	133
HCN	Dépôts épais	Sphérique	8	1 600	320
	Dépôts minces ou nuls	Sphérique	0.3	2 000	0.32
Ile-aux-Coudres		Sphérique	0.55	521	0.4

Étape 3 – Comparaison et deuxième modélisation avec les stations indiquant une épaisseur minimale de dépôts

L'épaisseur des stations ou des forages virtuels n'atteignant pas le roc est comparée avec le résultat de la première modélisation. Bien que ces stations et forages virtuels n'atteignent pas le roc ils indiquent tout de même une épaisseur minimale de dépôts qui doit être considérée dans la modélisation. Ils sont alors ajoutés au jeu de données sources, mais seulement s'ils indiquent une épaisseur minimale supérieure à l'épaisseur estimée sur le résultat de la première modélisation. La profondeur du roc pour ces stations ou forages virtuels est alors fixée à leur profondeur totale.

La figure 4-70 illustre l'effet de l'ajout des stations et forages n'atteignant pas le roc sur la modélisation de l'épaisseur des dépôts. Les forages B et C n'atteignent pas le roc, mais seulement le forage B indique une épaisseur de dépôts supérieure à la première modélisation (trait bleu sur la figure 4-70). L'ajout du forage B au jeu de données de la deuxième modélisation (trait vert sur la figure 4-70) permet d'augmenter l'épaisseur des dépôts dans cette région.

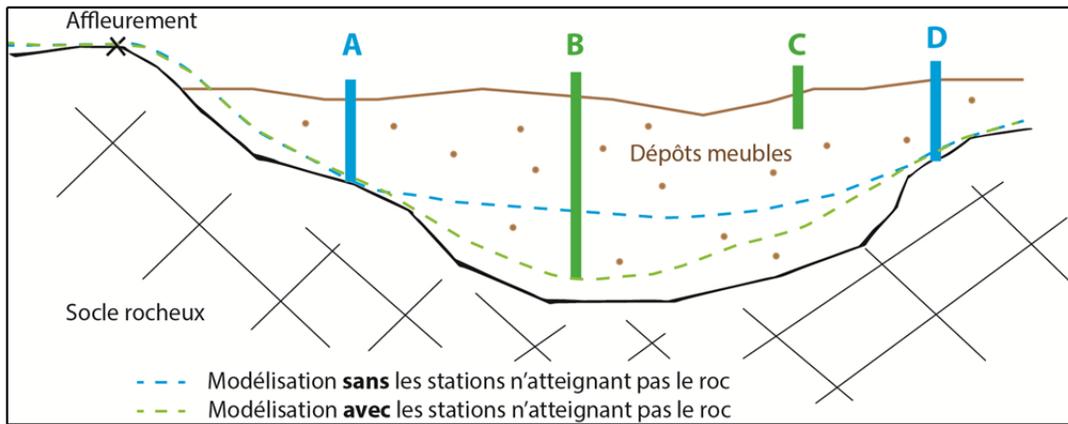


Figure 4-70 : Effet de l'ajout des forages n'atteignant pas le roc sur la modélisation de l'épaisseur des dépôts.
Modifié de Dugrain (2011).

Dans la zone d'étude, **597 stations** et **12 forages virtuels** indiquent une épaisseur supérieure à la première modélisation. Ces données sont donc ajoutées au jeu de données sources pour la deuxième modélisation. Le tableau 4-4 indique le nombre de stations et forages virtuels n'atteignant pas le roc ajoutés pour chaque zone d'interpolation.

Tableau 4-4 : Quantité de données sources ajoutées dans chacune des zones pour la deuxième interpolation.

Secteur		Station sans profondeur au roc	Forage virtuel sans profondeur au roc
Charlevoix	Dépôts épais	135	3
	Dépôts minces ou nuls	14	-
Astroblème		292	9
HCN	Dépôts épais	143	-
	Dépôts minces ou nuls	10	-
L'Isle-aux-Coudres		6	-

Puisque que de nouvelles données ont été ajoutées, les paramètres du semi-variogramme sont réévalués et fixés. Le tableau 4-5 présente les paramètres du semi-variogramme utilisés dans chacune des zones pour la deuxième modélisation.

Tableau 4-5 : Paramètres des semi-variogrammes théoriques pour chacune des zones.

Secteur		Modèle	Pépite	Portée	Palier
Charlevoix	Dépôts épais	Sphérique	100	1 800	130
	Dépôts minces ou nuls	Sphérique	0	1 500	0.33
Astroblème		Sphérique	10	1 100	220
HCN	Dépôts épais	Sphérique	26	1 790	350
	Dépôts minces ou nuls	Sphérique	0,25	1 800	0.15
L'Isle-aux-Coudres		Sphérique	0,6	1 200	0.35

Étape 4 – Création d'une mosaïque et application d'un filtre matriciel de lissage

Une fois les résultats d'interpolation obtenus pour chaque zone, une mosaïque est créée pour obtenir une seule matrice. Pour atténuer les différences aux limites des zones ou encore pour assigner une valeur à une cellule affichant une valeur nulle dans la mosaïque, un filtre matriciel de lissage est appliqué. Ce filtre consiste en une matrice de 3 pixels par 3 pixels se déplaçant sur la mosaïque et qui réévalue la valeur du pixel central en calculant la moyenne des huit cellules voisines. Comme l'illustre la figure 4-71 ce filtre permet d'éliminer les anomalies ponctuelles et d'adoucir le modèle.

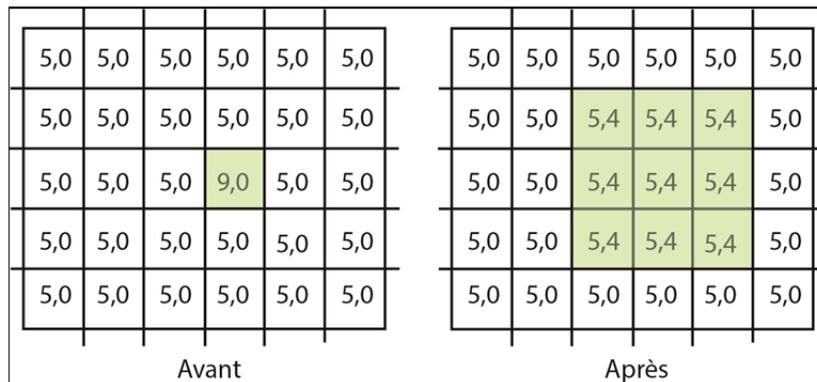


Figure 4-71 : Fonctionnement du filtre passe-bas.

Les valeurs nulles (notée *NoData*) obtiennent ainsi une valeur par lissage, mais sont ignorées dans le calcul des valeurs des cellules adjacentes.

4.6.1.3 Résultats

La carte #15a – *Épaisseur des dépôts* est complétée par la carte #15b – *Erreur type de l'épaisseur des dépôts meubles* (annexe numérique AN1).

Épaisseur des dépôts meubles

La mosaïque créée à partir des six zones d'interpolation fait l'objet de la carte #15a – *Épaisseur des dépôts meubles* (annexe numérique AN1). Elle présente une estimation de l'épaisseur des dépôts meubles.

Dans son ensemble, le territoire de CHCN présente de faibles épaisseurs de dépôts variant entre 0 et 5 m localisés dans les hautes terres où les affleurements rocheux et les dépôts de till mince prédominent. Certaines zones se distinguent nettement avec des épaisseurs plus significatives.

Pour le secteur des MRC de Charlevoix et Charlevoix-Est, deux zones retiennent notre attention. La dépression annulaire de l'astroblème de Charlevoix (figure 4-72) montre des épaisseurs plus significatives de dépôts entre 10 et 50 m et pouvant atteindre localement plus de 100 m particulièrement dans le secteur de Baie-Saint-Paul. Autrement, la zone centrale de l'astroblème se caractérise par des épaisseurs de dépôts étonnamment faibles de 1 à 10 m sauf pour certaines vallées comme celle passant par Saint-Hilarion. Cette faible épaisseur semble attribuable à une topographie du roc beaucoup moins accidentée au sein de l'astroblème par comparaison au comportement du roc à l'extérieur de l'astroblème. Les secteurs de Saint-Siméon et de Sainte-Catherine montrent également quelques zones de dépôts relativement épais (25 – 75 m).

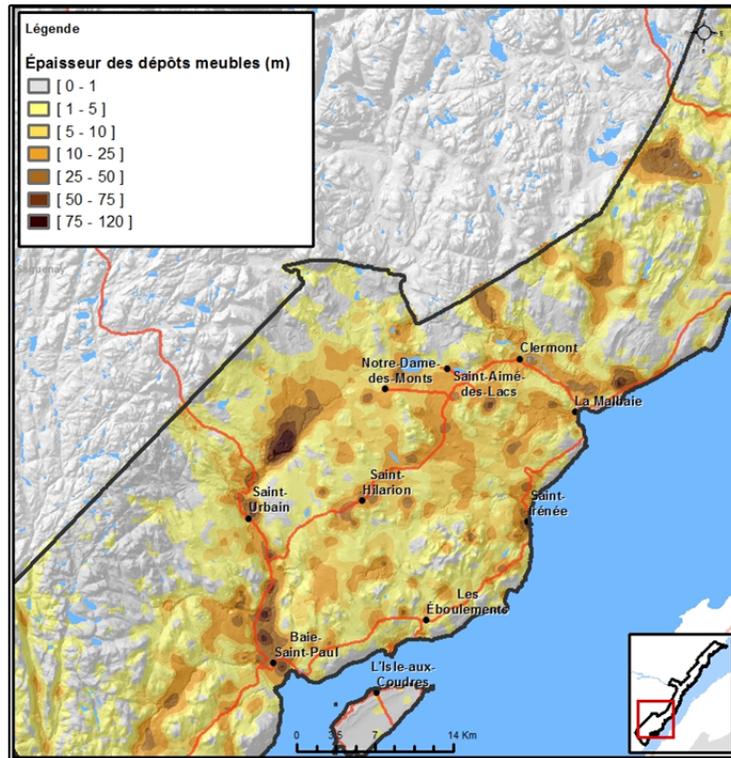


Figure 4-72 : Épaisseur des dépôts dans l'astroblème de Charlevoix.

Pour la MRC de La Haute-Côte-Nord (figure 4-73), les basses-terres près du Fleuve correspondent aux zones de dépôts plus épais culminant vers les municipalités de Portneuf-sur-Mer et Forestville, qui font parties de la principale étendue de dépôts meubles épais (75 – 120 m) du territoire. La vallée de Sacré-Cœur se distingue également avec des épaisseurs significatives. Autrement, les zones avec des épaisseurs de dépôts notables sont localisées au sein des multiples vallées qui sillonnent le territoire.

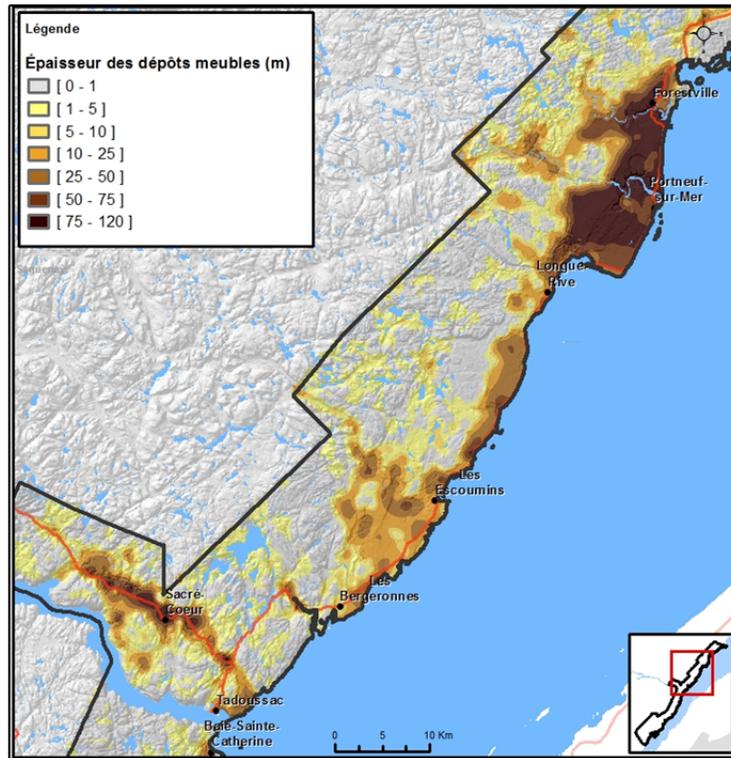


Figure 4-73 : Épaisseur des dépôts sur le territoire de la MRC de La Haute-Côte-Nord.

Validation et erreur sur l'épaisseur des dépôts

Pour évaluer la validité des interpolations par krigeage, la méthode de validation croisée est utilisée. Cette méthode réévalue par krigeage les pixels qui possèdent une valeur connue en omettant d'inclure cette valeur dans le système de krigeage. La moyenne quadratique, la moyenne quadratique normalisée, l'écart-type et la moyenne normalisée de la différence pour chaque pixel testé sont ensuite calculés. Le tableau 4-6 présente ces valeurs statistiques pour chaque zone d'étude.

Tableau 4-6 : Valeurs obtenues pour la validation des modèles de l'épaisseur des dépôts meubles.

Secteur		Moyenne quadratique	Moyenne quadratique normalisée	Écart-type moyen	Moyenne normalisée
Charlevoix	Dépôts épais	11.5	0.9	13.0	0.0043
	Dépôts minces ou nuls	0.86	1.9	0.46	-0.0001
Astroblème		12.9	1.8	8.6	-0.0056
HCN	Dépôts épais	9.7	0.9	12.0	-0.0006
	Dépôts minces ou nuls	0.83	1.5	0.53	-0.0026
L'Isle-aux-Coudres		0.86	1.0	0.86	-0.0064

Pour les six interpolations :

- la moyenne quadratique est de 9,7 et 12,9 m pour les dépôts épais et de 0,83 à 0,85 m pour les dépôts minces;
- la moyenne quadratique normalisée est de 0,9 pour les dépôts épais et de 1,0 à 1,9 pour les dépôts minces;

- la moyenne normalisée est très près de zéro pour tous les dépôts;
- l'écart-type moyen est de 8,6 à 13 m pour les dépôts épais et de 53 à 86 cm pour les dépôts minces.

Ces statistiques reflètent l'incertitude des modèles de dépôts; les modèles d'interpolation utilisés sont donc considérés comme valides à l'intérieur de cette incertitude.

La carte #15 (b) – *Erreur type de l'épaisseur des dépôts meubles* (annexe numérique AN1) présente la grandeur de l'erreur sur l'épaisseur des dépôts en tout point dans la zone d'étude. Les zones affichant la meilleure précision correspondent aux hautes terres où les affleurements rocheux et les dépôts de till mince sont prédominants. Les zones affichant une précision moyenne sont situées à proximité des coupes stratigraphiques ou dans les secteurs de forte densité d'information (zones brunes foncées sur la figure 4-64b). Enfin, les zones affichant la plus grande erreur sur l'épaisseur sont situées dans les secteurs possédant peu ou pas d'information sur l'épaisseur des dépôts meubles (zones grises et où il y a absence de stations sur la figure 4-69).

4.6.2 Topographie du roc

La topographie du roc est présentée sur deux cartes différentes pour lesquelles deux méthodes ont été appliquées :

- Méthode 1 : Épaisseur des dépôts par krigeage soustrait du modèle numérique de terrain (MNA) de laquelle résulte la carte #16a – *Topographie du roc* (annexe numérique AN1);
- Méthode 2 : Réseau triangulaire irrégulier (Triangulated Irregular network, TIN) de laquelle résulte la carte #16b – *Topographie du roc TIN* (annexe numérique AN1).

4.6.2.1 Méthode 1 : Épaisseur des dépôts par krigeage soustrait du modèle numérique de terrain (MNA)

Les données sources, la méthodologie appliquée et les résultats obtenus pour l'estimation de l'élévation du toit du roc (topographie du roc) en soustrayant l'épaisseur des dépôts à la l'élévation du terrain (carte #3 – *Modèle numérique de terrain*, annexe numérique AN1) sont présentés dans cette section.

Données sources

Les différentes données utilisées pour estimer la topographie du socle rocheux sont :

- l'élévation de la surface du terrain telle que présentée par la carte #3 – *Modèle numérique de terrain* (annexe numérique AN1);
- l'épaisseur des dépôts meubles (carte #15a – *Épaisseur des dépôts meubles*, annexe numérique AN1).

Méthodologie

La méthodologie appliquée pour la première approche se base sur la connaissance de l'épaisseur des dépôts de surface établie par une interpolation utilisant le krigeage. La soustraction de l'épaisseur des dépôts meubles à l'élévation de la surface du terrain donne en principe une indication de la topographie du socle rocheux (figure 4-74).

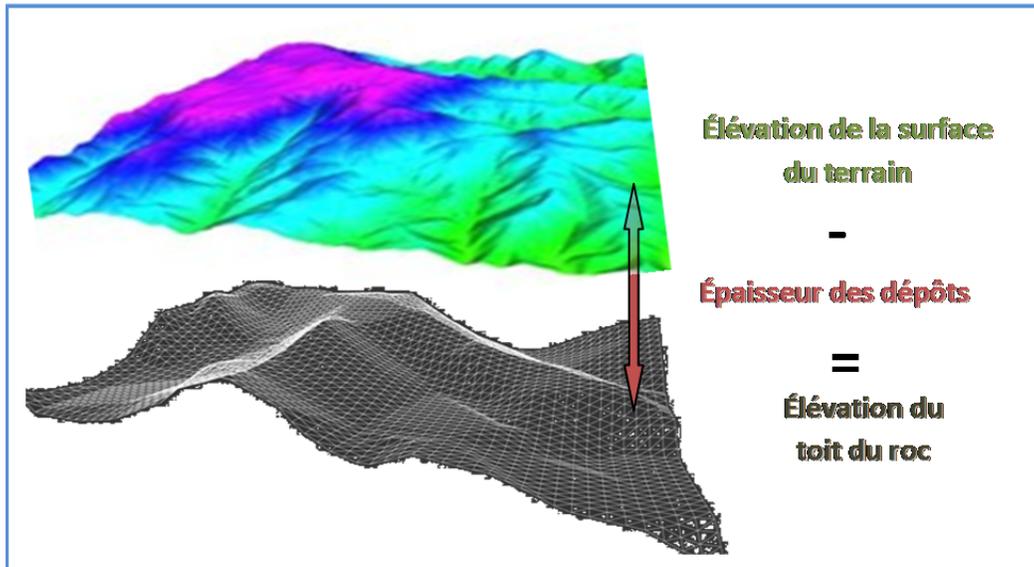


Figure 4-74 : Modélisation de la topographie du roc par l'application de la *Méthode 1*.

Résultats

La première approche permet d'obtenir la carte #16a – *Topographie du roc* (annexe numérique AN1). Cette carte présente l'élévation du toit du roc avec un dégradé de couleur. Les failles fragiles, les failles ductiles, les linéaments sont aussi localisés sur cette carte.

Cette carte permet d'avoir une estimation de l'élévation du toit du roc si l'estimation de l'épaisseur des dépôts est bien contrôlée. Dans les zones ayant moins de points de contrôle, l'imprécision de la surface interpolée de l'épaisseur de dépôt additionnée à l'erreur du MNA (+/-10 m), peuvent localement générer des aberrations.

Le résultat obtenu par la première méthode reflète des variations retrouvées à la surface du terrain, c'est-à-dire des variations présentes sur le modèle numérique d'altitude (carte #3 – *Modèle numérique de terrain*, annexe numérique AN1). Lorsque l'épaisseur des dépôts est mince ou nulle, ces variations correspondent souvent à celles du socle rocheux. Cependant, lorsque d'importantes épaisseurs de dépôts recouvrent le roc, les variations s'apparentent à celles retrouvées dans les dépôts plutôt qu'à celles caractérisant le roc. Un exemple est donné le long de la rivière Portneuf où le modèle obtenu exprime des variations appartenant aux dépôts meubles telle la présence d'anciens méandres. De plus, en raison de son lien direct avec le modèle numérique d'altitude et l'interpolation de l'épaisseur des dépôts par krigeage, le premier modèle ne permet pas toujours de représenter des variations abruptes dans le socle rocheux.

4.6.2.2 *Méthode #2 : Réseau triangulaire irrégulier (TIN)*

Données sources

Les données sources utilisées pour la deuxième méthode sont identiques à celles présentées pour la modélisation de l'épaisseur des dépôts meubles (cf. section 4.6.1.1). Les forages indiquant une profondeur minimale de dépôts font aussi parti du jeu de données sources pour la modélisation de la topographie du roc. Enfin, pour convertir les profondeurs en élévation, le modèle numérique d'altitude (carte #3 – *Modèle numérique de terrain*, annexe numérique AN1) fait également partie des données utilisées.

Méthodologie

La deuxième approche modélise la topographie du roc à l'aide d'un réseau de triangulaires irréguliers (TIN). Cette méthode consiste à créer des triangles entre les points d'élévation connue. Chaque triangle est le plus petit possible tout en respectant les conditions de Delaunay. Ces dernières exigent que tous les cercles circonscrits

par les trois sommets de chaque triangle du réseau ne soient vides, c'est-à-dire qu'il ne contienne pas d'autres points. La taille des triangles est fonction de la quantité et de la proximité des données à relier. Plus les triangles sont petits, plus la modélisation est précise. Cette méthode permet aussi d'interdire la création de triangles nécessitant un segment de triangle trop long. La valeur maximale a été fixée à 1 100 mètres ce qui correspond en fait à la largeur maximale de la rivière Saguenay à l'intérieur de la zone d'étude. Ainsi, aucun triangle ne chevauche le fjord du Saguenay.

Une autre particularité de la méthode TIN est qu'elle conserve la valeur de l'élévation aux points d'observation. Elle n'est alors pas dépendante de la résolution de la matrice résultante choisie, en l'occurrence 250 mètres, et offre donc une modélisation qui passe directement par les points d'élévation. La figure 4-75 illustre cette différence entre la première et la deuxième méthode.

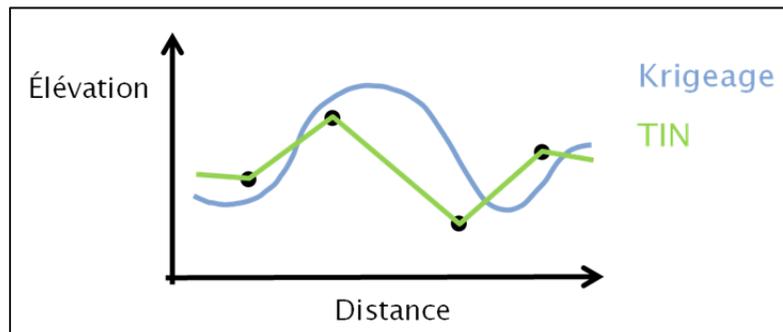


Figure 4-75 : Comportement des deux méthodes d'interpolation aux points d'élévation connus.

Résultats

Cette approche permet de créer la carte #16b – *Topographie du roc TIN* (annexe numérique AN1) qui présente l'élévation du toit du roc avec un dégradé de couleur. Les failles fragiles, les failles ductiles, les linéaments sont aussi localisés sur cette carte.

Cette méthode interpole de façon linéaire ce qui permet de tenir compte des variations brutales de la topographie du roc. Cependant, cette méthode génère des artefacts triangulaires qui nuisent à l'esthétique du résultat. La longueur maximale d'un segment d'un triangle étant fixée à 1 100 mètres, des trous dans le modèle apparaissent lorsqu'il y a absence d'information. Cette particularité permet d'obtenir un modèle représentatif du niveau de détail qu'il est possible d'atteindre avec un jeu de données sources de faible densité et caractérisé par une distribution spatiale en grappes.

Tout comme la carte #16a – *Topographie du roc* (annexe numérique AN1) obtenue par l'application de la méthode 1, la topographie du roc TIN (carte #16b – *Topographie du roc TIN*, annexe numérique AN1) épouse le relief du modèle numérique de terrain (carte #3 – *Modèle numérique de terrain*, annexe numérique AN1) où l'épaisseur des dépôts est inférieure à 1 m et nulle. Sur l'ensemble du territoire CHCN (figure 4-76), l'élévation du roc varie entre -115 à 1 118 mètres. Les élévations les plus grandes de la topographie du roc se trouvent dans le secteur de Charlevoix tandis que les élévations inférieures au niveau de la mer se localisent principalement dans la municipalité de Baie-Saint-Paul dans la vallée du Gouffre, dans la vallée de La Malbaie et dans les basses terres de la Haute-Côte-Nord, principalement sur le territoire municipalisé de Portneuf-sur-Mer mais également de façon locale dans les municipalités des Escoumins, de Longue-Rive, de Forestville et de Colombier.

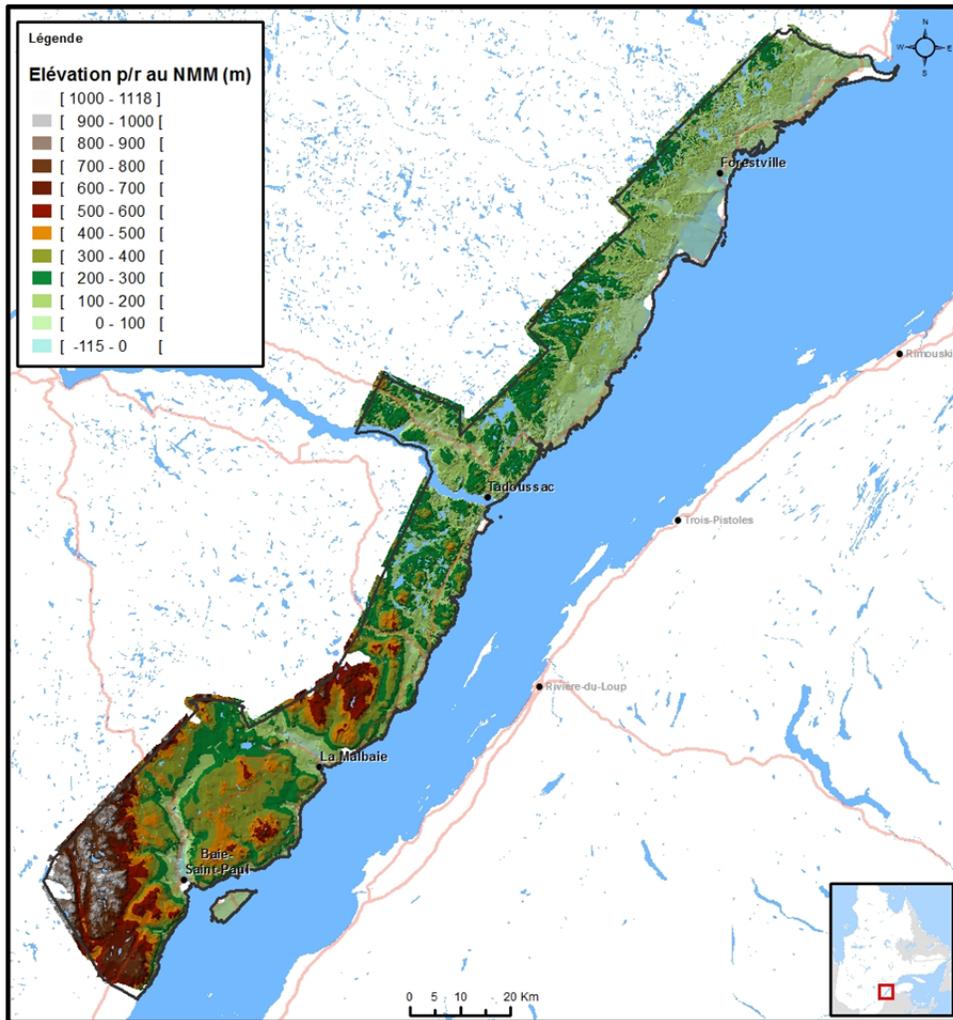


Figure 4-76 : Topographie du roc obtenu avec la méthode TIN.

5 BILAN HYDROLOGIQUE

À l'échelle de la planète, l'eau se renouvelle sans cesse par circulation sous sa forme liquide, solide ou gazeuse. La pluie ou la neige, les rivières ou les océans, les eaux souterraines ou les glaciers semblent distincts les uns des autres, mais ils constituent en réalité différents aspects du cycle de l'eau. Ce cycle se déroule donc à la fois sur terre, sous terre et dans l'atmosphère, où la mobilité de l'eau est conceptualisée en 4 principaux processus (figure 5-1) :

- les précipitations (P);
- l'évapotranspiration (ETP);
- le ruissellement (Ru);
- l'infiltration (I).

Ces processus du cycle de l'eau peuvent être mesurés ou estimés, et ils interagissent selon une équation générale représentant le bilan hydrologique :

$$\text{Précipitations} = \text{Évapotranspiration} + \text{Ruissellement} + \text{Infiltration}.$$

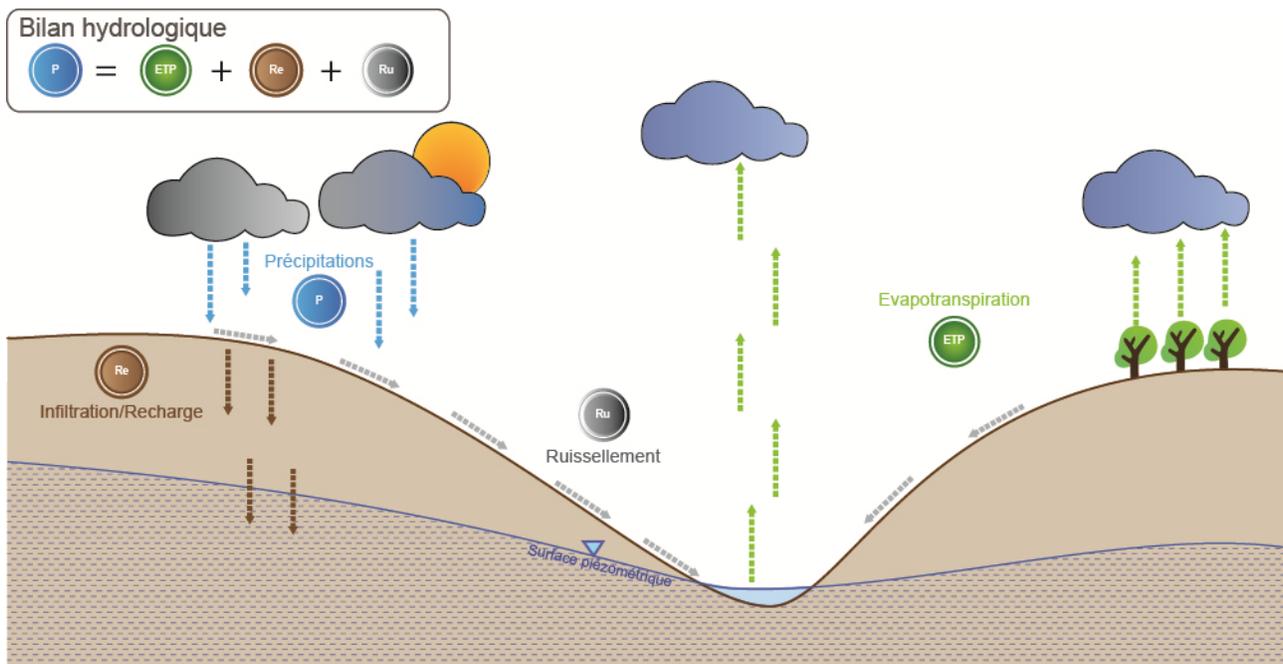


Figure 5-1 : Bilan hydrologique.

La quantité d'eau disponible à la recharge des aquifères est ainsi étroitement liée à plusieurs facteurs, dont la géomorphologie du territoire, la végétation et le climat.

Ce chapitre décrit chacun des processus du cycle de l'eau mentionnés plus haut et présente les méthodes de **quantification des paramètres conduisant à l'estimation de la recharge des aquifères**. Dans le cadre du projet PACES-CHCN cette recharge est estimée par surface de 62 500 m² (250mX250m).

5.1 Réseau de mesures et données climatiques

Sur le territoire de CHCN, les données climatiques journalières telles que la température minimum (T_m), la température maximum (T_M) et la pluviométrie (P) sont issues de 33 stations météorologiques. Parmi ces 33 stations, 10 sont localisées sur le territoire de la MRC de Charlevoix, 11 sur celui de la MRC de Charlevoix-Est et

12 sur celui de la MRC de La Haute-Côte-Nord. La localisation de ces stations est donnée sur la carte #27 - Stations météorologiques, hydrométriques et de suivi de la nappe (annexe numérique AN1). Le gouvernement fédéral possède 8 des 33 stations alors que le gouvernement provincial en possède 25. Ces stations provinciales proviennent du réseau climatologique produit par le Service de l'information du milieu atmosphérique (SIMAT) de la Direction du suivi de l'état de l'environnement (DSÉE) du MDDELCC.

Dans le cadre du projet PACES-CHCN, des données climatologiques journalières sur l'ensemble du territoire, soit la température minimale (T_m), la température maximale (T_M) et les précipitations (P) mesurées aux stations provinciales, sont préalablement traitées par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ).

5.1.1 Données climatologiques fournies par le CEHQ

Les données fournies par les stations provinciales (DSÉE-SIMAT) sont utilisées par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) pour obtenir des données climatologiques journalières non seulement aux stations météorologiques, mais sur l'ensemble du territoire de la province de Québec. Pour ce faire, les températures (T_m et T_M) et les précipitations (P) mesurées aux stations provinciales sont interpolées par krigeage simple isotropique

(Poirier et al., 2012).

Ces données interpolées permettent au CEHQ d'estimer les apports verticaux¹ (Av) sur l'ensemble du territoire de la province.

Les valeurs d'apports verticaux journaliers (Av) sont estimés à l'aide des modèles hydrologiques, notamment le module de fonte HYDROTEL, selon la méthodologie décrite dans Poirier et al., (2012).

Comme illustré sur la figure 5-2, les données climatologiques sont fournies par extraction des interpolations sous la forme d'un maillage de points à chaque $0,1^\circ$ ($\approx 10\text{km}$).

À chaque point est attachée une valeur journalière de T_m , T_M , P et d' Av sur un historique de 110 ans (1900-2010). Ceci représente, pour chaque point, 365 valeurs pour chacune des 110 années, soit environ 40 150 données par paramètre.

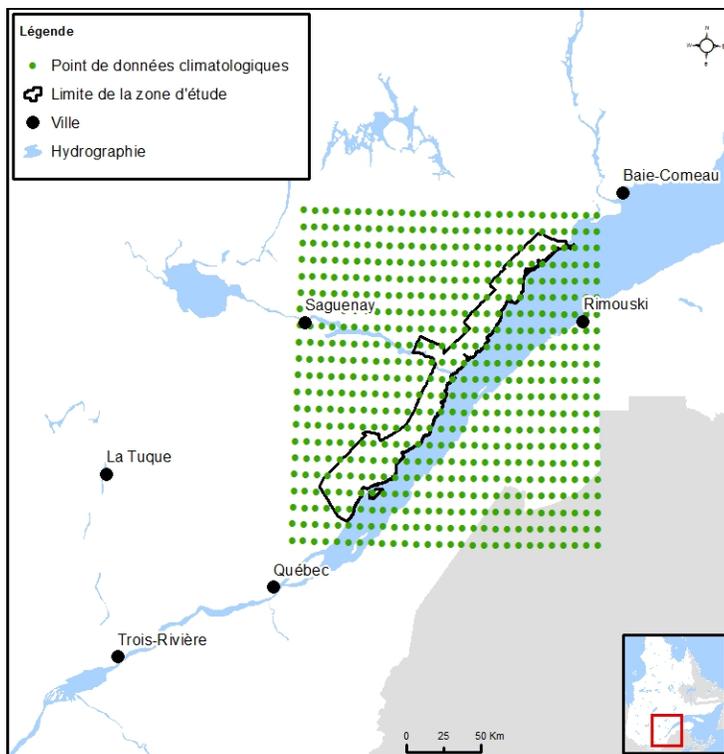


Figure 5-2 : Maillage des données climatologiques (T_M , T_m , P , Av) fournies par le CEHQ.

¹ Définition complète au § 5.2

5.1.2 Données climatologiques sélectionnées sur le territoire de CHCN

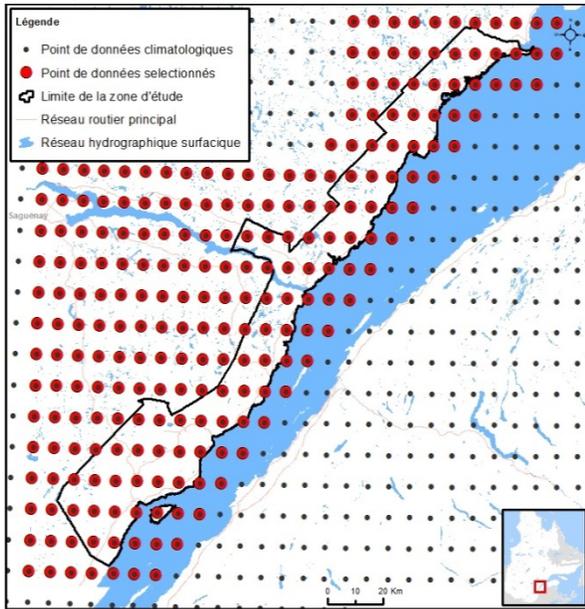


Figure 5-3 : Points de données climatologiques (TM, T_m, P, Av) sélectionnées pour le calcul de la recharge.

Les informations fournies par le CEHQ représentent une très grande quantité de données. Dans le cadre du projet PACES-CHCN, seules les données climatologiques de 235 points sur les cinq dernières années fournies (2005 à 2009) sont retenues (figure 5-3), afin de faciliter les traitements et le calcul du bilan hydrologique. La couverture des points retenus ne s'étend pas au-delà du fleuve Saint-Laurent.

Au total, chaque point possède une donnée par jour de chacun des 4 paramètres (T_m, T_M, P et Av) sur 5 ans, soit 7 300 données. Pour les 235 points sélectionnés dans le cadre du projet PACES-CHCN, l'estimation du bilan hydrologique représente donc le traitement de **1 715 500 données**.

5.1.3 Limites et discussion

5.1.3.1 Interpolation du CEHQ : répartition des stations météorologiques actives

Comme il est mentionné ci-dessus, pour faciliter le traitement, la période de 2005 à 2009 a été sélectionnée. Toutefois, parmi les 25 stations météorologiques du DSÉE-SIMAT, seulement 11 stations sont actives sur le territoire. La figure 5-4 localise ces 11 stations ainsi que les 5 autres stations actives situées à proximité de la zone d'étude.

C'est donc seulement les données météorologiques rattachées à 16 stations qui sont considérées pour les interpolations du CEHQ sur le territoire de CHCN pour les années 2005 à 2009¹. Les stations de mesure étant peu nombreuses et mal réparties, les résultats interpolés par le CEHQ présentent donc une précision variable d'un point à un autre sur le territoire à l'étude.

Ainsi, le territoire de la MRC de La Haute-côte-Nord présente 4 stations pour un territoire de 2 031 km², celle de Charlevoix-Est présente 2 stations pour 1 263 km² et la

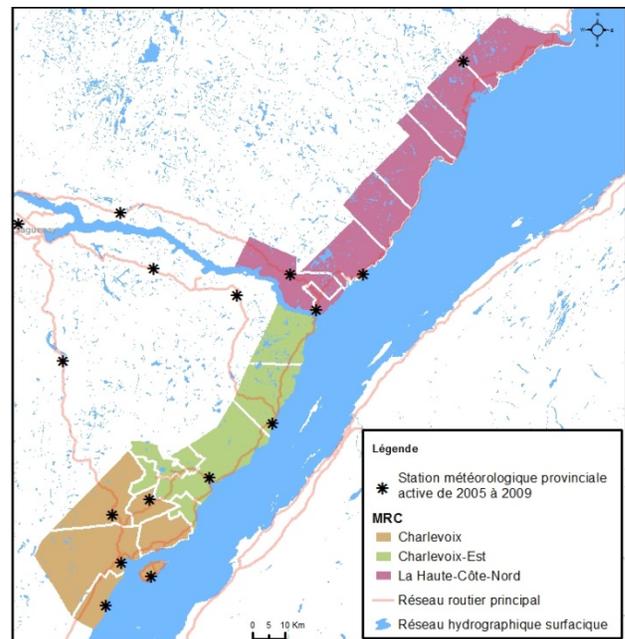


Figure 5-4 : Les stations météorologiques (DÉE – SIMAT, MDELCC) actives de 2005 à 2009.

¹ Selon le CEHQ, les données de la station 7048320 située sur le territoire de Tadoussac et mesurées après l'année 1973 n'ont pas été utilisées par le CEHQ. Au total, les données de seulement 10 stations auraient donc réellement été utilisées pour les interpolations de 2005 à 2009 sur le territoire de CHCN.

MRC de Charlevoix regroupe 5 stations pour 1 293 km². A titre d'exemple, la station la plus proche de la municipalité de Longue-Rive (la plus au centre de la Haute-Côte-Nord) se situe à plus de 36 km, alors que le territoire de Charlevoix possède quasiment une station par municipalité.

Cette variabilité dans la répartition des stations de données climatologiques utilisées par le CEHQ sur le territoire de CHCN entraîne donc une variabilité dans la précision du calcul du bilan hydrologique.

5.1.3.2 Ré-Interpolations dans le cadre du projet PACES-CHCN

La méthode d'estimation du bilan hydrologique présentée dans le présent chapitre est basée sur une estimation surfacique de 250m x 250m ce qui nécessite une ré-interpolation (méthode Spline) des points de données fournies par le CEHQ.

Or, le passage d'une résolution des données climatologiques plus faible (≈10 km) correspondant aux données du CEHQ à une résolution plus élevée (250 m), ainsi que la mauvaise distribution spatiale des données météorologiques de départ génèrent de nombreux artéfacts qui ne peuvent être compensés.

Ces artéfacts sont illustrés à la figure 5-5, celles-ci représentent les données climatologiques (T_M et P) interpolées le 24 septembre 2009. Certaines anomalies sont ainsi mises en évidence, lesquelles sont présentes quelle que soit la date, notamment un lissage de l'interpolation des températures sur la Haute-Côte-Nord^①; une exagération des températures au droit de l'astroblème et de l'Isle-aux-Coudres^②; une forte exagération de l'impact des précipitations élevées aux stations localisées dans les Laurentides^③ et aux Bergeronnes^④.

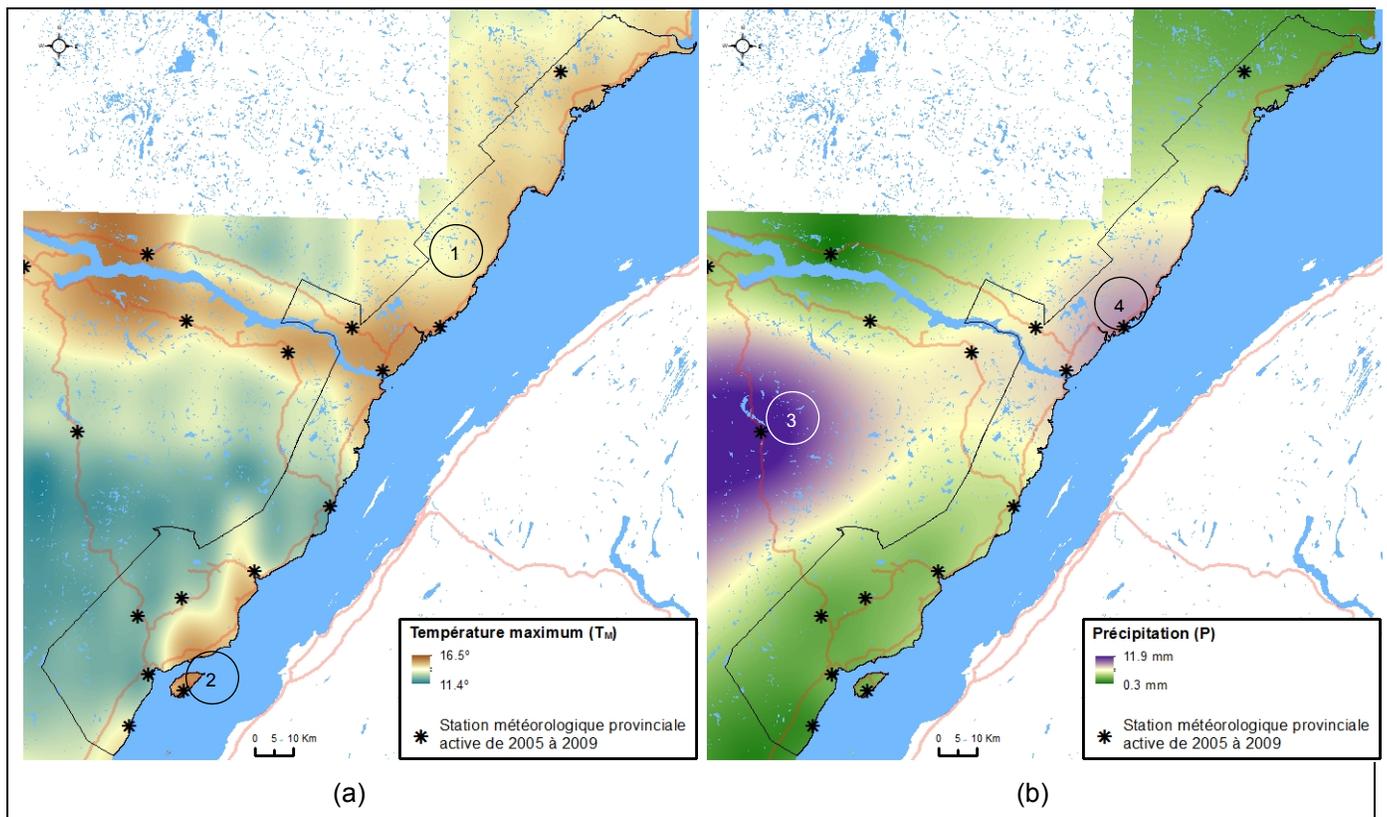


Figure 5-5 : Artéfacts d'interpolations des données climatologiques fournies par le CEHQ.

5.2 Précipitations : pluviométrie et apports verticaux



Par l'évapotranspiration, l'eau atteint la partie atmosphérique du cycle de l'eau. Cette eau évaporée, se condense dans les nuages puis retombe sous forme de précipitations liquide (pluie) ou solide (neige et glace).

Le cumul annuel des précipitations de pluie ou de neige constitue la **pluviométrie**. Ces paramètres sont mesurés *in situ* par des stations météorologiques spécialisées réparties sur le territoire. Pour le Québec, les données sont ainsi disponibles auprès d'Environnement Canada (National Climate Data and Information Archive) et du MDDELCC (DSÉE – SIMAT).

La **pluviométrie** permet un relevé journalier des hauteurs de précipitations (mm/jour) correspondant à la hauteur de pluie et l'équivalent en eau de la neige (EEN). La figure 5-5 illustre (pour l'année 2009) les variations de précipitations caractéristiques d'un climat continental avec de fortes précipitations aux intersaisons. La notion de pluviométrie exprime très bien les quantités d'eau quittant l'atmosphère, toutefois cette quantité d'eau n'est pas représentative de la quantité d'eau réellement disponible pour l'infiltration ou le ruissellement. Pour l'estimation de la recharge la notion d'apport vertical est donc priorisée.

Les apports verticaux (Av), représentent les quantités d'eau journalières effectivement disponibles pour l'infiltration ou le ruissellement. En effet, pour un climat de type continental tempéré caractéristique du territoire de CHCN, un couvert neigeux est présent de 4 à 5 mois par année. Comme le montre la figure 5-5 les AV sont quasi nuls en hiver, car la température sous le point de congélation limite considérablement la quantité d'eau disponible sous forme liquide et mobile en période hivernale. Au contraire les précipitations cumulées à la fonte de la neige génèrent de très forts Av au printemps. L'estimation des Av nécessite donc l'application de modèles de sublimation et de fonte des neiges (Poirier et al., 2012).

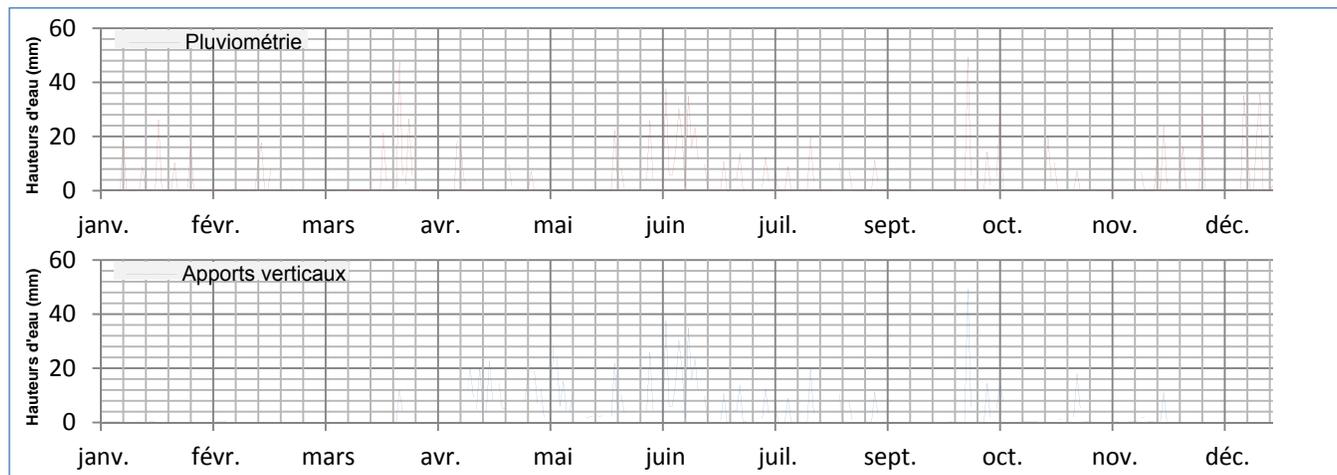


Figure 5-5 : Exemple des variations pluviométriques et d'apports verticaux pour l'année 2009.

À l'échelle du territoire de CHCN, les données journalières d'apports verticaux fournis par le CEHQ pour les années 2005 à 2009 ont été utilisées pour le calcul du bilan hydrique. A titre d'exemple, les AV pour l'année 2009 illustrés sur la figure 5-6 présentent notamment une variation des AV de 796 mm à plus de 1 100 mm par année dans le secteur de Petite-Rivière-Saint-François. Cette forte variation dans la partie sud-ouest du territoire

exprime de réelles fortes précipitations localisées dans ce secteur, amplifiées par les artéfacts de ré-interpolation énoncés précédemment.

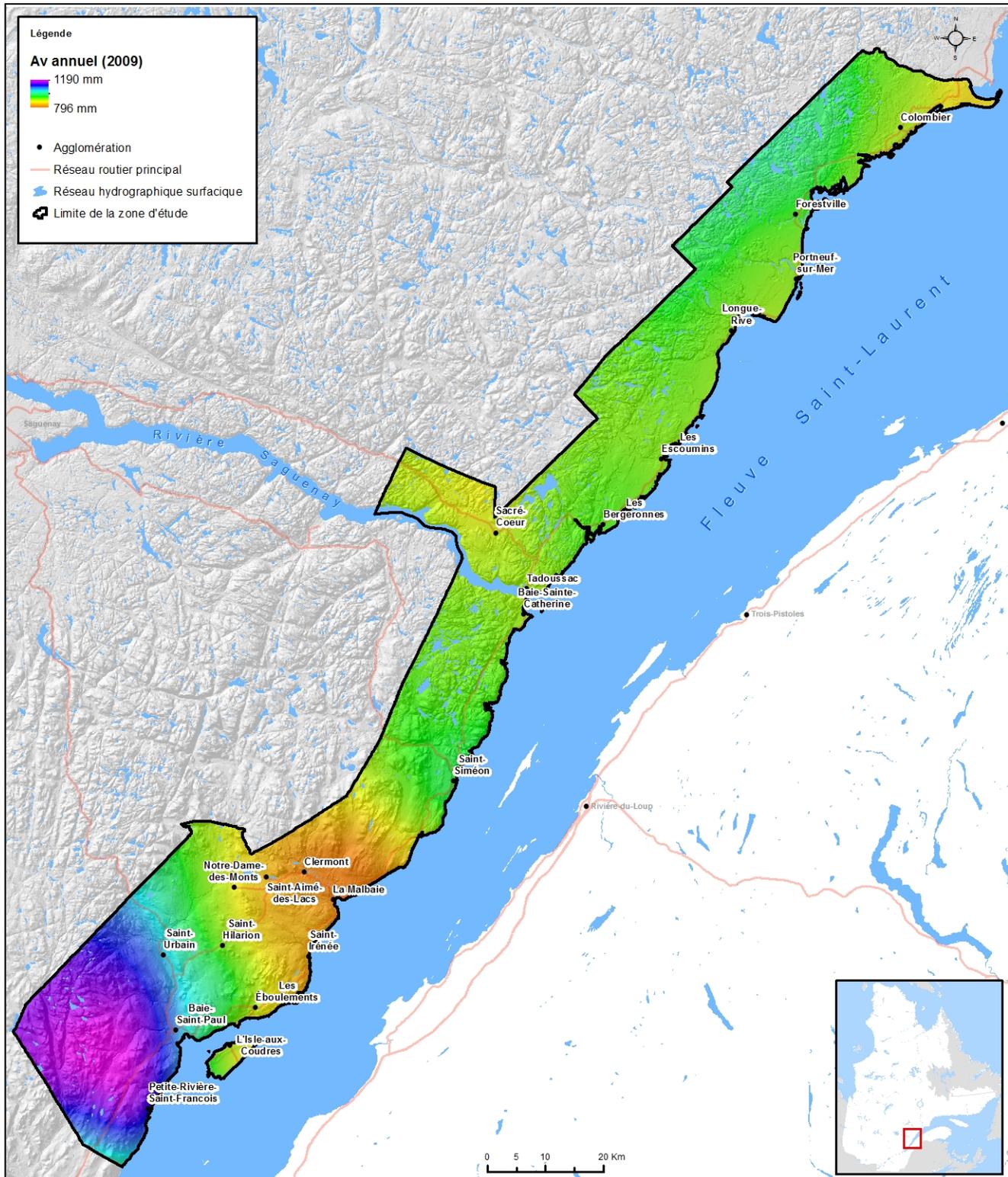


Figure 5-6 : Les apports verticaux (Av) pour l'année 2009.

5.3 Évapotranspiration



Photo : © Alex Berger

Le phénomène d'évapotranspiration comprend l'évaporation de l'eau contenue dans les sols et les étendues d'eau, et la transpiration des végétaux. Plus généralement, elle correspond aux phénomènes physiques du cycle de l'eau conduisant à la vaporisation, c'est-à-dire, le passage de l'eau de l'état solide ou liquide à l'état gazeux.

L'évaporation est largement conditionnelle aux précipitations, à la température de l'air, à la vitesse des vents ou encore à la chaleur fournie par le rayonnement solaire.

La transpiration est, quant à elle, un paramètre biologique fonction notamment du type et de la densité du couvert végétal.

On distingue l'évapotranspiration potentielle (ETp) et l'évapotranspiration réelle (Etr). L'évapotranspiration potentielle correspond au cas théorique où l'ensemble du couvert végétal est à saturation et ne manque pas d'eau pour sa consommation maximale. Elle représente, de ce fait, la quantité maximale d'évaporation selon les conditions climatiques du territoire considéré. En opposition, l'évapotranspiration réelle correspond à la quantité réelle d'eau évapotranspirée sur un territoire ou un site.

5.3.1 Méthode d'estimation de l'évapotranspiration

Dans le cadre du projet PACES-CHCN, l'estimation de ETp est réalisée suivant une équation empirique proposée par Hydro-Québec (Bisson et Roberge, 1983) en fonction des températures maximales (T_M) et minimales (T_m) journalières, telle que :

$$ETp = 0.029718(T_M - T_m)exp^{0.019\left[\frac{9}{5}(T_M + T_m) + 64\right]} \quad \text{équation (1)}$$

avec : ETp = Évapotranspiration potentielle (mm/jour)
 T_M = Température journalière maximale (°C)
 T_m = Température journalière minimale (°C)

Cette équation néglige un grand nombre de paramètres influençant grandement l'estimation de l'évapotranspiration comme les radiations solaires ou le taux de saturation du sol. Toutefois cette formule empirique permet une estimation valide de l'ETp à l'échelle d'un territoire comme celui de CHCN.

Il est très difficile d'estimer l'Etr à une échelle régionale, celle-ci est toutefois approximée à partir de l'ETp par une formule proposée par Zhang (2001), incluant un facteur lié à l'occupation du sol, noté w :

$$Etr = P \left[\frac{1 + w \times \frac{ETp}{P}}{1 + w \times \frac{ETp}{P} + \frac{P}{ETp}} \right] \quad \text{équation (2)}$$

avec : P = Précipitations (mm/jour)
w = Température journalière maximale (°C)

Selon Huet (2015), l'équation (2) peut être approximée en une fonction linéaire. Sur l'ensemble du territoire, l'Etr sera donc estimée comme une fraction de l'ETp, telle que :

- $Etr = 0,88 ETp$ équation (3)

5.3.2 ETr estimée pour le territoire de CHCN

À l'échelle du territoire de CHCN, les données des températures minimales et maximales fournies par le CEHQ ont permis d'établir une estimation de l'ETp pour chaque journée des années 2005 à 2009. L'ETr est par la suite estimée sur une année. À titre d'exemple, l'année 2009 illustrée sur la figure 5-7 présente une variation de l'ETr de 381 mm dans le secteur de Petite-Rivière-Saint-François à plus de 500 mm par année dans la partie nord du territoire de la Haute-Côte-Nord.

5.3.3 Limites et discussion

L'évapotranspiration est un paramètre **sensible et difficile à estimer** à une échelle régionale, car il nécessite une quantité importante de données climatiques qui sont généralement inexistantes. Les méthodes utilisées dans le cadre du projet PACES-CHCN présentent donc deux limites majeures.

1. **L'atténuation (le lissage) de la variabilité spatiale** induite par l'utilisation d'une équation empirique ne tenant compte que des variations de température. En effet, spatialement l'ETp présente une grande variabilité, considérant le nombre de paramètres entrant dans les mécanismes biologiques et physiques en jeu. La plupart de ces mécanismes doivent être négligés dans le cas présent.
2. **La cause d'erreur possible de l'ETr** induite d'une part par la simplification mathématique de l'estimation de l'ETp, par l'équation (1) et d'autre part dans l'application d'une relation empirique linéaire entre ETr et ETp, équation (3).

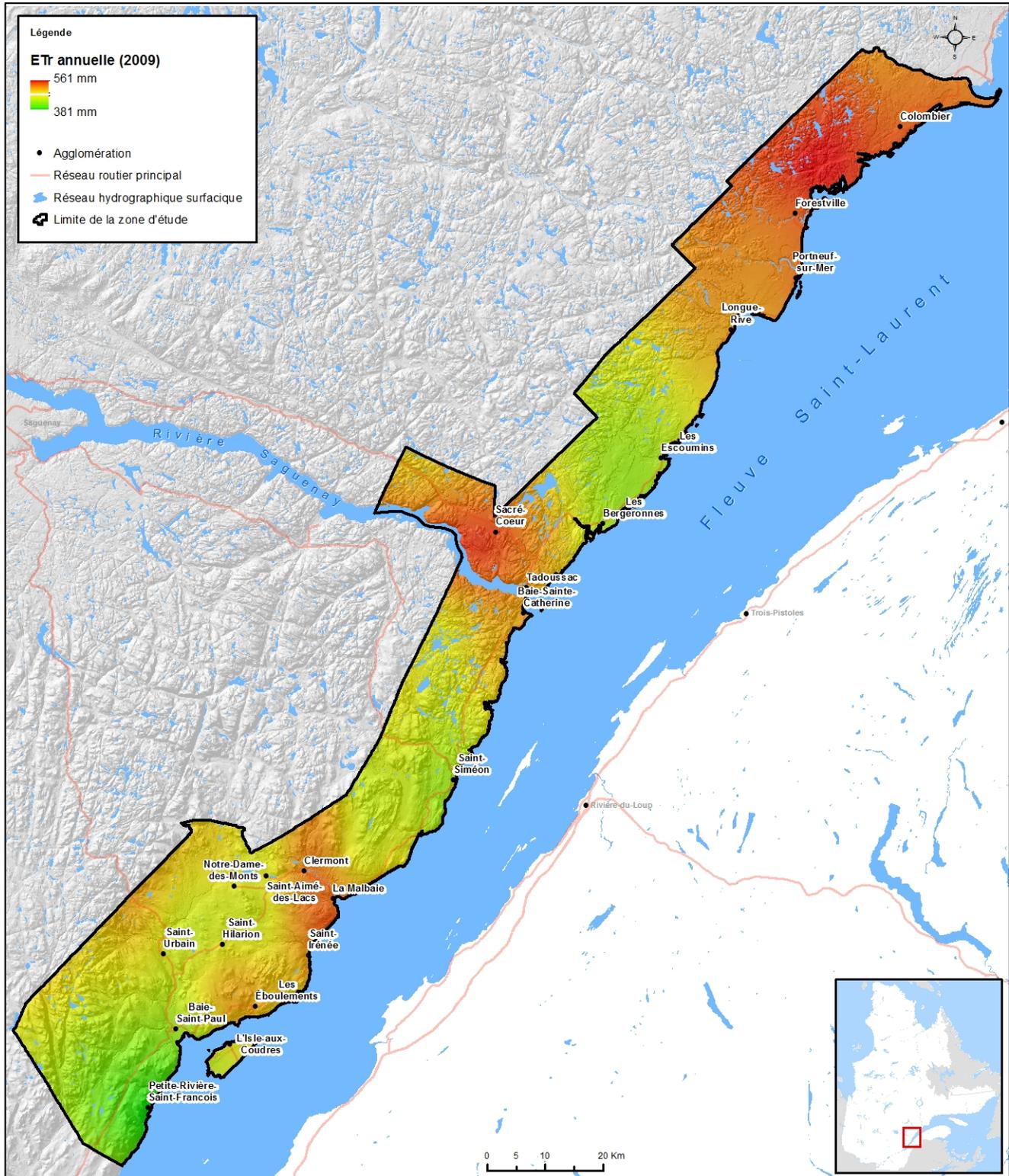


Figure 5-7 : L'évapotranspiration réelle (ETr) pour l'année 2009.

5.4 Ruissellement



Photo : © Cyrille Caillon

Suite aux précipitations, l'eau atteint les sols. En fonction de l'intensité des précipitations et des propriétés du sol, une fraction de l'eau de précipitation va ruisseler à la surface. Intensité de précipitation et caractéristiques des sols sont donc les deux facteurs principaux contrôlant le ruissellement.

Régionalement ce ruissellement peut donc présenter une variation à la fois temporelle (précipitations) et spatiales (sols). La possibilité de ruissellement est par exemple plus importante dans une région montagneuse, où les précipitations sont élevées et les pentes abruptes, que dans une plaine.

Comme toutes les étapes du cycle de l'eau, l'estimation du ruissellement présente plusieurs défis et une définition préalable des facteurs en jeu est indispensable.

Les valeurs des AV précédemment définis correspondent aux quantités d'eau réellement disponibles pour le ruissellement et l'infiltration.

Les propriétés des sols à considérer portent sur leur capacité à favoriser le ruissellement. Cette capacité est généralement représentée par l'emmagasinement du sol qui caractérise, par définition, la quantité d'eau potentiellement stockée dans un sol donné. L'emmagasinement s'oppose donc directement au ruissellement; plus un sol est capable de stocker de l'eau moins il est propice au ruissellement.

L'**emmagasinement** est directement lié aux propriétés intrinsèques d'un sol, cependant ce paramètre est difficile à mesurer sur le terrain et diverses méthodes ont donc été élaborées pour son estimation. Dans le cadre du projet PACES-CHCN, l'emmagasinement est estimé à partir de la méthode dite du *Curve Number* défini ci-après. Cette méthode utilise un paramètre, le *Curve Number (CN)* représentatif des propriétés du sol :

1. le type de sol (en fonction de sa nature, de sa granulométrie, etc.);
2. la pente du terrain;
3. le taux de saturation du sol.

5.4.1 Méthode d'estimation de l'emmagasinement (h_s)

La méthode du *Curve Number* développée par le *United States Department of Agriculture Soil Conservation Service*, a été modifiée par Monfet (1979) afin de mieux répondre aux conditions météorologiques, aux contextes géologiques ainsi qu'aux types d'occupation du sol du Québec méridional. La capacité d'emmagasinement du sol pour l'infiltration (h_s) est ainsi liée aux propriétés intrinsèques des sols définissant une valeur de *Curve Number (CN)*, selon la relation empirique suivante :

$$h_s = \frac{25\,400}{CN} - 254 \quad \text{équation (4)}$$

Cette relation a été définie expérimentalement par Mockus (1949 et 1964), par mesure et traçage du ruissellement direct par rapport à un événement de précipitation.

De façon générale un *Curve Number* représente une cote ou un coefficient de 1 à 100 attribuable à une surface et inversement proportionnel à la capacité d'emmagasinement. Ainsi plus un sol possède une valeur élevée du *CN*, plus sa capacité d'emmagasinement sera faible et plus la possibilité de ruissellement sera élevée. La détermination d'une valeur de *CN* caractéristique d'un sol nécessite de distinguer les concepts de ***Curve Number moyen (CN_i)*** et de ***Curve Number réel (CN_r)***.

Le CN_i dépend des propriétés intrinsèques du sol, telles la nature, la granulométrie et la capacité d'infiltration, mais aussi de la pente du terrain et du type d'utilisation du sol. Cette valeur de CN_i peut être assimilée à la capacité maximale d'emmagasinement d'un sol sec et elle est fixe au cours du temps.

Le CN_i intègre la variation de la capacité d'emmagasinement en fonction des conditions moyennes d'humidité. La valeur de CN_i d'un sol est donc journalière et dépendante du taux d'humidité initial du sol.

5.4.1.1 Classement des types de sol

Selon Monfet (1979), les types de sol sont répartis en quatre groupes de A à D selon leur capacité de ruissellement. Les informations sur les différents types de dépôts rencontrés sur le territoire de CHCN sont issues de la cartographie des dépôts quaternaire (carte #12 – *Géologie du Quaternaire*, annexe numérique AN1). On constate dans le tableau 5-1 que les sables et graviers associés à un faible ruissellement correspondent au groupe A; tandis que le roc, l'argile et le till constituant des dépôts plus propices au ruissellement sont classés dans le groupe D.

Tableau 5-1 : Classement des types de sol selon leur capacité de ruissellement.

Type de sols	Code des dépôts quaternaires (CGC)	Groupe	Ruissellement
Sédiments grossiers	Go, Gx	A	Faible
Sédiments moyens à grossiers	Ce, Mb, Mgb, Mgd, Lgb, Lgd, Ac, Ed, Lb	B	↓
Sédiments moyens à fins	Ax, Ap, GxT, Cr, C, L, At, Ma, MGi	C	
Sédiments fin et roches cristallines ou sédimentaires	Tm, Tc, R, O, Cg, Mga, Lga	D	

5.4.1.2 Curve Number moyen (CN_i) en fonction du type et de la pente des sols

La charte finale présentée sur le tableau 5-2 présente les valeurs de CN_i attribuées à chaque groupe de sol en fonction de la pente et de l'occupation du sol. La capacité de ruissellement du sol y est autant plus élevée que la pente d'un terrain est forte. Cette charte est adaptée de celle de Monfet (1979) afin de correspondre à la gamme de sols rencontrés sur le territoire de CHCN.

Tableau 5-2 : Curve Number moyen (CN_i) selon le groupe de dépôt et leur pente (modifiée de Monfet 1979).

Occupation du sol	Pente (%)	Type de sol			
		A	B	C	D
Zone agricole (+ zone humide et découverte)	< 3%	62	72	79	82
	<3-8%<	64	76	84	88
	<8-15%<	70	80	87	90
	>=15%	90	90	90	90
Forêt, autres	< 3%	24	54	68	76
	<3-8%<	33	59	73	79
	<8-15%<	44	66	78	83
Zone urbaine	>=15%	90	90	90	90
	nd	73	83	88	90

Au total, 22 valeurs différentes de CN_i sont présentes sur le territoire et leur répartition est hétérogène. Graphiquement (figure 5-8) un CN de 90 s'applique à 48.2 % de la superficie du territoire municipalisé de CHCN et la gamme de CN de 50 à 99 représente une couverture territoriale de 96.6%.

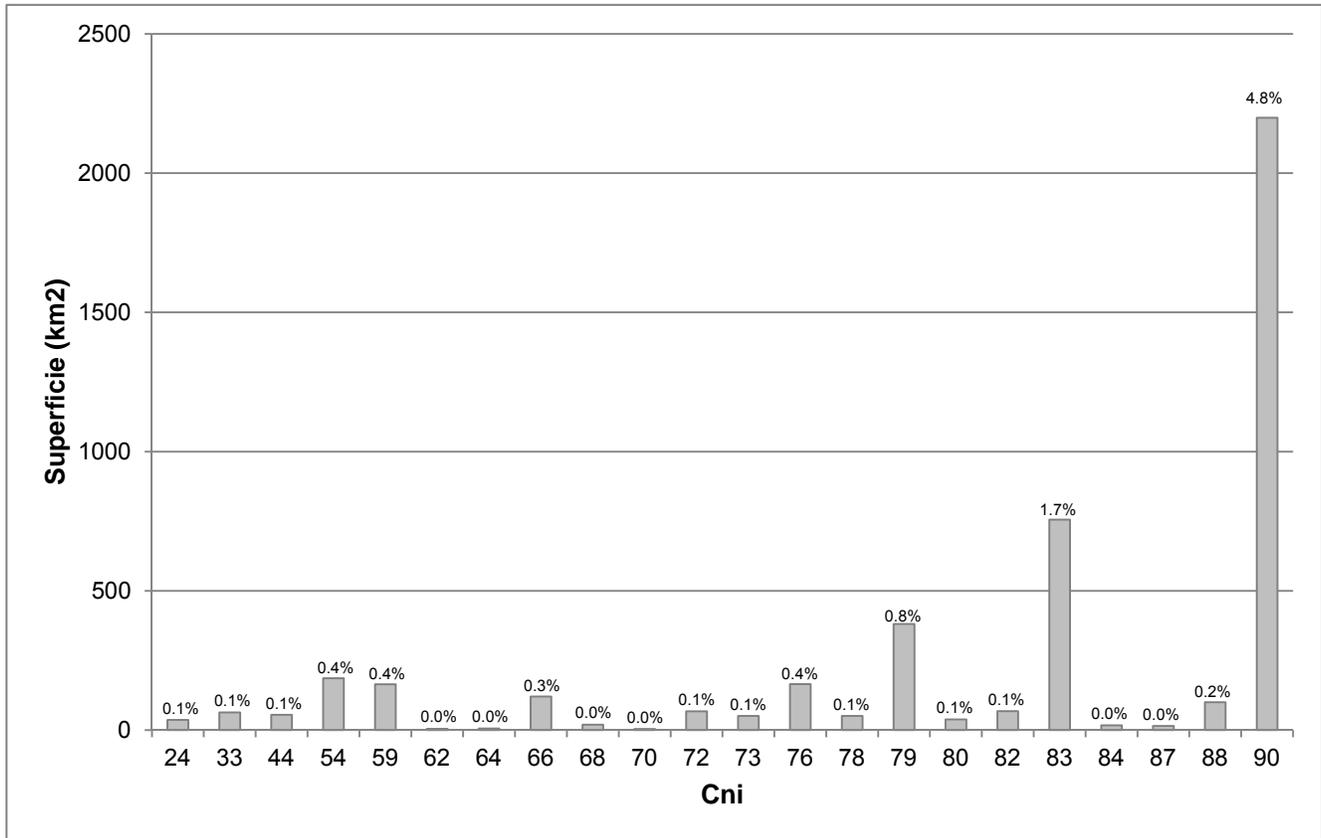


Figure 5-8 : Couverture territoriale des CN_i .

5.4.1.3 Curve Number réel (CN_r) en fonction des conditions d'humidité

La variation journalière du CN nécessite une estimation de la **condition d'humidité initiale dans le sol (CHI)**. Pour un événement de précipitation considéré, ce qui équivaut à l'apport vertical journalier (AV), ces conditions d'humidité sont contrôlées par la saison et les précipitations des 14 jours précédant l'événement de précipitation considéré. Ces antécédents définissent l'**indice API (Antecedant Precipitation Index)** tel que :

$$API = \sum_{i=1}^{n=14} 0,85^i \times AV_i \quad \text{équation (5) (Monfet, 1979)}$$

La classe de CHI pour une journée donnée est par la suite obtenue graphiquement (figure 5-9) en fonction de l'indice API et de la saison. Le CN_r associé à un sol varie ensuite selon la classe de CHI. Cronshey (1986) définit la valeur de CN_r selon trois classes de CHI, en utilisant trois relations empiriques :

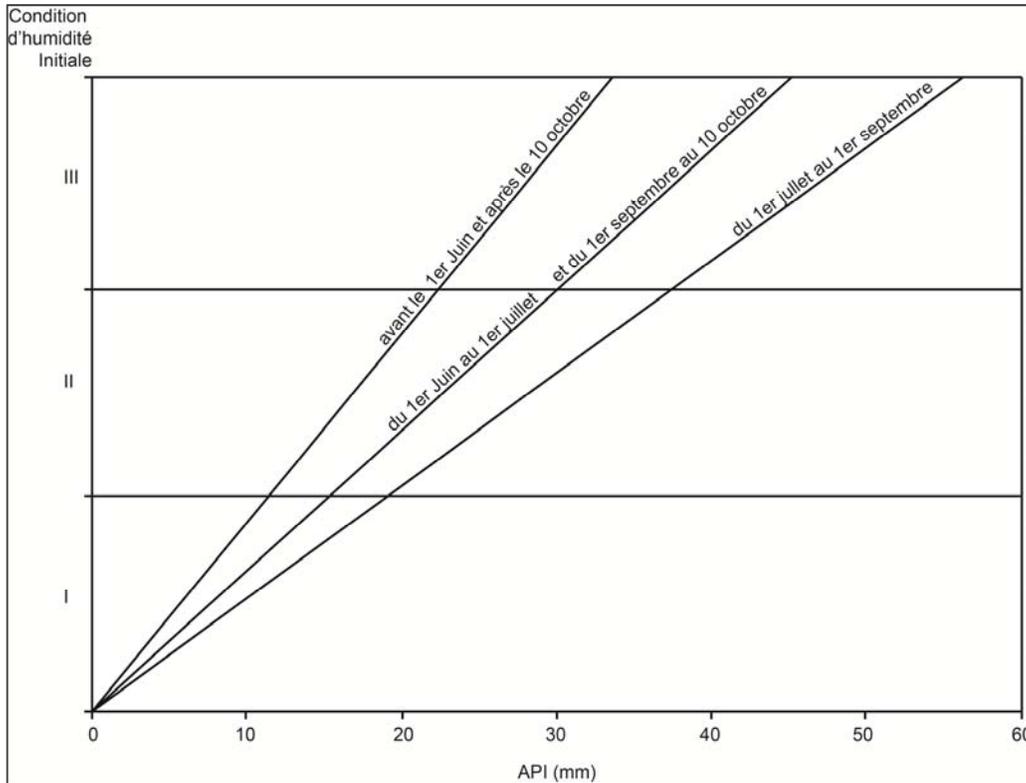


Figure 5-9 : Classes de condition d'humidité moyenne en fonction des indices API et de la saison.

$$CN_r = \frac{4,2CN_i}{10 - 0,058CN_i} \quad \text{équation (6)} \quad \text{pour une CHI de classe I}$$

$$CN_r = CN_i \quad \text{équation (7)} \quad \text{pour une CHI de classe II}$$

$$CN_r = \frac{23CN_i}{10 + 0,13CN_i} \quad \text{équation (8)} \quad \text{pour une CHI de classe III}$$

5.4.2 Relations générales du ruissellement

L'estimation du ruissellement se base sur l'hypothèse que pour une précipitation donnée, toutes précipitations qui excèdent l'infiltration et l'emmagasinement dans le sol contribuent au ruissellement de surface. La relation entre la hauteur de ruissellement et la hauteur de précipitation totale définie par Mockus (1949) est exprimée par l'équation suivante :

$$h_{Ru} = \frac{(h_p - h_{ia})^2}{h_p - h_{ia} + h_s} \quad \text{pour } h_p > h_{ia} \quad \text{équation (9)}$$

avec : h_{Ru} = Hauteur de ruissellement (mm);
 h_p = Hauteur de précipitation totale (mm);
 h_s = Capacité d'emmagasinement du sol pour l'infiltration;
 h_{ia} = Hauteur d'infiltration initiale.

Selon l'équation (9), le ruissellement h_{Ru} est supérieur à 0 si, et seulement si, h_{ia} est supérieur à la hauteur de précipitation totale. De ce fait la valeur de h_{ia} peut être considérée comme la **hauteur de précipitation minimale pour qu'un évènement de précipitation puisse générer un ruissellement**. La hauteur d'infiltration initiale (h_{ia}) est difficilement mesurable et elle dépend de la teneur en eau initiale du sol. Mockus (1949) a établi empiriquement un ratio h_{ia}/h_s de 20%, cependant les travaux de Hawkins et al. (2002) et Woodward et al. (2006) démontrent que ce ratio est largement surestimé. Cette étude réalisée sur une région près d'Indianapolis met en évidence une gamme de ratios h_{ia}/h_s de 0.05% à 50% avec une médiane à 5% et recommande ainsi l'utilisation de cette dernière valeur.

Pour le territoire de CHCN et considérant la moyenne d'une gamme de CN de 50 à 99 (96.6% de couverture territoriale), la hauteur de pluie minimale (h_{ia}) pour un début de ruissellement varie ainsi de 48,4 mm pour un ratio h_{ia}/h_s de 20%, à 2,4 mm pour un ratio h_{ia}/h_s de 1% (figure 5-10). Reporté sur les données d'apports verticaux annuels cette variation de la pluie minimale en fonction du ratio h_{ia}/h_s a une influence directe sur le nombre de jours ou un ruissellement sera considéré possible par rapport au nombre total de jours de pluie, c'est-à-dire, le nombre de jours où $h_{ia} > Av$.

Pour l'année 2009, l'utilisation d'un ratio de 20% génère une seule journée de ruissellement sur 197 jours de pluie, tandis que l'utilisation d'un ratio de 1% permet de considérer jusqu'à 104 jours de ruissellement. **Dans le cadre du projet PACES-CHCN**, un ratio de 1% est de ce fait utilisé pour optimiser le nombre de jours où un ruissellement est possible, h_{ia} peut donc être intégré tel que :

$$h_{ia} = 0.01 \times h_s \quad \text{équation (10)}$$

Ainsi, considérant que la hauteur de précipitation totale (h_p) correspond à la valeur journalière des apports verticaux ($h_p = Av$) l'estimation du ruissellement s'exprime par :

$$h_{Ru} = \frac{\left(Av - 0.01 \left(\frac{25\,400}{CN} - 254 \right) \right)^2}{Av + 0.99 \left(\frac{25\,400}{CN} - 254 \right)} \quad \text{pour } Av > 0.01h_s \quad \text{équation (11)}$$

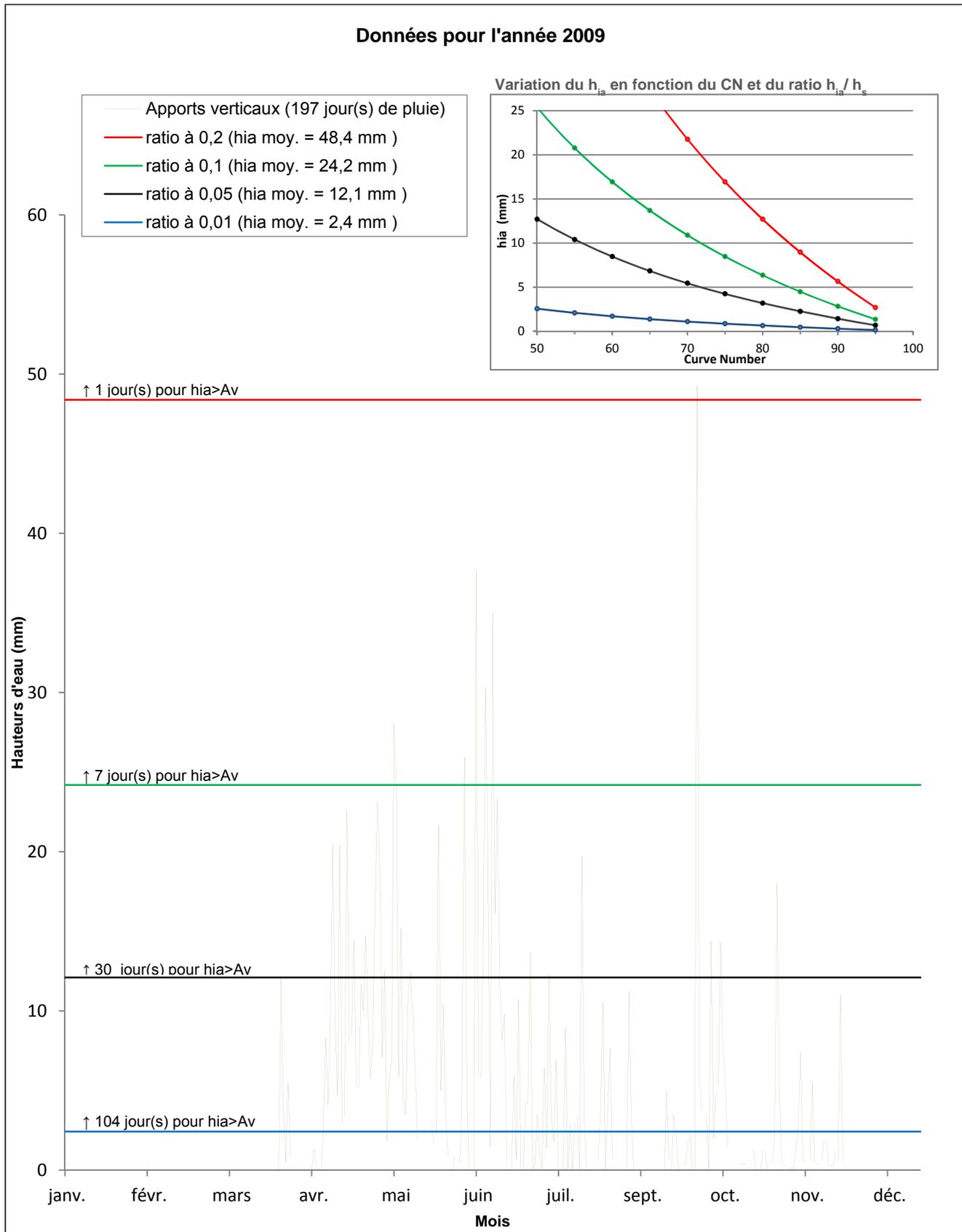


Figure 5-10 : Impacts du rapport h_{ia}/h_s sur le nombre de jours de ruissellements effectifs.

5.4.3 Ruissellements estimés pour le territoire de CHCN

À l'échelle du territoire de CHCN, l'estimation du ruissellement a été effectuée pour chaque journée des années 2005 à 2009. A titre d'exemple, les résultats de l'année 2009 (figure 5-11) présentent une variation du ruissellement de 3 mm dans les plaines argileuses de la Haute-Côte-Nord à plus de 490 mm par année sur les terrains à fortes pentes au niveau de la municipalité de Petite-Rivière-Saint-François.

5.4.4 Limites et discussion

Le ruissellement est un paramètre **sensible et difficile à estimer**. Ainsi, la méthode régionale utilisée dans le cadre du projet PACES-CHCN nécessite l'abstraction de plusieurs facteurs importants contrôlant le ruissellement, dont ceux décrits dans l'encadré qui suit.

1. **La couverture végétale** réduit indubitablement les possibilités de ruissellement. Or, en l'absence de données surfaciques précises sur le type de couvert végétale, ou le type de cultures, ce paramètre n'a pu être intégré dans les diverses méthodes de calcul.
2. **Les paramètres temporels** d'un événement pluvieux ne sont pas pris en compte dans la méthode des *Curve Number*. Ainsi pour une journée donnée l'intensité d'une précipitation n'a pas d'importance. Or, pour une précipitation journalière cumulée donnée, la probabilité de ruissellement est d'autant plus élevée que la période de précipitation est courte.
3. **Le ruissellement de sub-surface** n'est pas calculé dans la méthode utilisée, mais il peut représenter selon les sols des volumes extrêmement importants.

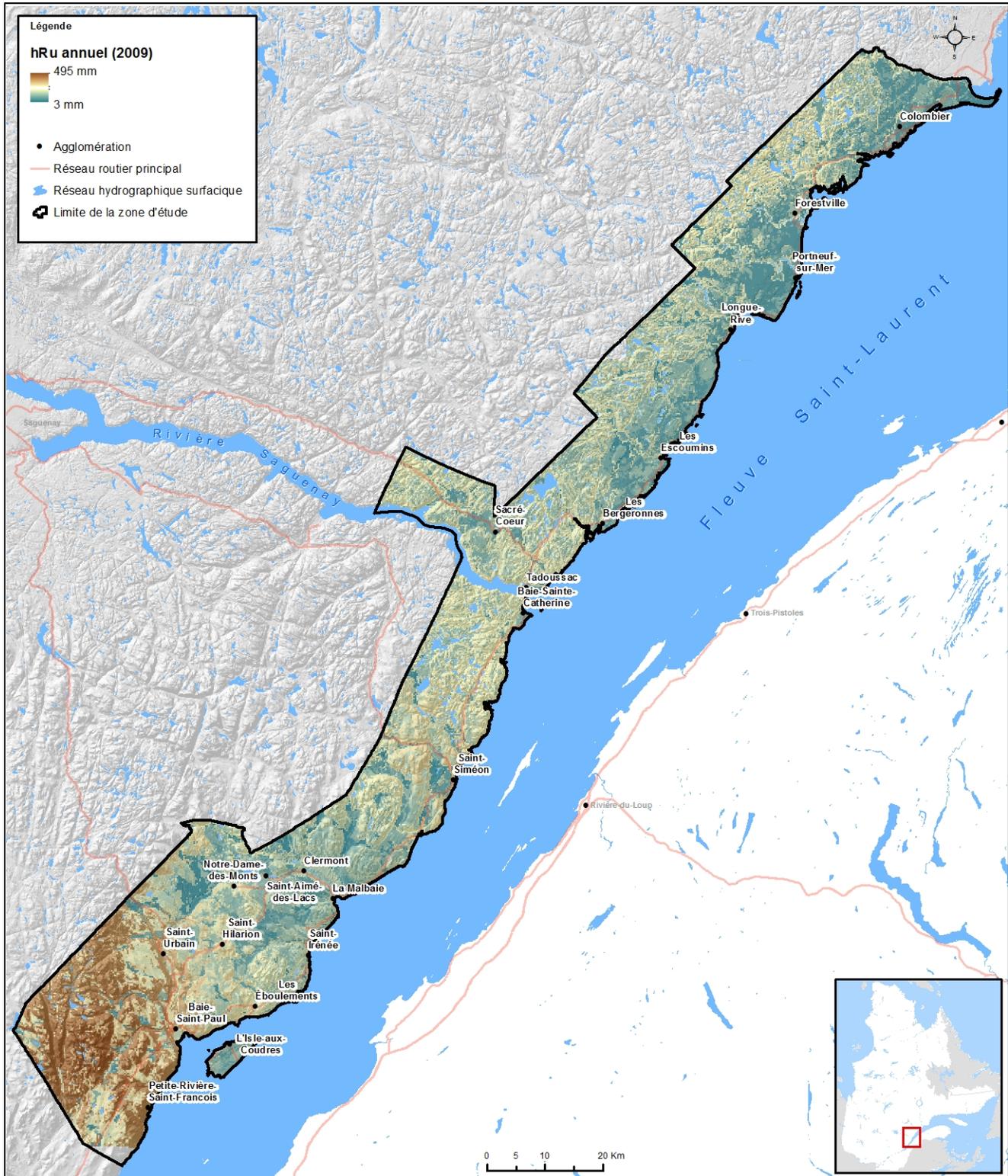


Figure 5-11 : Le ruissellement (hRu) pour l'année 2009.

5.5 Infiltration et recharge des aquifères

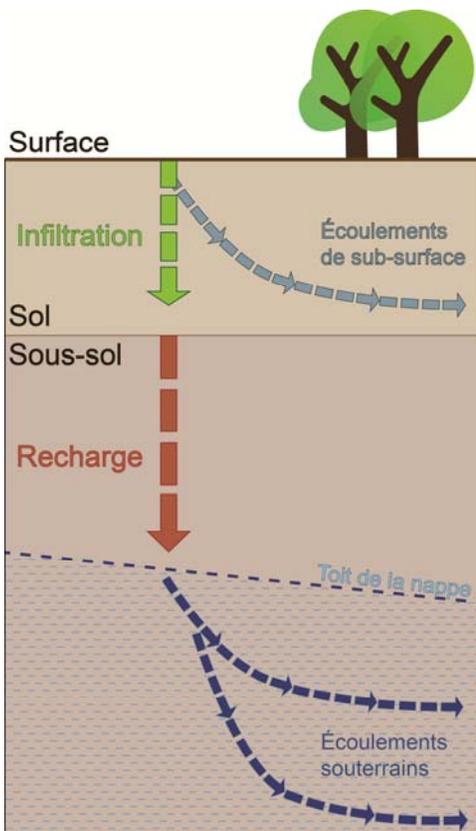


Figure 5-12 : Mobilité de l'eau dans le sol et le sous-sol.

Suite aux précipitations, les eaux qui subsistent après les phénomènes d'évapotranspiration et de ruissellement, peuvent s'infiltrer dans les sols pour devenir des eaux souterraines. Cette étape d'infiltration est invisible et difficilement mesurable. Une partie des eaux infiltrées constitue éventuellement la recharge des aquifères, mais il convient de distinguer l'infiltration et la recharge.

L'infiltration correspond au transfert de l'eau à travers les couches superficielles du sol. L'eau remplit les interstices du sol en surface et pénètre par la suite le sol sous l'action de la gravité.

Une partie appréciable des eaux infiltrées est captée par les racines des plantes et retournée à l'atmosphère par évapotranspiration comme décrit plus haut. Une autre partie des eaux infiltrées peut s'écouler ensuite latéralement dans les premières couches de sol. Cet **écoulement de sub-surface** peut représenter une quantité d'eau non-négligeable dans certaines situations, laquelle ne participe pas à la recharge.

La recharge représente donc les eaux atteignant le toit de la nappe et la zone saturée et constituant un ajout au réservoir en eaux souterraines (Vries et Simmer, 2002). Les eaux de recharge intégrées à la nappe d'eau souterraines participent par la suite à l'ensemble des **écoulements souterrains**.

Bien que dissociées dans la théorie, l'infiltration est, par abus de langage, fréquemment confondue avec la recharge des aquifères parce qu'il est en réalité difficile de les distinguer. En effet, la ségrégation des eaux de recharge et d'infiltration est conditionnelle

aux propriétés intrinsèques des sols. Ces propriétés contrôlent la mécanique complexe et les forces régissant les écoulements de sub-surface comme la gravité, les forces de succion, la compaction du sol ou sa teneur en eau. Ces mécanismes sont tous mesurables à une échelle macroscopique, voire locale, mais ils ne sont connus que dans de rares cas. Dans le cadre d'une étude régionale telle que le projet PACES-CHCN, on ne peut pas quantifier les écoulements de sub-surface, ni de ce fait distinguer l'infiltration des eaux de surfaces et la recharge des eaux souterraines.

Régionalement les quantités d'eau de recharge et d'infiltration sont donc confondues et possiblement surestimées. L'estimation de ces quantités permet tout de même d'obtenir une première approximation et des valeurs de comparaison pour des estimations futures.

5.5.1 Méthodes de calculs

5.5.1.1 Méthode du bilan hydrologique

Comme il est décrit précédemment, la recharge des aquifères n'est pas mesurable *in situ*. Une des méthodes pour son estimation est basée sur l'estimation des autres paramètres qui constituent le bilan hydrologique.

Dans le cadre du projet PACES-CHCN, l'estimation de la recharge a été réalisée par traitement géomatique. Comme illustré à la figure 5-13, les paramètres que sont les apports verticaux (AV), l'évapotranspiration réelle (ET_r) et le ruissellement ont été estimés suivant les méthodes décrites précédemment. Le traitement géomatique permet ainsi d'obtenir pour chacun de ces paramètres une carte matricielle annuelle à une résolution de 250 m x 250 m. La quantité de recharge des aquifères est par la suite estimée en appliquant la relation du bilan hydrologique indiquée au bas de la figure 5-13.

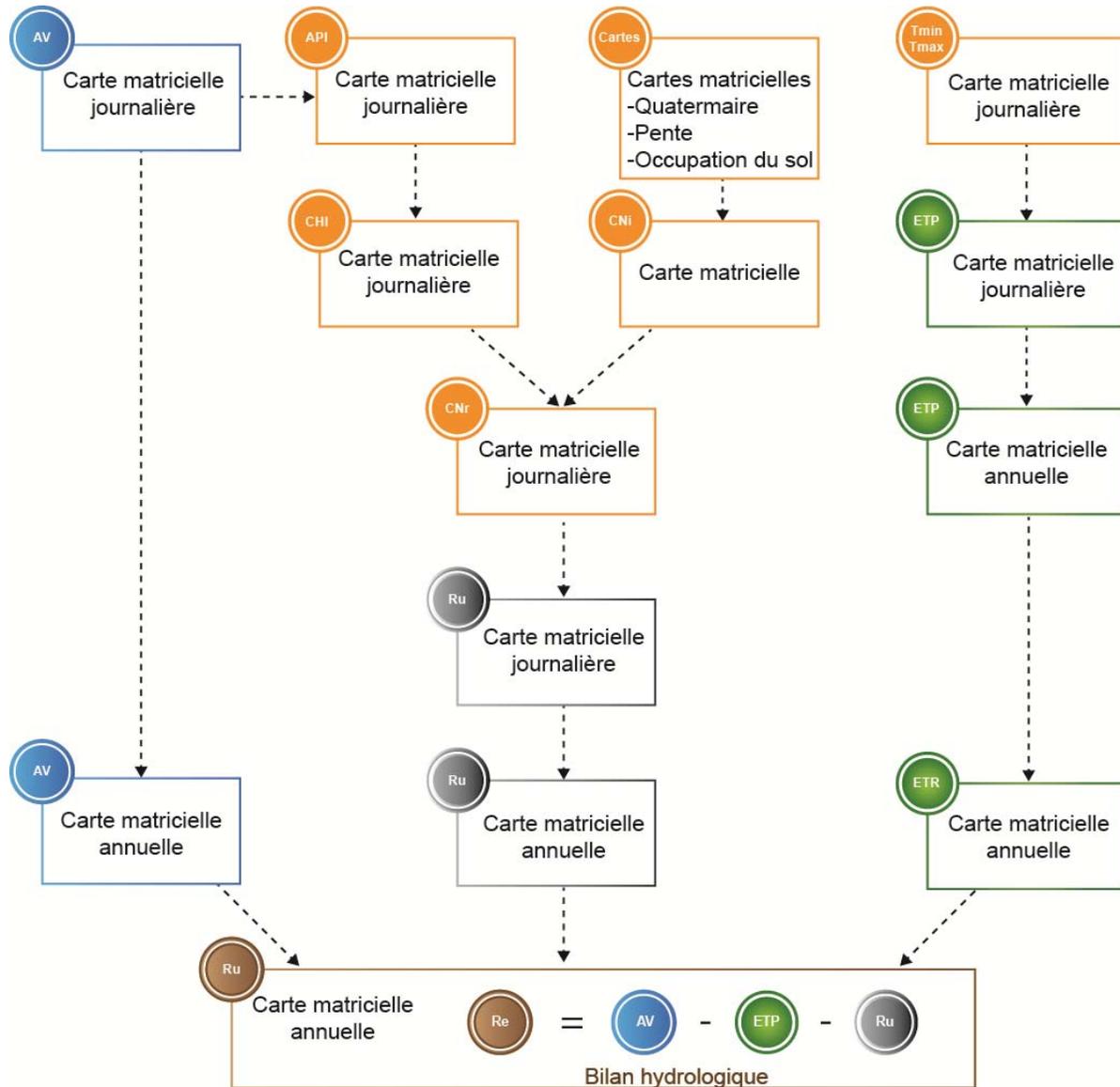


Figure 5-13 : Méthode géomatique d'estimation de la recharge annuelle.

5.5.2 Recharge estimée pour le territoire de CHCN

À l'échelle du territoire de CHCN, l'estimation de la recharge a été effectuée pour les années 2005 à 2009. Moyennée sur cette période quinquennale (figure 5-14) la recharge présente régionalement une variation de 56 mm à 764 mm par année.

Généralement les plus grandes quantités d'eau de recharge sont localisées dans les vallées des cours d'eau principaux. La recharge est également fonction des précipitations, par conséquent de grandes quantités d'eau de recharge sont estimées dans les zones aux plus fortes précipitations comme dans le secteur de la municipalité de Petite-Rivière-Saint-François.

Il est à noter que l'ensemble de la méthodologie d'estimation de la recharge conserve les artéfacts de ré-interpolation énoncés précédemment. De ce fait, plus on s'éloigne d'une station météorologique (figure 5-4) moins l'estimation de la recharge est exacte.

5.5.3 ***Limites et discussion***

Chacun des paramètres intervenants dans l'estimation de la recharge doit lui-même être estimé en premier lieu. Chacune des procédures d'estimation est basée sur diverses hypothèses simplificatrices et présente ses propres limites d'application. Les erreurs qui en résultent (tableau 5-3) sont difficiles à évaluer, ainsi que leurs impacts sur l'estimation de la recharge. Dans le cadre du projet PACES-CHCN les valeurs de recharge semblent surestimées en général.

Cependant, l'estimation régionale de la recharge qui est faite ici permet d'en obtenir une première approximation et de fournir des valeurs de comparaison pour des estimations futures utilisant différentes méthodes.

Tableau 5-3: Synthèse des causes d'erreur dans l'estimation de la recharge.

<i>Paramètre</i>	<i>Biais identifié(s)</i>	<i>Impact(s) sur l'estimation de la recharge</i>
	Artéfacts d'interpolation causés par:	
Apports Verticaux	<ul style="list-style-type: none"> - la faible quantité de stations météorologiques sur le territoire CHCN; - la mauvaise distribution spatiale des stations météorologiques sur le territoire CHCN; - l'échantillonnage d'une résolution faible à élevée (de 10 km à 250 m). 	Sur ou sous-estimation locales de la recharge en fonction des erreurs d'interpolation
Températures min.		
Températures max.		
ETr	Équation simplifiée, lissage de la variabilité spatiale	Sous-estimation
Ruissellement	Abstraction de la couverture végétale	Surestimation
	Abstraction des intensités de précipitation	Surestimation
Infiltration	Amalgame de l'infiltration et de la recharge	Surestimation

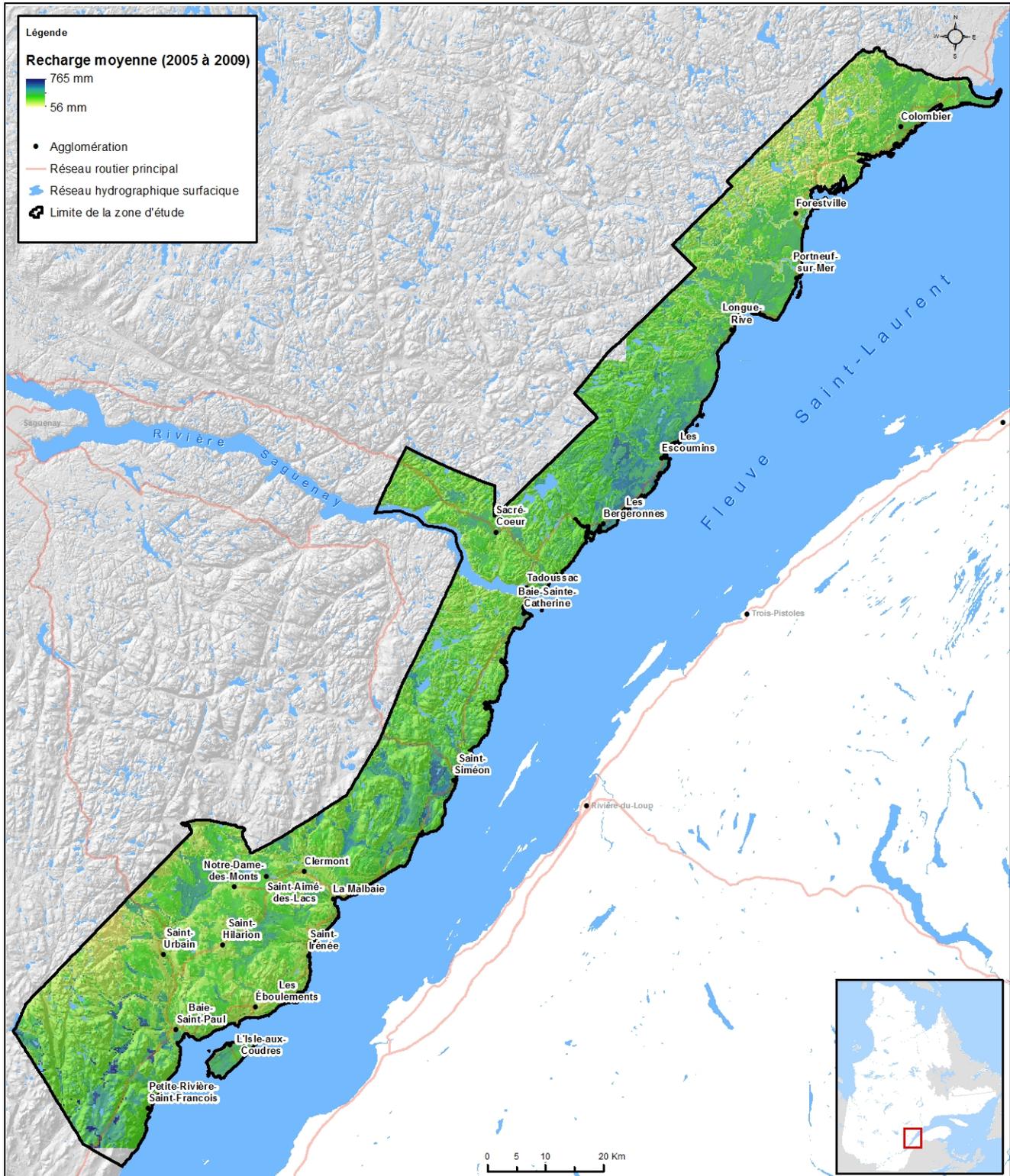


Figure 5-15 : La recharge annuelle (moyenne des années 2005 à 2009).

6 ETAT DES CONNAISSANCES HYDROGÉOLOGIQUES

L'hydrogéologie est une discipline scientifique qui regroupe l'hydrologie et la géologie. On voit donc que deux approches différentes mais complémentaires définissent l'hydrogéologie.

- Une spécialisation de la géologie qui traite des propriétés des milieux pouvant contenir de l'eau souterraine sans preuve de son occurrence. L'hydrogéologie est donc dans ce cas une discipline axée sur les milieux géologiques que l'on considère comme le **CONTENANT** des eaux souterraines.
- Une spécialisation de l'hydrologie qui traite de l'eau souterraine en tenant compte des conditions géologiques. L'hydrogéologie est donc dans ce cas une discipline axée sur les comportements de l'eau, que l'on considère comme le **CONTENU**.

Comme illustré à la figure 6-1, un **état des connaissances hydrogéologiques régionales** n'est pas statique. Il constitue une image, à un temps donné, de l'état des connaissances hydrogéologiques du territoire. Ce cycle d'amélioration des connaissances distingue, d'une part, la cartographie hydrogéologique qui constitue une phase de délimitation spatiale d'entité hydrogéologique et, d'autre part, la caractérisation hydrogéologique qui permet de définir chaque entité.

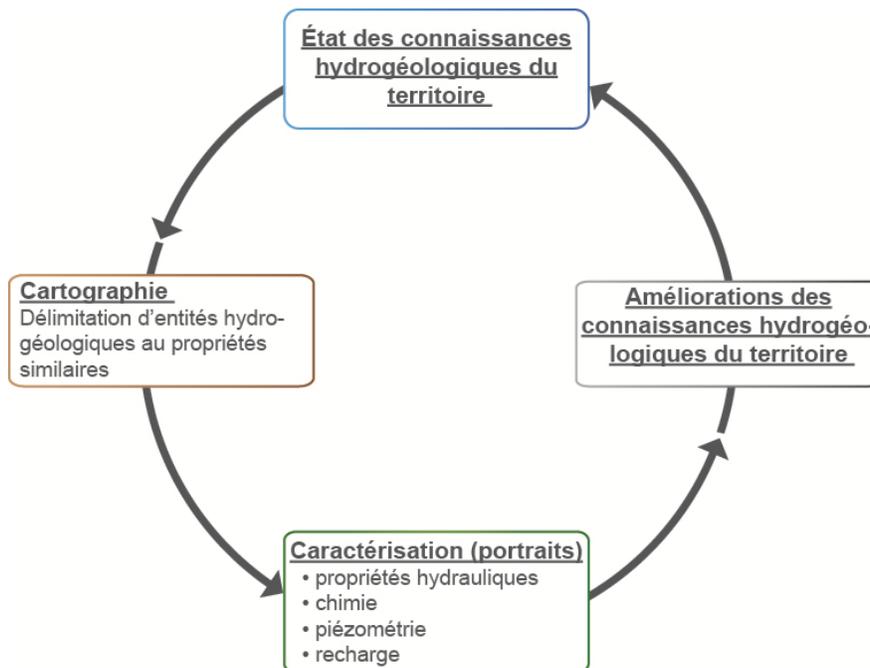


Figure 6-1: Cycle d'optimisation continue des connaissances hydrogéologiques régionales.

Le chapitre suivant présente ainsi un rappel des notions générales d'hydrogéologie puis :

- la cartographie hydrogéologique du territoire CHCN;
- les propriétés hydrauliques des milieux hydrogéologiques;
- les caractéristiques hydrogéochimiques des eaux souterraines;
- la piézométrie régionale et les écoulements de l'eau souterraine;
- les zones préférentielles de recharge et de résurgence des eaux souterraines.

6.1 Notions d'hydrogéologie

6.1.1 Notions de propriétés du milieu géologique

Les propriétés d'un milieu géologique représentent l'ensemble des données sur le milieu contenant les eaux souterraines. Leur évaluation, le plus souvent qualitative, constitue la première étape dans l'élaboration de l'état des connaissances hydrogéologiques régionales. Chaque milieu géologique possède, par nature, des caractéristiques physiques qualitatives qui conditionnent et définissent leurs caractères hydrogéologiques. Ainsi les entités géologiques peuvent se définir et se regrouper suivant :

- leur **porosité**;
- leur **perméabilité**;
- leur **potentiel aquifère**;
- leur **degré de confinement**.

La présente partie du rapport propose, dans un premier temps, une définition de chacun de ces paramètres et explique l'interprétation de ces caractéristiques du milieu en termes hydrogéologiques. Ces connaissances sont une **caractérisation qualitative** des caractères hydrogéologiques de l'environnement. Les interprétations énoncées dans cette partie découlent de grands concepts géologiques et hydrogéologiques et ne sont donc pas issues d'analyses spécifiques sur le territoire de CHCN.

6.1.1.1 Porosité

Porosité totale

Quantitativement, la **porosité totale** (n_t) représente le rapport du volume des interstices, dans un échantillon de matériel (sol, roches), au volume total de l'échantillon, vides compris :

$$n_t = \frac{\text{Volume de vides}}{\text{Volume total}}$$

La porosité d'un milieu est donc d'autant plus élevée que **le volume des interstices (vides) est important**. Qualitativement on distingue deux types de porosité : la porosité dite primaire et la porosité secondaire (figure 6-2).

La porosité primaire (ou porosité d'interstice) est formée par les vides ou interstices compris entre les grains ou les cristaux constituant le milieu. Ces pores ont des tailles généralement de l'ordre du millimètre. Cette porosité est dite primaire puisqu'elle est créée au moment de la formation initiale des matériaux, qu'ils soient meubles ou indurés.

La porosité secondaire (ou porosité de fracture) est constituée par les vides ou interstices correspondant à des discontinuités telles des joints de stratification, des fissures, des fractures ou de la karstification d'un milieu. Cette porosité est dite secondaire puisqu'elle s'applique, le plus souvent aux milieux rocheux dont la matrice (ou le matériel) possède lui-même une porosité primaire.

Selon le type de milieu, l'écoulement de l'eau souterraine sera donc conditionné en fonction du type de porosité dominante. On distingue ainsi trois types de milieux tels que décrits dans l'encadré qui suit.

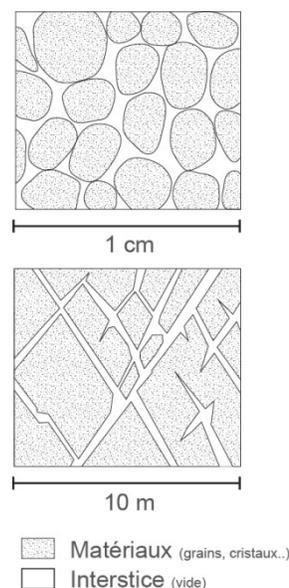


Figure 6-2 : Porosité primaire et porosité secondaire (modifiée de Banton et Bangoy, 1999).

Les milieux poreux qui ne possèdent qu'une porosité primaire; dans le cadre du projet PACES-CHCN, ces milieux regroupent l'intégralité des dépôts meubles tels que le sable, le gravier et l'argile.

Les milieux fracturés où la porosité secondaire contrôle l'écoulement; dans le cadre du projet PACES-CHCN, ces milieux regroupent l'ensemble des milieux cristallins fracturés.

Les milieux mixtes où aucune dominante entre porosité primaire et secondaire n'est vérifiée; dans le cadre du projet PACES-CHCN, ces milieux regroupent l'ensemble des milieux sédimentaires fracturés, notamment le calcaire.

Porosité efficace

La porosité définit donc la quantité de vides dans un milieu et, de ce fait, sa capacité à contenir de l'eau. Toutefois, toute l'eau contenue dans la porosité totale d'un milieu n'est pas libre de s'écouler par gravité, celle-ci peut se retrouver piégée dans de petits vides mal connectés à l'ensemble des autres interstices. Par conséquent, on définit la porosité efficace (n_e) qui tient compte de l'eau gravifique (i.e. mobile par gravité), telle que :

$$n_e = \frac{\text{Volume d'eau libre de s'écouler}}{\text{Volume total}}$$

6.1.1.2 Perméabilité

La porosité totale ou efficace est une condition nécessaire mais non suffisante pour qu'une roche soit perméable. Il est donc important de distinguer du concept de porosité celui de perméabilité. En effet, tout milieu est plus ou moins poreux, toutefois la **perméabilité intrinsèque** représente la *propriété d'un milieu poreux qui permet à des liquides ou des gaz de se mouvoir à travers ce milieu sous l'action combinée de la gravité et de la pression*. Cette perméabilité représente une surface et s'exprime le plus souvent en Darcy¹ (D). Elle diffère de la porosité efficace par l'intégration de la notion de mouvement de l'eau.

La perméabilité d'un milieu ne dépend pas que du volume total des vides, mais elle est d'autant plus élevée que **les interstices sont interconnectés**.

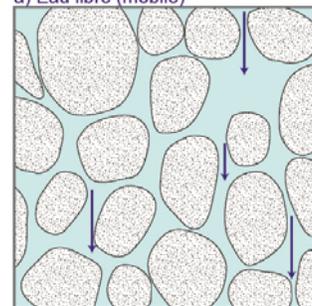
Ainsi la figure 6-3a montre qu'un milieu poreux avec une bonne interconnexion de ses interstices présente de grands volumes d'eau libre et mobile. Ce type de milieu a une perméabilité très élevée, c'est le cas du sable et du gravier.

Au contraire, la figure 6-3b présente un milieu avec une porosité totale très élevée et un agencement granulométrique en couches (comme les argiles) qui contient de grands volumes d'eau, mais cette eau est prisonnière et peu mobile. Ce type de milieu a une perméabilité très faible et est souvent considérée comme imperméable. Ce sont principalement des milieux composés d'argile ou de silt.

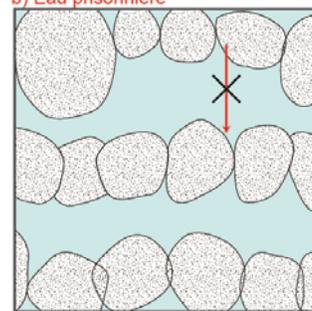
À titre d'exemple, un argile peut communément posséder une porosité de l'ordre de 40 à 50% mais est considérée comme imperméable.

Dans des milieux de dépôts meubles, c'est la porosité primaire qui influence la perméabilité. Dans ce cas, l'interconnexion des interstices entre les grains est proportionnelle à la granulométrie. Ainsi plus un milieu poreux tend vers une granulométrie grossière (sable, gravier) plus sa perméabilité est élevée. Au contraire un milieu poreux à granulométrie fine (par ex. de l'argile) contient des pores très petits et ne présentent que peu d'interconnexions; ce milieu est considéré comme imperméable.

a) Eau libre (mobile)



b) Eau prisonnière



■ Matériaux (grains, cristaux...)
■ Interstice (saturé en eau)

Figure 6-3 : Mobilité de l'eau.

¹ 1 Darcy = $0,97 \times 10^{-12} \text{ m}^2$

Dans les milieux rocheux cristallins ou sédimentaires, ou plus généralement pour un milieu induré (non-meuble), la porosité primaire est souvent faible, la perméabilité est, dans ce cas, influencée par la porosité secondaire. La connexion des vides en milieu fracturé dépend donc essentiellement de l'intensité et des connexions de la fracturation. Les milieux fracturés étant très hétérogènes, il est difficile d'évaluer leur nature plus ou moins perméable. Ces milieux sont donc, dans le cadre d'un projet d'acquisition de connaissances hydrogéologiques régionales, considérés comme des milieux semi-perméables.

Qualitativement la mobilité de l'eau permet donc de distinguer trois types de milieu comme décrits dans l'encadré qui suit.

Les milieux perméables qui regroupent l'intégralité des dépôts meubles à granulométrie moyenne à grossière tels que les sables et graviers.

Les milieux imperméables qui regroupent les dépôts meubles à granulométrie fine telles que les argiles.

Les milieux semi-perméables qui regroupent les milieux rocheux cristallins et sédimentaires

6.1.1.3 Potentiel aquifère

Plus que la porosité, la perméabilité permet de définir le potentiel ou le caractère aquifère d'un milieu. L'intégration de la notion d'aquifère ou de potentiel aquifère est étroitement liée à la productivité ou à l'exploitation de l'eau souterraine. Pour considérer un milieu comme aquifère, ce milieu doit être **saturé, perméable et productif** en quantité et sur une durée suffisante pour son exploitation. On distingue ainsi :

- les aquifères qui contiennent de l'eau qui peut y circuler librement;
- les aquitards qui contiennent de l'eau avec un écoulement lent ou négligeable;
- les aquicludes qui contiennent de l'eau mais sont imperméables (pas de circulation possible de l'eau);
- les aquifuges qui ne contiennent pas d'eau.

Pour le territoire de CHCN, nous distinguons deux types de milieu hydrogéologique comme décrits dans l'encadré qui suit.

Les aquifères : qui regroupent les formations perméables et semi-perméables contenant de l'eau en quantités exploitables.

Les aquitards : qui regroupent les formations très faiblement perméables à imperméables, saturées ou non, et dont on ne peut extraire économiquement des quantités d'eau appréciables. Les aquicludes et aquifuges sont inclus dans le type de milieu aquitard.

Cette différence entre aquifère et aquitard est relative. On considère en effet les entités comme étant aquifères vis-à-vis d'autres unités juxtaposées lorsqu'elles sont au moins 100 fois plus perméables.

De plus, les aquifères sont, par définition, des milieux saturés ou partiellement saturés en eau et dans lesquels l'eau peut circuler. Dans le cadre régional du projet PACES-CHCN, la présence ou l'absence d'eau souterraine ne peut être vérifiée en tous points. Les termes aquifères et aquitards sont donc utilisés par abus de langage et désignent en réalité des milieux potentiellement aquifères ou aquitards.

6.1.1.4 Confinement : nappe libre ou captive

Contrairement à la porosité, à la perméabilité et au potentiel aquifère qui sont des caractères intrinsèques du milieu, **le confinement** ou **degré de confinement** d'une unité hydrogéologique est une caractéristique étrangère au milieu considéré. Ainsi les termes confiné ou libre sont associés non pas à l'unité hydrogéologique mais à la masse d'eau (nappe) qu'elle contient. On distingue ainsi deux types de nappe selon le confinement (figure 6-4) :

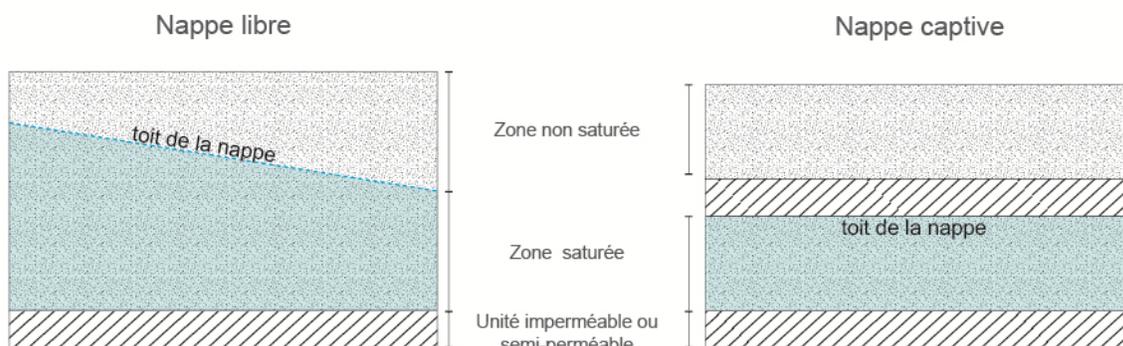


Figure 6-4 : Nappe libre et nappe captive.

Les nappes libres contenues dans un aquifère surmonté de terrains perméables, disposant d'une surface piézométrique libre en contact avec l'atmosphère (pression atmosphérique) et d'une zone non saturée (figure 6-4).

Les nappes captives contenues dans un aquifère intercalé entre deux formations quasi imperméables (figure 6-4).

6.1.1.5 Typologie des milieux hydrogéologiques

Les propriétés hydrogéologiques d'un milieu constituent les éléments permettant de définir tous les types de milieu hydrogéologique présents sur un territoire. Tel qu'énoncé, chaque milieu géologique possède, par nature, un **potentiel aquifère**, un type de **perméabilité**, un type de **porosité** et un **degré de confinement de la nappe**.

Ces caractères hydrogéologiques qualitatifs sont interdépendants et permettent de définir 7 possibilités de milieux hydrogéologiques, on distingue ainsi :

1. les aquifères perméables, en milieu poreux, à nappe libre;
2. les aquifères perméables, en milieu poreux, à nappe captive;
3. les aquitards imperméables, en milieu poreux;
4. les aquifères semi-perméables, en milieu fracturé, à nappe libre;
5. les aquifères semi-perméables, en milieu fracturé, à nappe captive;
6. les aquifères semi-perméables, en milieu mixte, à nappe libre;
7. les aquifères semi-perméables, en milieu mixte, à nappe captive.

Chaque paramètre qualitatif définit ainsi une composante d'un référentiel qui, appliqué sur une portion de territoire, permet d'évaluer la présence (ou non) de ces milieux hydrogéologiques sur le territoire à l'étude. Cette seconde étape est présentée à la section suivante.

6.1.2 Notions de propriétés hydrauliques du milieu géologique

Les propriétés hydrauliques d'un milieu constituent les facteurs qui influencent les propriétés énergétiques de l'eau qu'il contient. Contrairement aux propriétés hydrogéologiques présentées ci-avant, ces caractéristiques sont plus largement quantifiables. Elles sont la base des études hydrogéologiques et permettent d'évaluer, selon les connaissances, l'importance des eaux souterraines en termes de ressources et de facilité d'exploitation.

6.1.2.1 Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique (K) définit la perméabilité d'un milieu à l'eau, c'est-à-dire la capacité d'un milieu à laisser circuler l'eau ; elle s'exprime en longueur par unité de temps [L/T]. Dans le cadre du projet PACES-CHCN l'unité en mètre par seconde (m/s) est privilégiée.

La conductivité hydraulique est une valeur propre au milieu hydrogéologique et constante dans un milieu homogène.

Par vulgarisation, on associe souvent, à tort, la conductivité à la vitesse de l'eau dans un milieu donné. Plus précisément, ce paramètre caractérise les résistances à l'écoulement dues aux forces de frottement qui sont fonctions des caractéristiques de la matrice solide et de la viscosité du fluide.

Ainsi, plus la conductivité hydraulique d'un milieu sera élevée plus l'extraction de l'eau souterraine sera facilitée (figure 6-5).

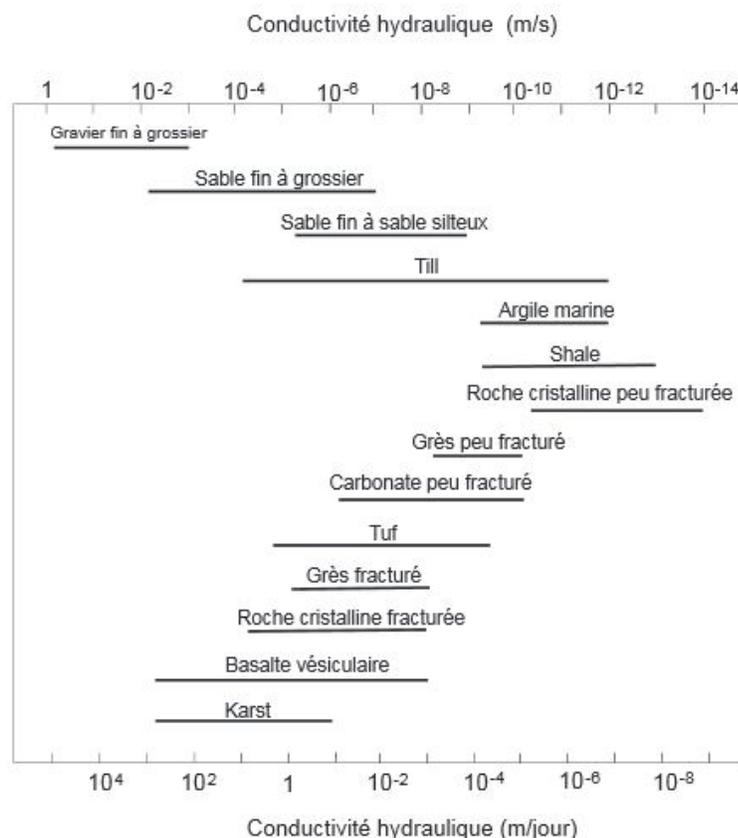


Figure 6-5 : Valeurs moyennes de conductivité hydraulique pour différentes entités géologiques (Freeze et Cherry, 1979).

6.1.2.2 Transmissivité

En pratique, la conductivité hydraulique n'est pas mesurée directement, elle résulte souvent de la mesure de la transmissivité lors d'un essai de pompage. Or, peu d'ouvrages de captage traversent l'intégralité de l'épaisseur saturée du milieu capté. Dans ce contexte, l'épaisseur saturée « e » est souvent grossièrement estimée; la précision des valeurs de conductivité hydraulique est donc relative et modérée.

La transmissivité (T) correspond au produit de la conductivité hydraulique (K) par l'épaisseur de la zone saturée (e) ; elle s'exprime en surface par unité de temps (L^2/T) :

$$T = K * e$$

Plus précisément ce paramètre caractérise le débit d'eau pouvant s'écouler dans milieu perméable ou semi-perméable sous l'effet d'un gradient hydraulique, par unité de largeur. Contrairement à la conductivité

hydraulique, les valeurs de transmissivité d'un milieu hydrogéologique saturé peuvent varier selon la position de mesure.

Tel qu'illustré en figure 6-6, dans le cas d'une nappe libre, l'épaisseur « e » de la zone saturée est variable; par conséquent les valeurs de transmissivité seront plus élevées en amont qu'en aval. A contrario, dans une nappe captive contenue dans une unité confinée et d'épaisseur constante, l'épaisseur saturée est constante, la transmissivité est donc invariable.

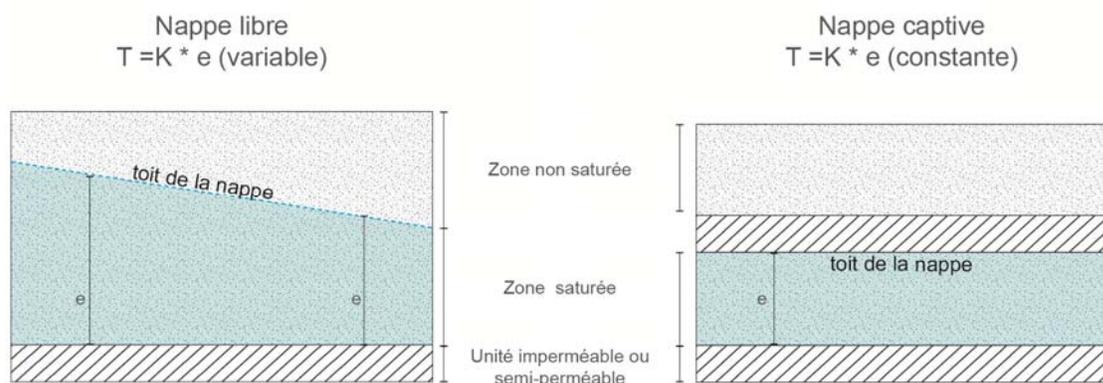


Figure 6-6 : Variations de la transmissivité dans un aquifère.

La transmissivité permet donc d'évaluer indirectement la capacité d'extraction de l'eau souterraine qui varie en fonction de la position géographique.

6.1.2.3 Emmagasinement

Le coefficient d'emmagasinement (S) est le volume d'eau libéré ou emmagasiné, par unité de surface d'aquifère (A) lorsque la charge hydraulique (h) varie d'une unité, soit :

$$S = \frac{\text{Volume d'eau libre}}{A * h}$$

Plus simplement : le coefficient d'emmagasinement est utilisé pour caractériser le volume d'eau extractible (par variation de charge uniquement) par unité de volume du matériel considéré.

- À titre d'exemple, pour 1 mètre cube de matériel saturé (=1000 litres de matériel), un coefficient S de 0,01 représente 10 litres d'eau extractibles par diminution d'un mètre de charge hydraulique.
- En nappe libre, il correspond à la porosité efficace, soit le volume d'eau libre sur le volume total de milieu poreux et est de l'ordre de 5 à 20%.
- Pour une nappe captive, ce coefficient est extrêmement faible de 10^{-6} à 10^{-8} .

6.1.3 Notions de piézométrie

6.1.3.1 Charge hydraulique et gradient hydraulique

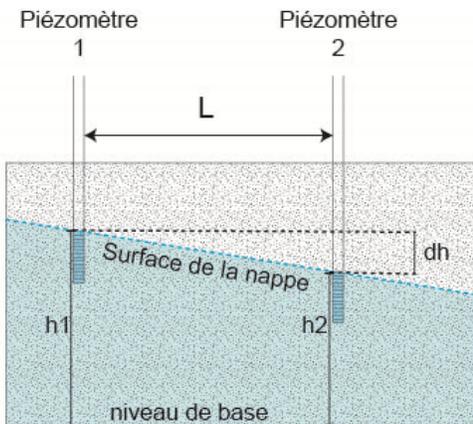


Figure 6-7 : Gradient hydraulique.

En un point donné d'un milieu perméable ou semi-perméable saturé en eau, la charge hydraulique équivaut à l'élévation du niveau d'eau atteint à l'équilibre hydrostatique (i.e. à la pression atmosphérique) dans un ouvrage. Cette élévation a pour référentiel le niveau des mers.

Tel qu'illustré en figure 6-7, entre deux points de charges hydrauliques distinctes (h_1 et h_2) et distants d'une longueur (L) il est possible d'estimer le gradient hydraulique (i) qui s'exprime tel que :

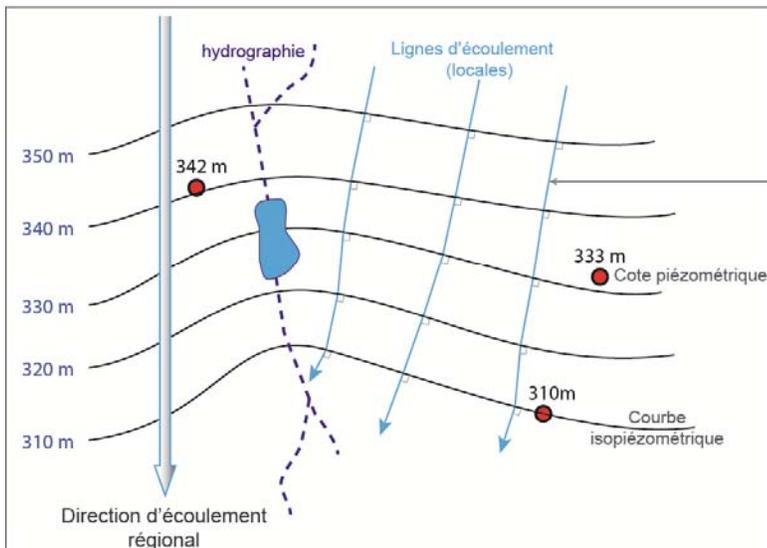
$$i = \Delta h / L \text{ (avec } \Delta h = h_1 - h_2 \text{)}$$

Plus généralement, la charge hydraulique équivaut à la cote piézométrique de la surface de la nappe à la pression atmosphérique, et le gradient hydraulique équivaut à la pente d'une nappe le long d'une ligne d'écoulement.

6.1.3.2 Surface piézométrique et directions de l'écoulement

À l'image d'une cartographie topographique de surface, la connaissance de plusieurs cotes piézométriques sur un territoire permet d'estimer des courbes de même cote, ou courbes iso-piézométriques définissant la surface piézométrique ou plus simplement la **PIÉZOMÉTRIE** de la nappe considérée (figure 6-8). La direction de l'écoulement est généralement perpendiculaire aux courbes iso-piézométriques, avec un sens d'écoulement des piézométries élevées vers les plus faibles. La détermination de la direction de l'écoulement devient de plus en plus approximative avec l'augmentation de la superficie du territoire considéré.

vue en carte



vue le long d'une ligne d'écoulement

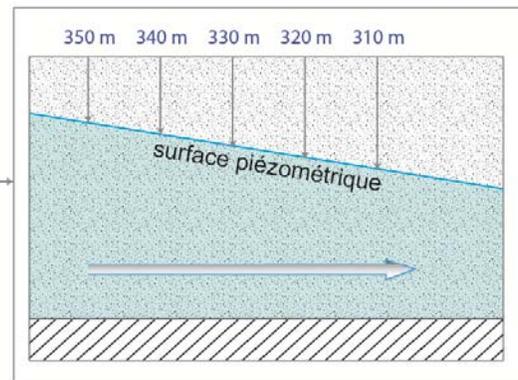


Figure 6-8 : Éléments de cartographie piézométrique.

6.1.3.3 Toit et surface piézométrique d'une nappe

Selon la définition précédente, la surface piézométrique d'une nappe correspond à l'élévation du niveau d'eau atteint par la nappe à la pression atmosphérique. Il est donc important de distinguer la surface piézométrique et le toit de la nappe.

En effet dans le cas d'une nappe libre le toit de la nappe est à la pression atmosphérique, de ce fait, la surface piézométrique et le toit de la nappe sont confondus (figure 6-9a).

Dans le cas d'une nappe captive, le toit de la nappe équivaut à la surface de la nappe en contact avec la formation imperméable supérieure (figure 6-9b).

Sa surface piézométrique est alors « virtuelle » puisqu'elle n'est observable que dans un piézomètre où l'eau de la nappe est localement en condition libre à la pression atmosphérique.

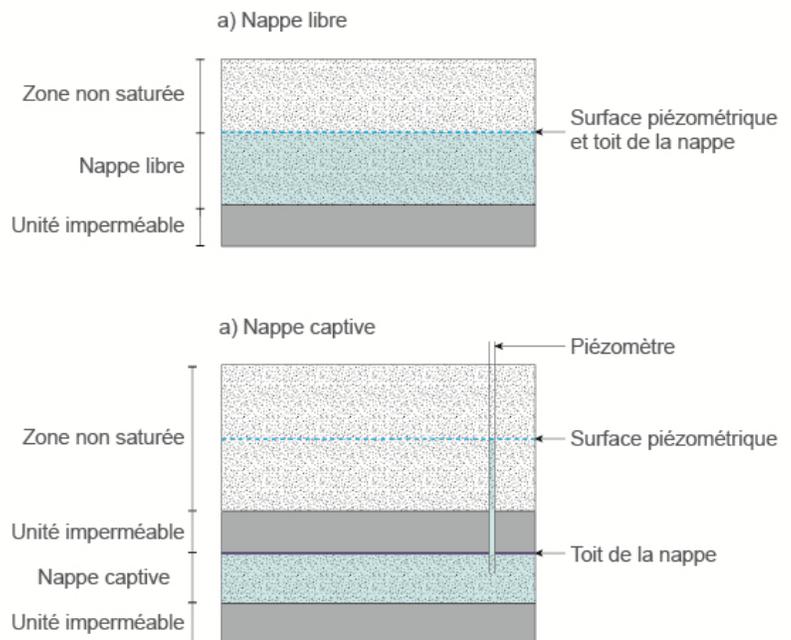


Figure 6-9 : Toit et surface piézométrique d'une nappe.

6.1.3.4 Vitesses d'écoulement

La vitesse d'écoulement (V) de l'eau souterraine le long d'une ligne d'écoulement dépend de la conductivité hydraulique (K), du gradient hydraulique (i) et de la porosité effective (n_e) d'un milieu, tel que :

$$V = \frac{K * i}{n_e} \quad (\text{en m/s})$$

En pratique, la porosité effective se détermine à partir des essais de traçage mais est rarement estimée, elle est le plus souvent déduite dans le cas de nappe libre à partir de l'emménagement. Il est donc difficile d'évaluer régionalement des vitesses d'écoulement des eaux souterraines.

La porosité effective et le gradient hydraulique (i) étant des paramètres adimensionnels, la vitesse de l'écoulement est souvent confondue avec la conductivité hydraulique puisqu'elles sont exprimées par la même unité. Or, comme le montre l'équation précédente, conductivité hydraulique et vitesse sont deux paramètres très différents.

Sur une carte piézométrique, on associe trop souvent le resserrement de courbes iso-piézométriques à une accélération ou du moins une augmentation de la vitesse de l'écoulement. Or, à l'image d'une cartographie topographique, des courbes iso-piézométrique proches représentent un fort gradient hydraulique (i) ou une forte pente. Or, comme le montre l'équation précédente, pente et vitesse sont deux paramètres très différents.

6.1.3.5 Piézométrie à l'échelle d'une nappe et piézométrie régionale

La piézométrie est, par définition, propre à une masse d'eau (nappe) et circonscrite dans les limites d'un milieu perméable ou de plusieurs milieux perméables hydrauliquement connectés. Pour définir la piézométrie d'une nappe il faut donc un nombre suffisant de points de mesure de cote piézométrique (mesurée dans un piézomètre) au sein d'une même nappe. Dans le cadre du projet PACES-CHCN, les milieux perméables ou semi-perméables

contenant potentiellement une nappe ont été délimités tel que décrit à la section suivante. Toutefois la quantité de points de mesures pour chacune des nappes n'est pas suffisante pour réaliser une cartographie individuelle de chacune des surfaces piézométriques.

Dans ce contexte, il est toutefois possible d'utiliser l'ensemble des points de cote piézométrique pour réaliser une piézométrie dite « régionale ». La surface piézométrique régionale estimée est donc une surface qui moyenne l'ensemble des niveaux piézométriques (figure 6-10). Elle tend donc à sur ou sous-estimer l'élévation du niveau de l'eau dans un ouvrage en un point donné.

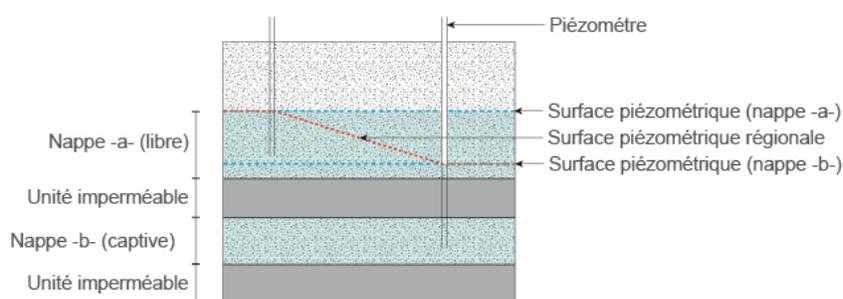


Figure 6-10 : Piézométrie de nappe et piézométrie régionale.

6.1.3.6 Zones de forte recharge et zones de recharge préférentielle

La recharge correspond à la quantité d'eau d'infiltration des précipitations à la surface atteignant la zone saturée et constituant un ajout au réservoir d'eau souterraine (chapitre 5). À l'échelle régionale, l'estimation de la recharge est donnée par unité de temps (mm/an). La quantification de la recharge permet ainsi d'évaluer les zones de plus forte ou de plus faible recharge en termes de volumes d'eau.

Les zones de forte recharge sont donc un bon indicateur des zones où les volumes de renouvellement des eaux souterraines sont les plus importants en fonction de conditions climatiques données.

La recharge en termes de volume est principalement fonction de la quantité de précipitations. En plus des zones de forte recharge, on définit ici le concept de zones de recharge préférentielle. Celles-ci sont estimées par le ratio des précipitations sur la quantification de la recharge et représentent de ce fait un taux d'infiltration indépendant des conditions climatiques.

Les zones de recharge préférentielle représentent donc une subdivision des zones de forte recharge, caractéristiques de zones de forte infiltration indépendamment des conditions climatiques.

6.1.3.7 Zones de résurgence

Au terme d'un parcours souterrain, les eaux souterraines font résurgence à la surface. Ces résurgences sont classées suivant leur étendue et leur débit, on distingue ainsi trois types de résurgence dans le cadre du projet PACES-CHCN, comme décrit dans l'encadré qui suit.

Les sources, considérées comme des résurgences ponctuelles avec un débit soutenu pouvant servir à l'alimentation en eau potable.

Les zones de suintement, considérées comme des résurgences diffuses et linéaires le long de parois ou de ruptures de pentes topographiques avec de très faibles débits.

Les affleurements de la nappe, considérés comme des résurgences diffuses et surfaciques constituant des zones de milieux humides et une partie de l'hydrographie.

6.2 Méthode de cartographie hydrogéologique

La méthodologie innovante et inédite au Québec appliquée dans le cadre du projet PACES-CHCN est issue des travaux réalisés en France par le bureau de recherche géologique et minière (BRGM) et adaptée pour les contextes hydrogéologiques du Québec méridional. Cette méthode de cartographie hydrogéologique (Petit et al., 2003) compile un découpage du territoire et l'application d'un référentiel hydrogéologique à chacune des unités délimitées.

Le découpage est réalisé à partir de la cartographie existante et des connaissances stratigraphiques du territoire. Il permet, à l'aide de règles de superposition, de représenter les différentes unités hydrogéologiques par leur extension horizontale mais également verticale.

La représentation en carte demeure bidimensionnelle, toutefois la méthode de cartographie hydrogéologique appliquée dans le cadre du projet PACES-CHCN permet, à l'aide de Systèmes d'Informations Géographiques (ArcGIS), plusieurs types de visualisation permettant d'évaluer l'aspect tridimensionnel.

6.2.1 Limites hydrogéologiques interprétées (cartographie existante et interprétée)

La première étape de cartographie hydrogéologique constitue un découpage du territoire suivant toutes les limites connues pouvant délimiter des unités hydrogéologiques. Ces limites hydrogéologiques regroupent, de façon générale, tout changement majeur de caractéristiques hydrogéologiques sur un territoire donné en termes de porosité, de perméabilité ou de condition d'écoulement.

Ces limites sont issues de la cartographie géologique du roc et des dépôts quaternaires existante, ainsi que des interprétations stratigraphiques et hydrogéologiques.

6.2.1.1 Limites hydrogéologiques interprétées à partir de la géologie du roc

La carte #13 – *Géologie du roc* (annexe numérique AN1) représente la première information sur les caractéristiques hydrogéologiques. Elle découpe le territoire en 16 unités géologiques. Afin de réduire le nombre de limites (et le nombre de polygones) chaque unité est ainsi regroupée au sein de sa « grande famille lithologique », la géologie est donc simplifiée en 5 classes (figure 6-11) :

- roches ordoviciennes;
- intrusions felsiques;
- intrusions mafiques/ultramafiques;
- roches métasédimentaires et métavolcaniques;
- complexe gneissique et granitique.

Cette reclassification se base sur les connaissances hydrogéologiques générales en termes de porosité. Ainsi, les roches ordoviciennes sont classées en milieu mixte pour ce qui est du type de porosité, tandis que les autres unités du socle rocheux cristallin sont classées en milieu fracturé.

En l'état actuel des connaissances, aucun paramètre qualitatif (propriétés hydrauliques ou chimie de l'eau) n'a permis de caractériser et différencier les familles lithologiques cristallines. Toutefois, les connaissances générales en géologie supposent que ces grandes familles sont différentes d'un point de vue hydrogéologique. Elles sont donc distinguées et délimitées en vue de travaux de caractérisation futurs.

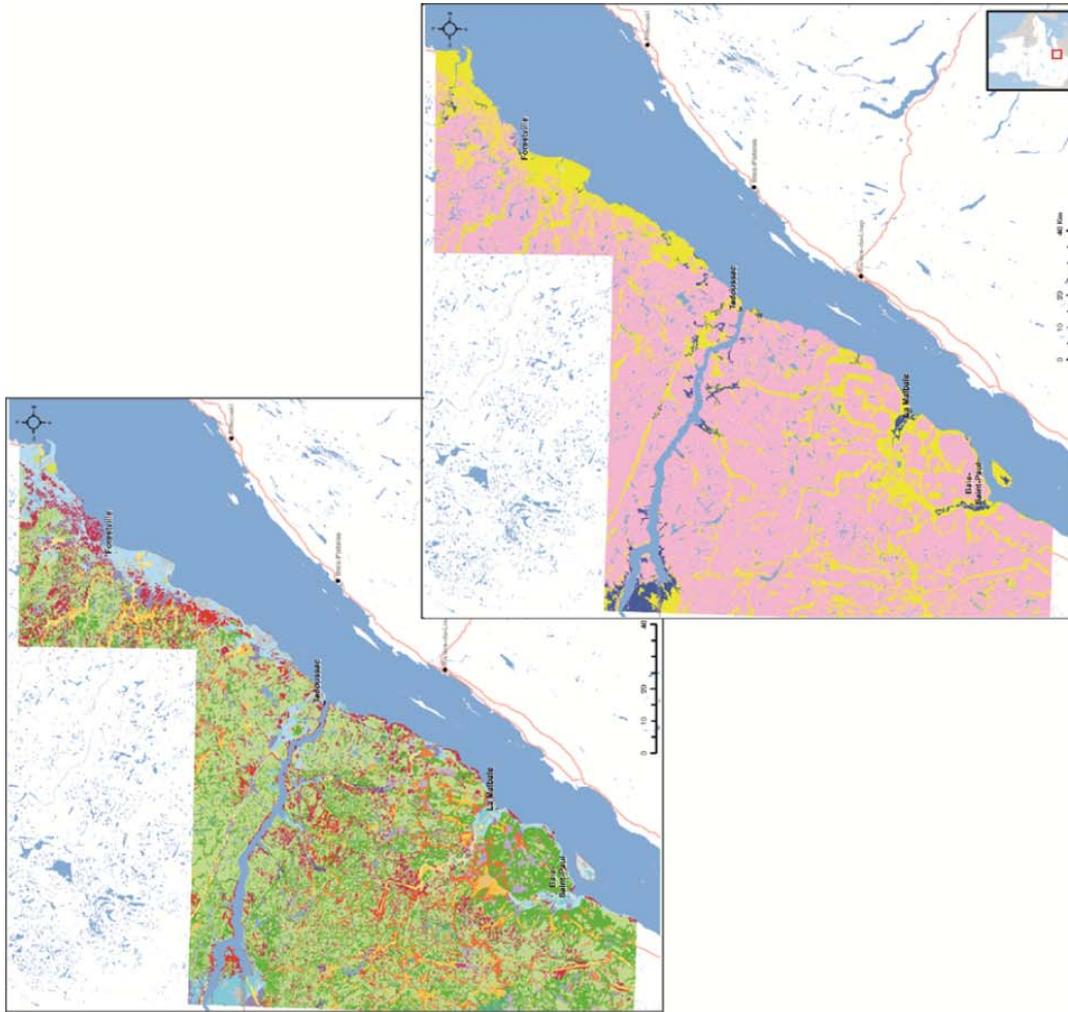
6.2.1.2 Limites hydrogéologiques interprétées à partir de la géologie du Quaternaire

La classification de la carte géologique quaternaire se base sur une description génétique des environnements de mise en place des dépôts. Elle décrit ainsi les modes de formation des différents types de sédiments. Or, les limites hydrogéologiques des environnements quaternaires se basent sur leur perméabilité. Dans le cadre du

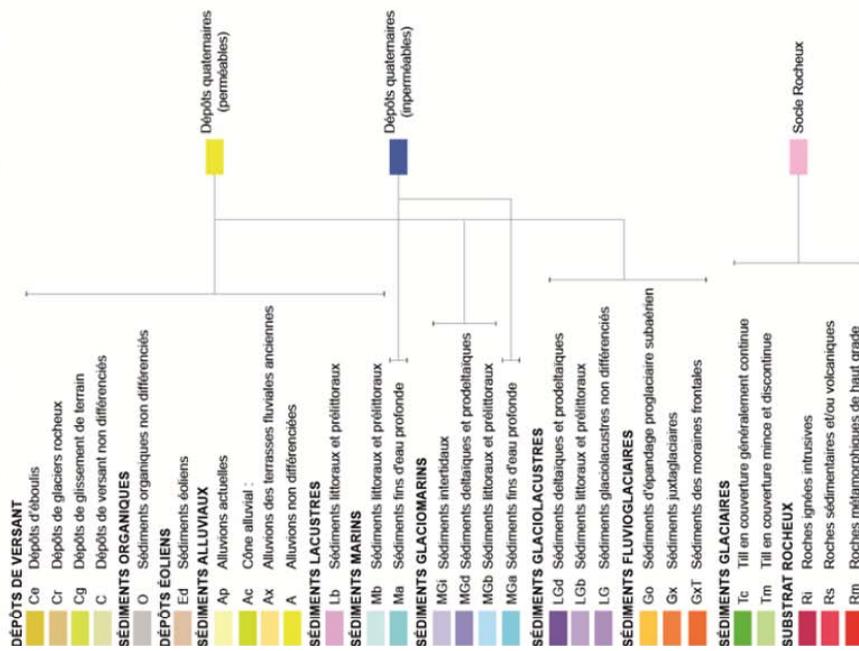
projet PACES-CHCN, la lithologie est donc simplifiée en trois grands ensembles aux perméabilités distinctes (figure 6-12) :

1. socle rocheux (semi-perméable);
2. dépôts perméables;
3. dépôts imperméables.

La classification quaternaire initiale est très complexe et une même unité quaternaire peut en réalité se composer de matériaux très hétérogènes pouvant localement présenter des variations drastiques de perméabilité pouvant passer de très perméable à imperméable. Dans le cadre d'un découpage hydrogéologique à une échelle régionale, seules les unités composées entièrement de sédiments fins (argile, silt) sont considérées comme peu perméables.



Classification quaternaire (225k)



Quaternaire simplifié (225k)

Figure 6-12 : Simplification de la cartographie quaternaire.

6.2.1.3 Limites hydrogéologiques interprétées à partir des coupes stratigraphiques

La cartographie quaternaire fournit une information majeure sur les limites des milieux en surface. Toutefois, le travail important d'interprétation de coupes stratigraphiques réalisé dans le cadre de ce projet permet une interprétation de la continuité des unités hydrogéologiques en profondeur (figure 6-13).

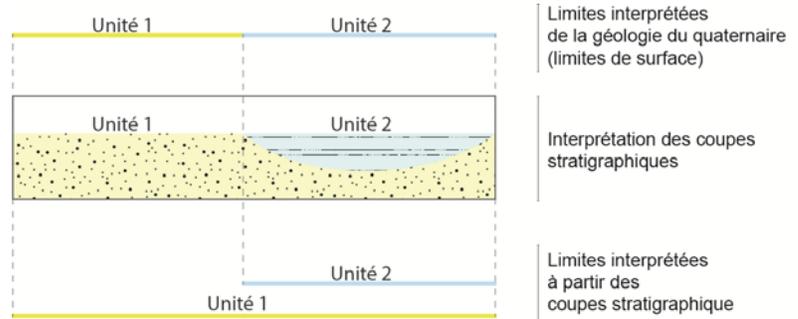
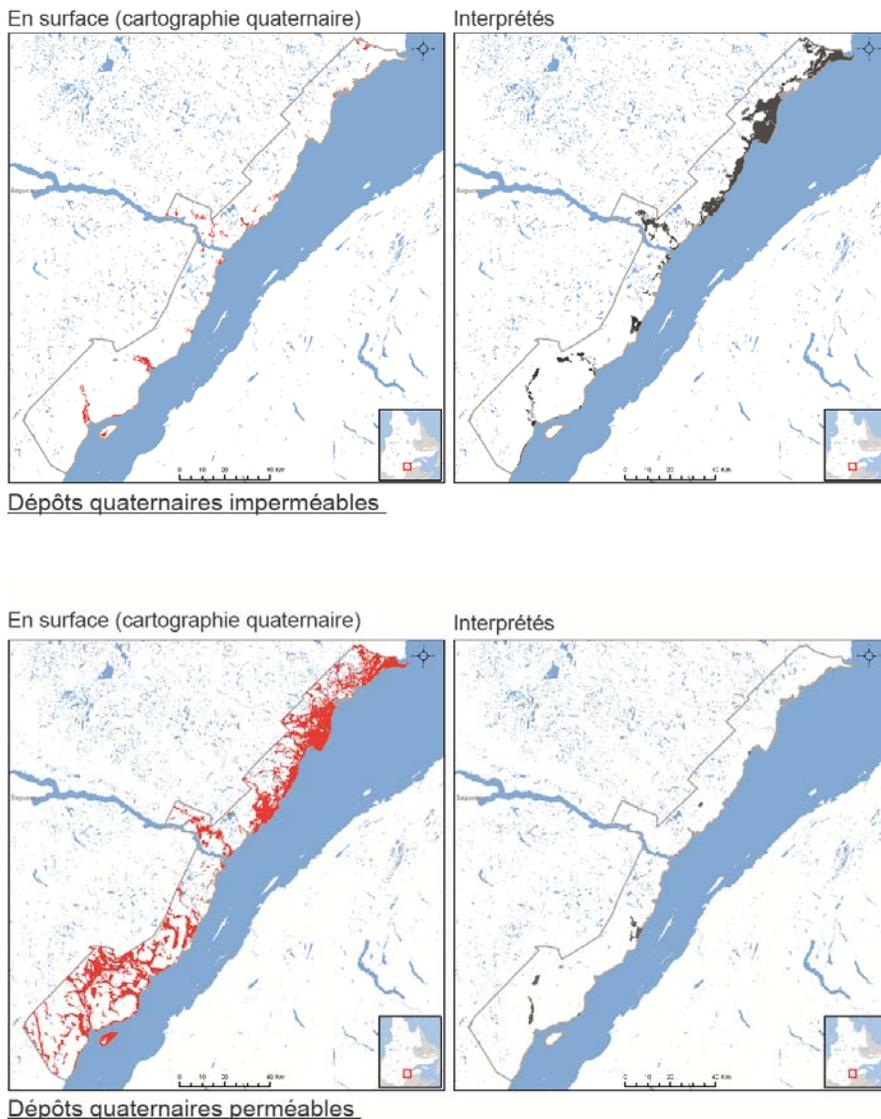


Figure 6-13 : Représentation schématique des limites hydrogéologiques interprétées à partir de coupes stratigraphiques.



Ce travail d'interprétation a permis la numérisation, à l'aide d'un logiciel à référence spatiale (ArcGis), de l'ensemble des limites sous-couverture à partir des informations obtenues des coupes stratigraphiques, mais également à partir des forages et de la topographie.

Comme illustré sur la figure 6-14, l'interprétation des dépôts imperméables sous-couverture est plus importante sur le territoire de la Haute-Côte-Nord et au droit des vallées du Gouffre et de la Malbaie. Cette interprétation représente une numérisation de 105 polygones pour une superficie totale de 574 km² pour tout le territoire de CHCN.

L'interprétation des dépôts perméables sous-couvertures a aussi été réalisée, mais dans une moindre mesure en partie à cause du manque d'informations stratigraphiques.

Cette interprétation représente une numérisation de 11 polygones pour une superficie totale de 33 km² pour tout le territoire du CHCN.

Figure 6-14 : Limites hydrogéologiques interprétées à partir de coupes stratigraphiques.

6.2.1.4 Limites hydrogéologiques interprétées à partir des lignes d'écoulement

La connaissance de la piézométrie permet d'interpréter la direction et le sens des écoulements régionaux. Comme illustré à la figure 6-15, l'analyse de ces écoulements permet de distinguer des environnements indépendants d'un point de vue hydrodynamique. Dans le cadre du projet PACES-CHCN ces limites d'environnement sont essentiellement les cours d'eau majeurs. Ils sont considérés comme une limite hydraulique où pas ou peu d'échanges sont possibles de part et d'autre.

Le territoire de CHCN est ainsi subdivisé en 13 ensembles hydrogéologiques distincts tel que présenté à la figure 6-15.

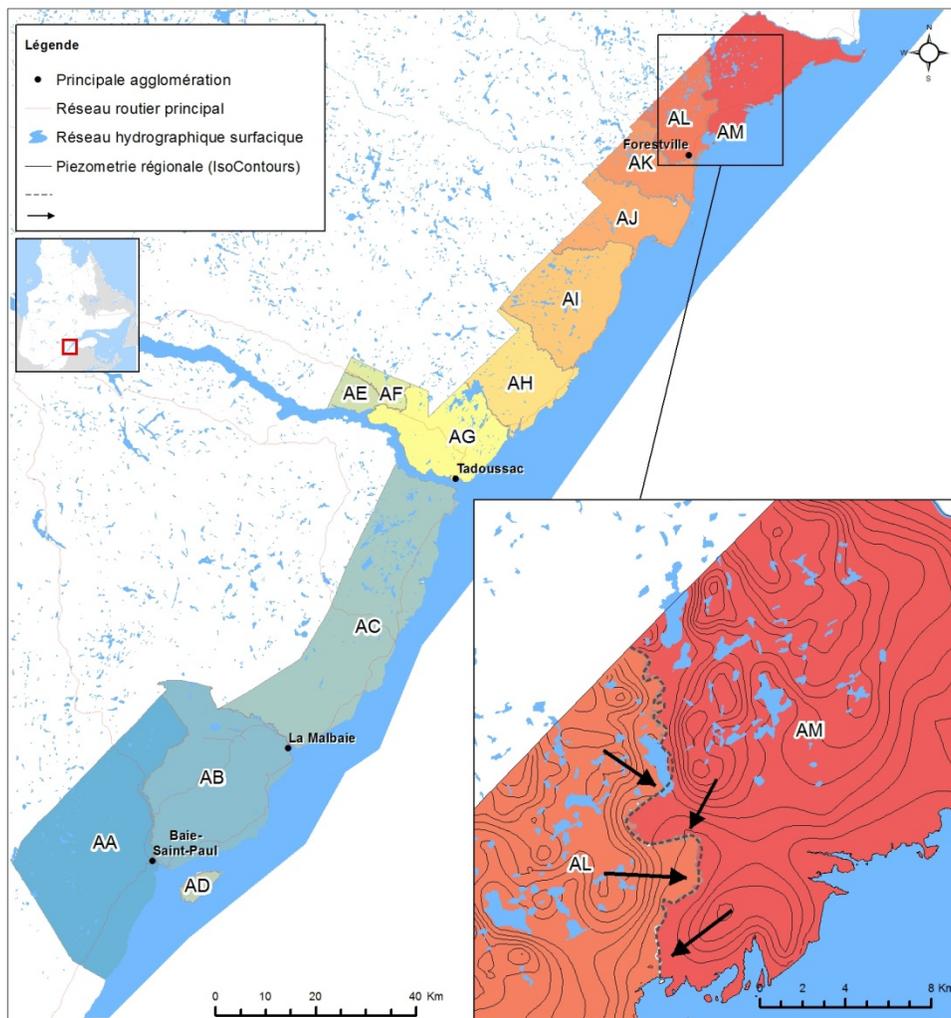


Figure 6-15 : Limites hydrogéologique interprétées à partir des lignes d'écoulement.

6.2.2 Référentiel hydrogéologique : principes et règles de découpage et d'assemblage

Les interprétations des limites hydrogéologiques énoncées précédemment permettent une délimitation en surface des polygones des entités hydrogéologiques. L'assemblage de ces polygones en entités hydrogéologiques repose sur plusieurs principes de base dont les suivants :

1. Les règles de découpage des unités sont définies selon leur géologie (lithologie du roc et quaternaire) et les propriétés de l'écoulement.
2. Le découpage des unités est réalisé selon l'état des connaissances; il est donc susceptible d'évoluer et d'être amélioré au cours du temps.
3. Les entités hydrogéologiques sont représentées par un ou plusieurs polygones représentant une unité hydrogéologique. Certaines entités peuvent se composer de polygones disjoints mais possédant des propriétés similaires.
4. Les entités sous couvertures sont délimitées par interprétation stratigraphique.
5. Une codification et une nomenclature des entités sont conçues pour être utilisables et applicables au-delà du territoire du CHCN.

La caractérisation qualitative des milieux géologiques selon leur porosité, leur perméabilité, leur potentiel aquifère et leur degré de confinement permet un passage transversal de connaissances géologiques aux connaissances hydrogéologiques. Ceux-ci définissent des unités hydrogéologiques constituant une partie délimitée de l'espace à laquelle sont associées des caractéristiques hydrogéologiques qualitatives. Ces unités sont des polygones de base qui, regroupés selon leur propriétés, constituent des entités hydrogéologiques distinctes.

La mise en place d'un **référentiel hydrogéologique** selon Petit et al. (2003) « vise à décrire ces unités hydrogéologiques présentes sur le territoire afin de constituer un outil (...) permettant de localiser les données relatives à l'eau souterraine.

L'objectif de ce référentiel est de mettre à disposition de chaque utilisateur un système d'identification unique des aquifères, réalisé selon des règles communes, permettant de traiter et d'échanger les informations intégrées dans une base de données (...) ».

6.2.2.1 *Composantes du référentiel*

Entités hydrogéologiques

Le référentiel hydrogéologique s'applique aux entités hydrogéologiques (niveaux 1 à 3), chaque entité est :

- délimitée à une certaine échelle (**un niveau**);
- associée à une formation géologique (**un thème**);
- caractérisée par un type de porosité (**un milieu**);
- définie par ses potentialités aquifères (**une nature**), ou la présence ou non d'une nappe (**un état**).

NIVEAUX d'utilisation des entités hydrogéologiques

Ces niveaux caractérisent les besoins très différents des futurs utilisateurs. Ce sont des échelles d'utilisation et de représentation de l'information.

- Le niveau provincial (Niv1) représente de grands ensembles hydrogéologiques, support d'études et d'orientation à l'échelle provinciale. L'utilisation de ce niveau est au-delà du 1/1 000 000. Les entités de Niv1 se composent d'entités de Niv2.
- Le niveau régional (Niv2) représente des ensembles hydrogéologiques régionaux. L'utilisation de ce niveau est comprise entre 1/500 000 et 1/200 000. Les entités de Niv2 se composent d'entités de Niv3.
- Le niveau local (Niv3) représente les entités hydrogéologiques locales. L'utilisation de ce niveau est comprise en deçà du 1/50 000. Les entités de Niv3 se composent d'unités hydrogéologiques.

Unités hydrogéologiques

Chaque unité hydrogéologique se caractérise par un thème, un milieu, une nature et un état.

THÈMES des unités hydrogéologiques

Le référentiel hydrogéologique mis en place subdivise les unités hydrogéologiques selon quatre thèmes géologiques; ils sont une représentation chronologique simplifiée des environnements géologiques.

Dans le cadre du projet PACES-CHCN, les milieux géologiques régionaux sont ainsi regroupés :

- dépôts quaternaires (postglaciaire);
- dépôts quaternaire (glaciaire);
- roc sédimentaire (calcaire);
- roc cristallin.

MILIEUX des unités hydrogéologiques

La composante « Milieu » fait référence au type de porosité de l'unité hydrogéologique, telle que définie précédemment. Pour chaque unité, le milieu sera donc de l'un des trois types suivants.

- poreux (porosité d'interstices);
- fracturé (porosité de fractures);
- mixte (porosité de matrice et de fracture).

NATURE des unités hydrogéologiques

La composante « Nature » représente la perméabilité de l'unité hydrogéologique ou son potentiel aquifère en fonction du « Niveau » de visualisation. On distingue ainsi :

- Au niveau provincial (Niv1) :
 - Un grand système aquifère (fort potentiel);
 - Un grand domaine aquifère (moyen à faible potentiel).
- Au niveau régional (Niv2) :
 - Un système aquifère (fort potentiel);
 - Un domaine aquifère (moyen à faible potentiel).
- Au niveau local (Niv3) :
 - Une unité perméable;
 - Une unité semi-perméable;
 - Une unité imperméable.

ÉTAT des unités hydrogéologiques

La composante « État » fait référence, lorsque présente, à l'état (ou le degré de confinement) de la masse d'eau contenue dans une unité hydrogéologique. On distingue ainsi l'état de nappe comme étant :

- captif;
- libre;
- libre et captif;
- inconnu.

En l'état actuel des connaissances l'état de la nappe d'eau ne peut être défini par unité hydrogéologique, la valeur « inconnu » est donc appliquée pour chacune des unités. La composante « État » est toutefois conservée dans le référentiel advenant le cas d'amélioration future des connaissances hydrogéologiques régionales.

6.2.2.2 Unités hydrogéologiques du territoire de CHCN définies selon le référentiel hydrogéologique

Sept types de milieu hydrogéologique peuvent se retrouver sur un territoire, soit :

1. les aquifères perméables, en milieu poreux, à nappe libre;
2. les aquifères perméables, en milieu poreux, à nappe captive;
3. les aquitards imperméables, en milieu poreux;
4. les aquifères semi-perméables, en milieu fracturé, à nappe libre;
5. les aquifères semi-perméables, en milieu fracturé, à nappe captive;
6. les aquifères semi-perméables, en milieu mixte, à nappe libre;

7. les aquifères semi-perméables, en milieu mixte, à nappe captive.

L'application du référentiel sur le territoire de CHCN permet ainsi de définir les types de milieux en présence. L'interprétation des 6 milieux géologiques régionaux issus de la simplification géologique (voir 4.5.4 Interprétation des coupes stratigraphiques) renvoi donc quatre unités hydrogéologiques distinctes. Cette interprétation est synthétisée au tableau 6-1; elle regroupe :

- 1- les unités perméables en milieu poreux, qui se composent de sable et gravier;
- 2- les unités imperméables en milieu poreux qui se composent d'argile;
- 3- les unités semi-perméables en milieu mixte qui se composent des roches sédimentaires;
- 4- les unités semi-perméables en milieu fracturé qui se composent de till et du roc cristallin.

Tableau 6-1 : Unités hydrogéologiques de base du territoire de CHCN.

MILIEUX GÉOLOGIQUES RÉGIONAUX*	RÉFÉRENTIEL HYDROGÉOLOGIQUE				UNITÉS HYDROGÉOLOGIQUES RÉGIONALES
	THEME (Formation géologique)	NATURE (Perméabilité)	ÉTAT (État de la nappe)	MILIEU (Porosité)	
Sable	Dépôts quaternaires glaciaires	Perméable	Inconnu	Poreux	unités perméables en milieu poreux
Argile		Imperméable	Inconnu		unités imperméables en milieu poreux
Gravier		Perméable	Inconnu		unités perméables en milieu poreux
Calcaires	Roches sédimentaires	Semi-perméable	Inconnu	Mixte	unités semi-perméables en milieu mixte
Roc	Roches cristallines		Inconnu	Fracturé	unités semi-perméables en milieu fracturé

* Le till est d'épaisseur variable et ses caractéristiques hydrogéologiques sont mal connues. Principalement d'épaisseur inférieure à 1 mètre le till est intégré aux milieux géologiques rocheux.

Ces unités constituent les polygones de base pour la construction des entités hydrogéologiques de niveau 3. Contrairement aux appellations génériques des milieux hydrogéologiques, l'identification des unités hydrogéologiques est volontairement simplifiée, principalement par manque de connaissances hydrogéologiques.

Les termes de nappe libre/captive sont ainsi retirés puisque l'occurrence d'une nappe n'est pas vérifiée. Pour la même raison les termes aquifère/aquitard sont également omis, le potentiel aquifère d'une unité est ainsi défini par sa perméabilité.

6.2.2.3 Assemblage des unités

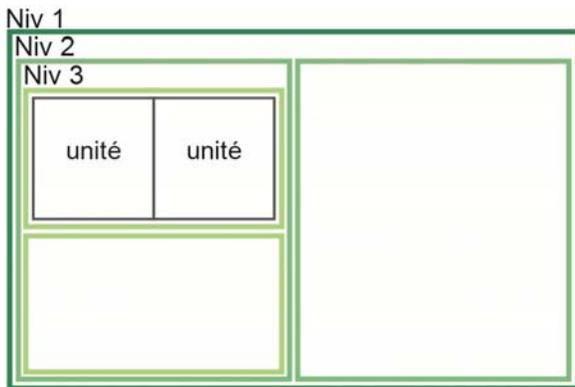


Figure 6-16 : Principe d'assemblage.

L'ensemble des unités de base présentées précédemment permet une délimitation fine (en surface) de l'ensemble du territoire. Ce découpage est une compilation des limites interprétées, les différents niveaux sont obtenus par emboitements successifs. Comme illustré sur la figure 6-16 une entité à un niveau local (Niv3) est constituée d'un regroupement d'unités, les entités de niveau 2 (Niv2) sont un regroupement d'entités de Niv3 et celles de niveau 1 (Niv1) sont constituées d'entités de Niv2.

Une entité hydrogéologique a donc toujours une entité « mère » mis à part le niveau 1.

6.2.2.4 Ordonnement

Lors de la construction de la base de données, un ordre « absolu » (figure 6-17a) est attribué à chaque unité sous la forme d'un code alphabétique. Ce code permet d'identifier le recouvrement d'une unité, il distingue trois classes :

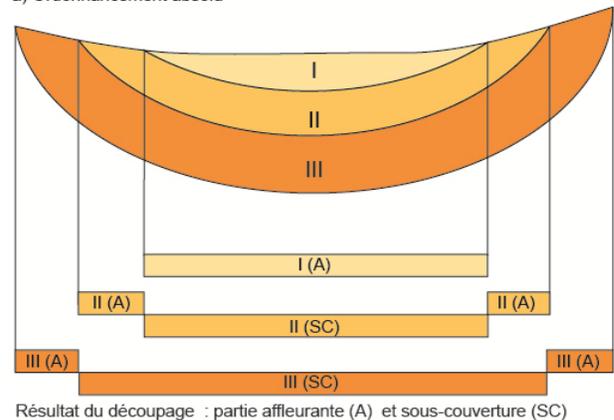
- A : milieu affleurant;
- SC : unité située sous une autre;
- HY : unité située sous l'hydrographie.

Ce type d'ordre permet aisément une représentation cartographique des entités affleurantes par une sélection sous SIG de toutes les unités ou entités codées (A).

Le système de référentiel permet une représentation de l'empilement stratigraphique plus précise sous SIG par l'application d'un ordonnancement dit « relatif » (figure 6-17b). Cet ordre relatif se distingue de l'ordre absolu par l'attribution d'un code numérique permettant d'identifier le niveau de recouvrement d'une unité. Une entité hydrogéologique pourra, par exemple, être constituée :

- d'un polygone (unité) d'ordre relatif (1), soit à l'affleurement;
- d'un polygone (unité) d'ordre relatif (2), correspondant à un recouvrement de l'entité par un polygone (unité) d'ordre relatif (1);
- d'un polygone (unité) d'ordre relatif (3), correspondant à un recouvrement de l'entité par un polygone (unité) d'ordre relatif (2);
- d'un polygone (unité) d'ordre relatif (n), correspondant à un recouvrement de l'entité par un polygone (unité) d'ordre relatif (n-1).

a) Ordonnement absolu



b) Ordonnement relatif

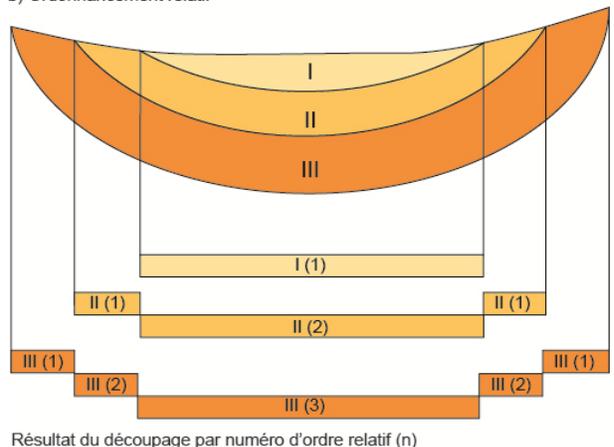


Figure 6-17 : Ordres absolu et relatif.

6.2.2.5 Nomenclature des entités hydrogéologiques régionales

La codification et la nomenclature des entités (à chaque niveau de visualisation) créées dans le cadre du projet PACES-CHCN sont conçues pour être utilisables et applicables au-delà du territoire.

Codes alphanumériques

Au niveau provincial (niveau 1) : Code à 2 chiffres → **01**

- Dans le cadre du projet PACES-CHCN l'ensemble de la région constitue le niveau 1, le code 01 est toutefois conservé dans l'éventualité de l'intégration de nouvelles régions dans ce référentiel.

Au niveau régional (niveau 2) : Code entités « mère » + Code à 2 lettres → **01AA**

- 13 niveaux régionaux sont identifiés, ils correspondent aux 13 limites hydrogéologiques définies à la section 6.3.3.1.

Au niveau local (niveau 3) : Code entités « mère » + Code à 2 chiffres → **03AA01**

- unités géologiques 0 + (code géologique);
- unités quaternaires 1 + (num. séquentiel) pour les sédiments fins;
- 2 + (num. séquentiel) pour les sédiments grossiers.

Nomenclature

Au niveau 1 : Nature + Localisation

→ **Grand domaine aquifère de Charlevoix**

Au niveau 2 : Nature + Localisation

→ **Domaine aquifère de la rivière du Gouffre**

Au niveau 3 : Nature + Lithologie + Localisation

→ **Unité perméable des sédiments deltaïques de la vallée du Gouffre**

6.3 Cartes hydrogéologiques du territoire de CHCN

La méthodologie employée, dans le cadre du projet PACES-CHCN pour délimiter les unités hydrogéologiques permet une multitude de représentations cartographiques hydrogéologiques en fonction des besoins et des préférences des utilisateurs.

Contextes hydrogéologiques (C)

La cartographie des contextes hydrogéologiques constitue la représentation des unités hydrogéologiques compilées suivant leur empilement stratigraphique. Dans ce mode de visualisation, figure 6-18, un même milieu aquifère peut être séparé en deux contextes différents.

Ce mode de visualisation permet d'appréhender des limites de contextes hydrogéologiques indépendamment des unités hydrogéologiques.

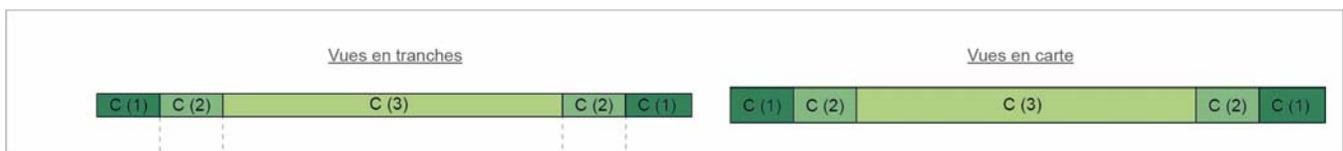


Figure 6-18 : Représentation schématique de visualisation cartographique par contextes hydrogéologiques.

Cartographie régionale par ordre absolu : affleurement (A) ou sous couverture (SC)

La cartographie régionale constitue la représentation selon un ordre absolu des unités hydrogéologiques de bases regroupées selon leur perméabilité. À titre d'exemple, dans ce mode de représentation, figure 6-19, deux unités hydrogéologiques de bases imperméables mais distinctes seront regroupées en une limite globale d'une unité imperméable.

Ce mode de visualisation permet d'observer la superposition de grandes unités délimitées par leur perméabilité mais pouvant être hydrogéologiquement distinctes.

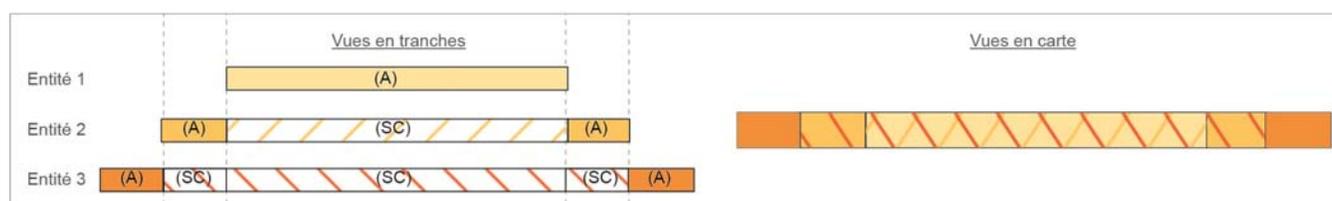


Figure 6-19 : Représentation schématique de visualisation cartographique par ordre absolu.

Cartographie locale par ordre relatif : position de l'entité dans un contexte hydrogéologique (numéro)

Les fiches aquifères ou cartographies locales constituent la représentation selon un ordre relatif des unités hydrogéologiques de bases regroupées en milieux aquifères et aquitards.

Ce mode de visualisation, figure 6-20, permet d'observer les aquifères et aquitards individuellement ainsi que leur degré de confinement (ou ordre de superposition dans un contexte). La nomenclature et la codification des entités hydrogéologiques des niveaux 2 et 3 sont appliquées à ce mode de représentation.

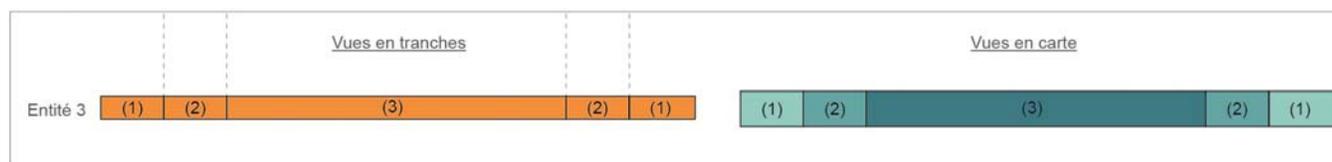


Figure 6-20 : Représentation schématique de visualisation cartographique par ordre relatif.

6.3.1 Les contextes hydrogéologiques régionaux

Un **contexte hydrogéologique** définit une séquence (une superposition) d'unités hydrogéologiques impliquant une variation verticale du comportement des eaux souterraines. Il permet de visualiser comment sont organisées les unités géologiques en profondeur et d'identifier quelle séquence de dépôts meubles peut être rencontrée dans un secteur donné.

Ces contextes exercent une influence sur l'écoulement et la qualité de l'eau souterraine. Ils sont établis dans le but de servir d'indicateurs régionaux des conditions hydrogéologiques présentes sur un territoire.

L'agencement stratigraphique des unités hydrogéologiques en profondeur est effectué à partir de l'ordonnement relatif des unités hydrogéologiques de base permettant de générer automatiquement une séquence.

Tel qu'illustré à la figure 6-21, les quatre unités présentes sur le territoire, soit les unités perméables (1), les unités imperméables (2) et les unités semi-perméables en milieu mixte (3) et en milieu fracturé (4) se séquentent suivant 12 combinaisons regroupées en 7 contextes hydrogéologiques.

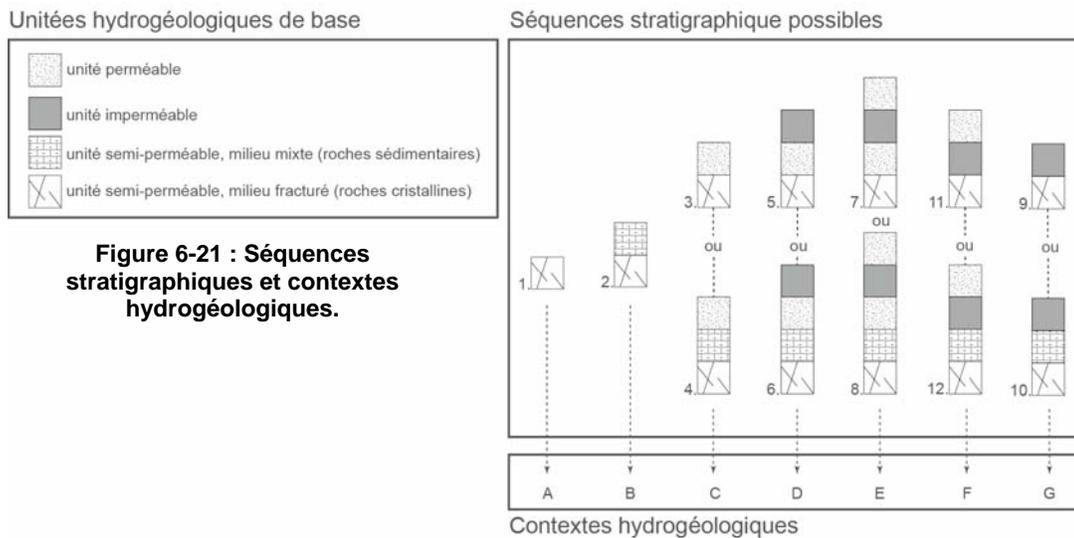


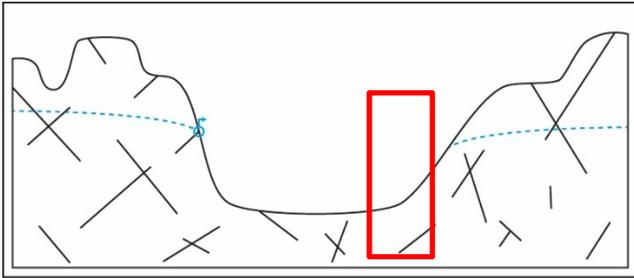
Figure 6-21 : Séquences stratigraphiques et contextes hydrogéologiques.

L'ensemble des contextes établis est décrit ci-après en présentant les caractéristiques principales estimées en termes :

1. de nombre d'aquifères considérés (indiqué entre parenthèses dans l'appellation);
2. du type de nappe présumé par aquifères;
3. de la possibilité de résurgence ou d'affleurement de la nappe;
4. de la capacité de recharge;
5. de la localisation sur le territoire du CHCN.

Dans le cadre du projet PACES-CHCN, les limites des contextes hydrogéologiques sont présentées sur la carte #17 – Contextes hydrogéologiques (annexe numérique AN1). Ces limites et caractéristiques sont établies à l'échelle régionale; ainsi chaque contexte est représenté schématiquement. Ces contextes sont des indicateurs mais ne peuvent remplacer des études locales spécifiques effectuées par un hydrogéologue, pouvant comprendre des forages, des interprétations stratigraphiques ou des essais de pompage.

A- Aquifère semi-perméable, en milieu fracturé, à nappe libre ou captive



Ce contexte hydrogéologique (encadré rouge) regroupe l'ensemble des aquifères semi-perméables, en milieu fracturé, affleurants. Ce contexte hydrogéologique est caractérisé par la présence d'une nappe d'eau souterraine libre ou captive selon le degré de fracturation.

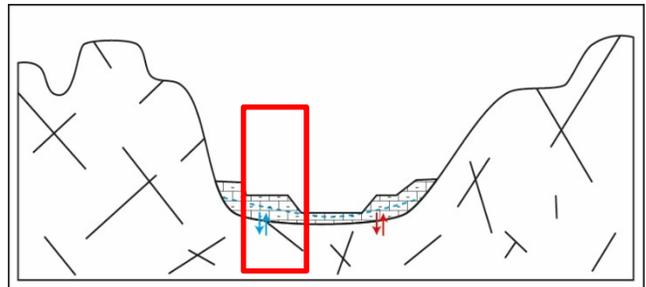
La recharge y est relativement faible mais lors de fortes variations du relief, ce contexte hydrogéologique peut présenter des zones de résurgences des eaux souterraines sous forme de sources.

Ce contexte hydrogéologique est caractéristique des hauts reliefs du territoire de CHCN (70% du territoire).

B- Deux aquifères semi-perméables superposés, en milieux fracturé et mixte, à nappe libre ou captive

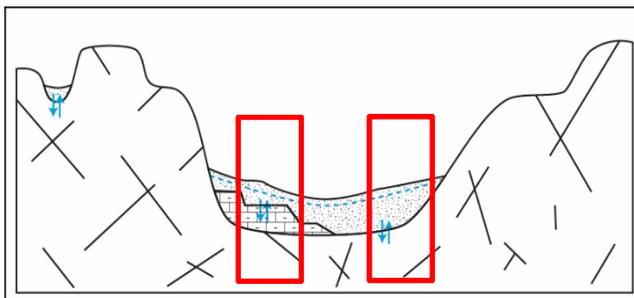
Ce contexte hydrogéologique (encadré rouge) regroupe l'ensemble des aquifères semi-perméables en milieu fracturé recouvert par un aquifère semi-perméable en milieu mixte affleurant. Les connexions existantes entre ces deux aquifères ne sont pas démontrées mais peuvent avoir lieu localement.

Ce contexte hydrogéologique est caractérisé par la présence d'une ou deux nappes d'eau souterraine libre ou captive selon le degré de fracturation. La recharge y est relativement faible, mais aux endroits de forte variation du relief ce contexte peut présenter des zones de résurgences des eaux souterraines sous forme de source.



On retrouve essentiellement ce contexte hydrogéologique en bordure des vallées du Gouffre, de la Malbaie et du fleuve Saint-Laurent dans le secteur des Éboulements.

C- Aquifère perméable, en milieu poreux, à nappe libre



Ce contexte hydrogéologique (encadrés rouges) regroupe l'ensemble des aquifères perméable, en milieu poreux, à nappe libre qui recouvre un aquifère semi-perméable en milieu fracturé ou mixte.

Dans ce contexte, l'aquifère de surface se caractérise par la présence d'une nappe d'eau souterraine libre pouvant présenter localement des connexions avec les aquifères semi-perméables sous-jacents. La recharge y est relativement élevée et la nappe libre affleure suivant

l'hydrographie de surface (lac et cours d'eau).

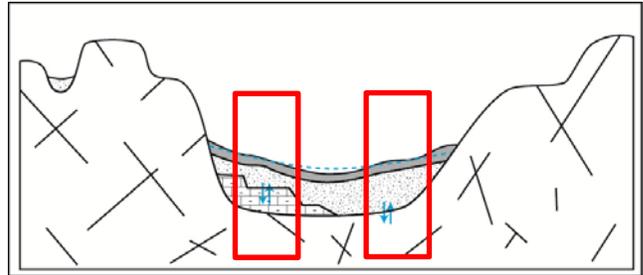
Ce contexte hydrogéologique est présent sur l'ensemble du territoire de CHCN, particulièrement dans les hautes terres, soit en bordure des cours d'eau et des vallées qui les sillonnent. Il caractérise également l'Isle-aux-Coudres.

D- Aquifère perméable, en milieu poreux, à nappe captive

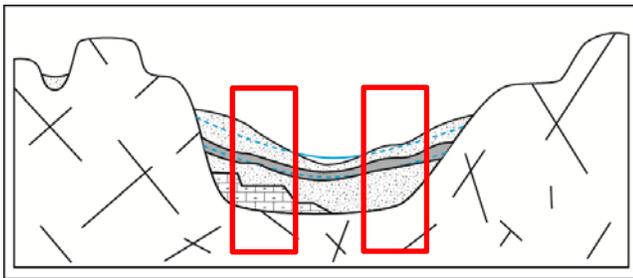
Ce contexte hydrogéologique (encadrés rouges) regroupe l'ensemble des aquifères perméables, en milieu poreux, recouverts par une unité imperméable qui confine la nappe.

Dans ce contexte, l'aquifère en milieu poreux est confiné et se caractérise par la présence d'une nappe captive pouvant localement présenter des connexions avec les aquifères semi-perméables sous-jacents. La recharge y est très faible à nulle.

Ce contexte hydrogéologique est localement identifié sur la rive ouest de la rivière du Gouffre entre les municipalités de Baie-Saint-Paul et Saint-Urbain.



E- Deux aquifères perméables superposés, en milieu poreux, à nappe libre et captive



Ce contexte hydrogéologique (encadrés rouges) regroupe l'ensemble des environnements où deux aquifères perméables en milieu poreux sont séparés par une unité imperméable.

Dans ce contexte, l'aquifère perméable de surface présente une nappe libre pouvant présenter localement des connexions avec la nappe d'eau confinée de l'aquifère perméable sous-jacent. La recharge y est

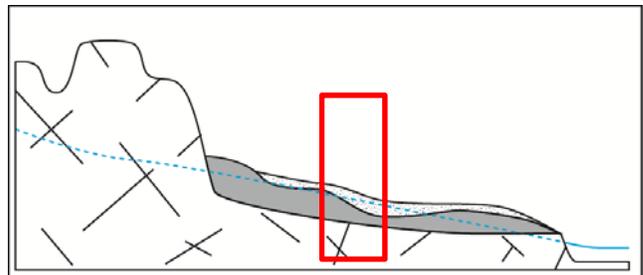
relativement élevée, pour l'aquifère de surface et faible à nulle pour l'aquifère confiné. Localement, l'affleurement de la nappe libre peut s'effectuer au niveau de l'hydrographie (lac et cours d'eau).

On retrouve localement ce contexte hydrogéologique entre les municipalités de Saint-Urbain et Notre-Dame-des-Monts, au niveau de la municipalité de Saint-Siméon et sur de très petites zones sur les municipalités de Tadoussac et Longue-Rive.

F- Deux aquifères perméable et semi-perméable superposés, en milieu poreux et fracturé, à nappe libre et captive

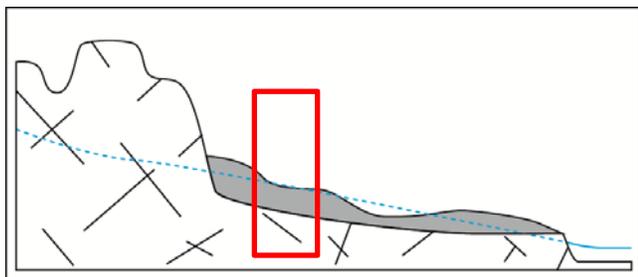
Ce contexte hydrogéologique (encadré rouge) regroupe les aquifères perméables en milieu poreux sus-jacents à une unité imperméable qui confine des aquifères semi-perméables.

Dans ce contexte, l'aquifère perméable en milieu poreux de surface est caractérisé par la présence d'une nappe d'eau souterraine libre exploitable selon son épaisseur. L'aquifère semi-perméable présente une nappe captive confinée par une unité imperméable de plusieurs mètres, voire plusieurs dizaines de mètres, d'épaisseur.



Ce contexte hydrogéologique couvre une partie importante des basses terres de la Haute-Côte-Nord.

G- Aquifère semi-perméable, en milieu fracturé, à nappe captive



Ce contexte hydrogéologique (encadré rouge) regroupe l'ensemble des aquifères semi-perméables en milieu fracturé confiné par une unité imperméable.

Il est caractérisé par la présence d'une nappe d'eau souterraine captive. La recharge y est très faibles à nulle. Sur des zones où l'unité imperméable est plus mince ou quasi-absente, la nappe confinée peut localement affleurer créant des zones propices aux milieux humides.

Ce contexte hydrogéologique correspond à une subdivision du contexte hydrogéologique F lorsqu'aucun aquifère perméable n'est présent en surface. De ce fait, ce contexte est présent localement dans les basses terres de la Haute-Côte-Nord et présent dans les vallées du Gouffre et de La Malbaie.

6.3.2 Cartographie hydrogéologique régionale

Dans le cadre du projet PACES-CHCN, la cartographie régionale des limites des entités hydrogéologiques est présentée sur la carte #18a – *Limites des unités hydrogéologiques perméables et imperméables* (annexe numérique AN1). Les entités associées aux milieux fracturés et mixtes de la carte #18b – *Limites des unités hydrogéologiques semi-perméables* (annexe numérique AN1) sont ainsi dissociées des entités associées aux milieux poreux (carte #18a).

Comme illustrée en figure 6-22, à l'échelle régionale, la cartographie des milieux poreux est effectuée suivant un ordre de représentation absolu. Sont ainsi représentées.

1-les unités perméables et imperméables affleurantes issues de la cartographie quaternaire.

2-les unités perméables et imperméables sous-couverture issues des interprétations des coupes stratigraphiques.

Tel que défini à la section 6.2.2.4, ce mode de représentation met en évidence la superposition ou le confinement des entités hydrogéologiques indépendamment de l'ordre de superposition.

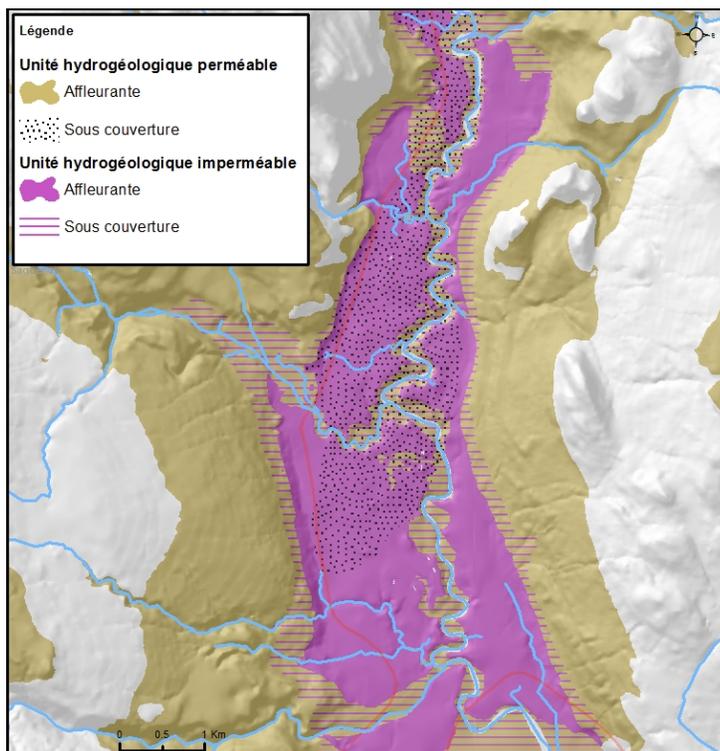


Figure 6-22 : Exemple de limites d'entités hydrogéologiques régionales (Niv1) en milieux poreux (ordre absolu).

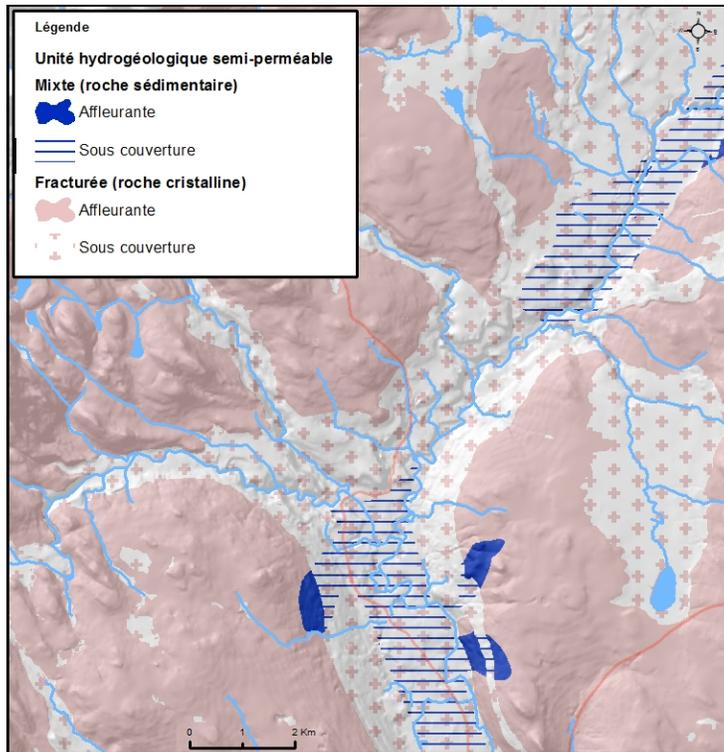


Figure 6-23 : Exemple de limites d'entités hydrogéologiques régionales (Niv1) en milieux mixtes et fracturés (ordre absolu).

La cartographie des milieux mixtes et fracturés est également effectuée suivant un ordre de représentation absolu, pour définir deux catégories (figure 6-23).

1- Les unités semi-perméables en milieu fracturé à l'affleurement et sous couverture. Celles-ci regroupent l'ensemble des milieux géologiques cristallins.

2- Les unités semi-perméables en milieu mixte à l'affleurement et sous couverture. Celles-ci regroupent l'ensemble des milieux géologiques sédimentaires.

6.3.3 Cartographie hydrogéologique locales : Fiches hydrogéologiques

Deux types de fiches ont été créés dans le cadre du projet PACES-CHCN afin de visualiser les entités hydrogéologiques délimitées aux niveaux 2 (régional) et 3 (local). Les fiches hydrogéologiques constituent la représentation selon un ordre relatif des unités hydrogéologiques de base regroupées en domaines aquifères pour le niveau 2 et milieux aquifères et aquitards pour le niveau 3. L'intégralité de ces fiches est disponible à l'annexe numérique AN12.

6.3.3.1 Entités hydrogéologiques de Niveau 2

Découpage

Sur le territoire de CHCN, l'ensemble de la méthodologie cartographique a permis de délimiter 13 entités hydrogéologiques de niveau 2 qui caractérisent 13 domaines aquifères (tableau 6-2) :

Tableau 6-2 : Liste des entités hydrogéologiques de niveau 2.

Code	Toponymie des entités de niveau 2
01AA	Domaine aquifère de la rivière du Gouffre
01AB	Domaine aquifère de la rivière Malbaie
01AC	Domaine aquifère de Saint Siméon
01AD	Domaine aquifère de l'Isle aux Coudres
01AE	Domaine aquifère de Sacré-Coeur (Est)
01AF	Domaine aquifère de Sacré-Coeur (Ouest)
01AG	Domaine aquifère de Tadoussac
01AH	Domaine aquifère des Bergeronnes
01AI	Domaine aquifère des Escoumins
01AJ	Domaine aquifère de Longue-Rive
01AK	Domaine aquifère de Forestville (Sud)
01AL	Domaine aquifère de Forestville (Nord)
01AM	Domaine aquifère de Colombier

Ces domaines regroupes chacun plusieurs aquifères ou aquitards superposés mais sont individuellement distincts. Comme il est mentionné dans la partie méthodologie, au niveau régional (Niveau2), la nomenclature des entités est réalisée selon leur « Nature » (potentiel aquifère) tel qu'un système aquifère présente un fort potentiel tandis qu'un domaine aquifère présente un potentiel moyen à faible.

Ainsi, sur le territoire de CHCN il a été établi que l'ensemble des entités hydrogéologiques de niveau 2 représente des domaines aquifères pour deux raisons principales :

1. Les aquifères semi-perméables, en milieu fracturé, dominant sur le territoire d'étude.
2. 50 % de l'exploitation municipale et de nombreux puits privés sont réalisés dans des aquifères semi-perméables, en milieu fracturé.

Fiche hydrogéologique de niveau 2

Les entités hydrogéologiques de niveau 2 sont caractérisées individuellement par les composantes Nature, État, Thème et Milieu. Chaque entité est décrite par une fiche (figure 6-24) composée de :

1. la toponymie et le code de l'entité considérée;
2. les composantes du référentiel de l'entité considérée;
3. une carte de localisation régionale;
4. une carte des entités de niveau 3 rattachées à l'entité de niveau 2 considérée.

Fiche hydrogéologique Niveau 2 (régional)	
Toponymie et code de de l'entité hydrogéologique	Carte de localisation (région CHCN)
<u>Composantes du référentiel caractéristiques de l'entité :</u> Nature État Thème majoritaire (le thème est appliqué suivant le type de milieu majoritairement affleurant) Milieu	
Carte des entités de niveau 3 composant l'entité de niveau 2 considérée → Affichage des parties affleurantes de chaque entités de niveau 3 → Étiquettes des Entité de niveau 2 limitrophes	Symbologie et toponymie des entités de niveau 3 attachées au niveau 2 considéré

Figure 6-24 : Modèle de fiche hydrogéologique de niveau 2.

6.3.3.2 Entités hydrogéologiques de Niveau 3

Découpage

Sur le territoire de CHCN l'ensemble de la méthodologie cartographique a permis de délimiter 85 entités hydrogéologiques de niveau 3 qui caractérisent :

- 27 aquifères perméables;
- 40 aquifères semi-perméables;
- 18 aquitards.

Le détail des unités de niveau 3 définies par entité de niveau 2 est présenté au tableau 6-3.

Tableau 6-3 : Liste des entités hydrogéologiques de niveau 3.

01AA Domaine aquifère de la rivière du Gouffre	
<u>Aquifères semi-perméables</u>	
01AA01	Unité semi-perméable des complexes gneissiques et granitiques du Massif
01AA03	Unité semi-perméable des intrusions mafiques et ultramafiques du Massif
01AA04	Unité semi-perméable des intrusions felsiques du Massif
01AA05	Unité semi-perméable des calcaires Ordoviciens du Massif
<u>Aquitards</u>	
01AA11	Unité imperméable des sédiments marins de la vallée du Gouffre
01AA12	Unité imperméable des sédiments glaciomarins du Massif
<u>Aquifères perméables</u>	
01AA21	Unité perméable des sédiments fluviglociaires de la vallée du Gouffre
01AA22	Unité perméable des sédiments glaciomarins de la vallée du Gouffre
01AB Domaine aquifère de la rivière Malbaie	
<u>Aquifères semi-perméables</u>	
01AB01	Unité semi-perméable des complexes gneissiques et granitiques de l'Astroblème
01AB02	Unité semi-perméable des roches métasédimentaires de l'Astroblème
01AB03	Unité semi-perméable des intrusions mafiques et ultramafiques de l'Astroblème
01AB04	Unité semi-perméable des intrusions felsiques de l'Astroblème
01AB05	Unité semi-perméable des calcaires Ordoviciens de l'Astroblème
<u>Aquitards</u>	
01AB11	Unité imperméable des sédiments marins de l'Astroblème
01AB12	Unité imperméable des sédiments marins du fleuve St-Laurent
01AB13	Unité imperméable des sédiments marins de la rivière Malbaie
<u>Aquifères perméables</u>	
01AB21	Unité perméable des sédiments fluviglociaires de l'Astroblème
01AB22	Unité perméable des sédiments glaciomarins de la rivière Malbaie (ouest)
01AB23	Unité perméable des sédiments glaciolacustres du fleuve St-Laurent
01AC Domaine aquifère de Saint Siméon	
<u>Aquifères semi-perméables</u>	
01AC01	Unité semi-perméable des complexes gneissiques et granitiques de St-Siméon
01AC02	Unité semi-perméable des roches métasédimentaires de St Siméon
01AC03	Unité semi-perméable des intrusions mafiques et ultramafiques de St-Siméon
01AC04	Unité semi-perméable des intrusions felsiques de St-Siméon
01AC05	Unité semi-perméable des calcaires Ordoviciens de St-Siméon
<u>Aquitards</u>	
01AC11	Unité imperméable des sédiments marins de la rivière Malbaie
01AC12	Unité imperméable des sédiments marins de Baie-Ste-Catherine
01AC13	Unité imperméable des sédiments marins de St-Siméon

01AC Domaine aquifère de Saint Siméon (suite)

Aquifères perméables

01AC21	Unité perméable des sédiments fluvioglaciers de la moraine de St-Narcisse
01AC22	Unité perméable des sédiments glaciomarins de St-Siméon
01AC23	Unité perméable des sédiments glaciomarins de la rivière Malbaie
01AC24	Unité perméable des sédiments glaciomarins de Baie-Ste-Catherine

01AD Domaine aquifère de l'Isle aux Coudres

Aquifères semi-perméables

01AD06	Unité semi-perméable des roches sédimentaires et volcaniques de l'Isle-aux-Coudres
--------	--

Aquitards

01AD11	Unité imperméable indifférenciée de l'Isle-aux-Coudres
--------	--

Aquifères perméables

01AD21	Unité perméable des sédiments marins de l'Isle-aux-Coudres
--------	--

01AE Domaine aquifère de Sacré-Coeur (Est)

Aquifères semi-perméables

01AE01	Unité semi-perméable des complexes gneissiques et granitiques de Sacré-Coeur
01AE02	Unité semi-perméable des roches métasédimentaires de Sacré-Coeur
01AE04	Unité semi-perméable des intrusions felsique de Sacré-Coeur

Aquitards

01AE11	Unité imperméable indifférenciée de Sacré-Coeur
--------	---

Aquifères perméables

01AE21	Unité perméable des sédiments alluviaux de Sacré-Coeur
--------	--

01AF Domaine aquifère de Sacré-Coeur (Ouest)

Aquifères semi-perméables

01AF01	Unité semi-perméable des complexes gneissiques et granitiques de Sacré-Coeur
01AF02	Unité semi-perméable des roches métasédimentaires de Sacré-Coeur

Aquitards

01AF11	Unité imperméable indifférenciée de Sacré-Coeur
--------	---

Aquifères perméables

01AF21	Unité perméable des sédiments glaciomarins de Sacré-Coeur
--------	---

01AG Domaine aquifère de Tadoussac

Aquifères semi-perméables

01AG01	Unité semi-perméable des complexes gneissiques et granitiques de Tadoussac
01AG02	Unité semi-perméable des roches métasédimentaires de Tadoussac
01AG03	Unité semi-perméable des intrusions mafiques et ultramafiques de Tadoussac

Aquitards

01AG11	Unité imperméable indifférenciée de Tadoussac
--------	---

01AG Domaine aquifère de Tadoussac (suite)

Aquifères perméables

01AG21	Unité perméable des sédiments glaciomarins de Tadoussac
01AG22	Unité perméable de sédiments indifférenciés de Tadoussac

01AH Domaine aquifère des Bergeronnes

Aquifères semi-perméables

01AH01	Unité semi-perméable des complexes gneissiques et granitiques de Bergeronnes
01AH02	Unité semi-perméable des roches métasédimentaires de Bergeronnes
01AH03	Unité semi-perméable des intrusions mafiques et ultramafiques de Bergeronnes

Aquitards

01AH11	Unité imperméable indifférenciée de Bergeronnes
--------	---

Aquifères perméables

01AH21	Unité perméable des sédiments fluvioglaciaires de Bergeronnes
01AH22	Unité perméable des sédiments glaciomarins de Bergeronnes

01AI Domaine aquifère des Escoumins

Aquifères semi-perméables

01AI01	Unité semi-perméable des complexes gneissiques et granitiques des Escoumins
01AI02	Unité semi-perméable des roches métasédimentaires des Escoumins
01AI03	Unité semi-perméable des intrusions mafiques et ultramafiques des Escoumins
01AI04	Unité semi-perméable des Intrusions felsique des Escoumins

Aquitards

01AI11	Unité imperméable indifférenciée des Escoumins
--------	--

Aquifères perméables

01AI21	Unité perméable des sédiments fluvioglaciaires des Escoumins
01AI22	Unité perméable des sédiments glaciomarins des Escoumins
01AI23	Unité perméable indifférenciée des Escoumins

01AJ Domaine aquifère de Longue-Rive

Aquifères semi-perméables

01AJ01	Unité semi-perméable des complexes gneissiques et granitiques de Longue-Rive
01AJ02	Unité semi-perméable des roches métasédimentaires de Longue-Rive
01AJ03	Unité semi-perméable des intrusions mafiques et ultramafiques de Longue-Rive

Aquitards

01AJ11	Unité imperméable indifférenciée de Longue-Rive
--------	---

Aquifères perméables

01AJ21	Unité perméable des sédiments fluvioglaciaires de Longue-Rive
01AJ22	Unité perméable des sédiments glaciomarins de Longue-Rive
01AJ23	Unité perméable indifférenciée de Longue-Rive

01AK Domaine aquifère de Forestville (Sud)

Aquifères semi-perméables

01AK01	Unité semi-perméable des complexes gneissiques et granitiques Forestville (sud)
01AK02	Unité semi-perméable des roches métasédimentaires de Forestville (sud)

Aquitards

01AK11	Unité perméable indifférenciée de Forestville (sud)
--------	---

Aquifères perméables

01AK21	Unité perméable des sédiments fluvioglaciers de Forestville (sud)
01AK22	Unité perméable des sédiments glaciomarins de Forestville (sud)

01AL Domaine aquifère de Forestville (Nord)

Aquifères semi-perméables

01AL01	Unité semi-perméable des complexes gneissiques et granitiques de Forestville (nord)
01AL03	Unité semi-perméable des intrusions mafiques et ultramafiques de Forestville (nord)

Aquitards

01AL11	Unité perméable indifférenciée de Forestville (nord)
--------	--

Aquifères perméables

01AL21	Unité perméable des sédiments fluvioglaciers de Forestville (nord)
01AL22	Unité perméable des sédiments glaciomarins de Forestville (nord)

01AM Domaine aquifère de Colombier

Aquifères semi-perméables

01AM01	Unité semi-perméable des complexes gneissiques et granitiques de Colombier
01AM02	Unité semi-perméable des roches métasédimentaires de Colombier
01AM03	Unité semi-perméable des intrusions mafiques et ultramafiques de Colombier

Aquitards

01AM11	Unité imperméable indifférenciée de Colombier
--------	---

Aquifères perméables

01AM22	Unité perméable des sédiments glaciomarins de Colombier
--------	---

Fiche hydrogéologique de niveau 3

Les entités hydrogéologiques de niveau 3 sont caractérisées individuellement par les composantes Nature, État, Thème et Milieu. Chaque entité est décrite par une fiche (figure 6-25) composée de :

1. la toponymie et le code de l'entité considérée,
2. les composantes du référentiel de l'entité considérée,
3. une carte de l'entité de niveau 3 considérée.

Fiche hydrogéologique Niveau 3 (local)

Toponymie et code de de l'entité hydrogéologique

Composantes du référentiel caractéristiques de l'entité :
Nature
État
Thème (le thème est appliqué suivant le type de milieu majoritairement affleurant)
Milieu

Carte de l'entité de niveau 3 considérée → Affichage des ordre relatifs de des unités de base qui la compose	Symbologie	Lorsqu'il est défini, pourcentage surfacique de la (ou des 3) principale(s) unité de base composant l'unité de niveau 3 considérée. Par exemple: 40% Sédiments d'épandage proglaciaire subaérien 10% Sédiments juxtaglaciaires 15% Sédiments organiques non différenciés
	Carte de l'entité de niveau 2 de laquelle dépend l'entité de niveau 3 considérée → Étiquettes des Entités de niveau 2 limitrophes	

Figure 6-25 : Modèle de fiche hydrogéologique de niveau 3.

6.4 États des connaissances hydrogéologiques quantitatives

La caractérisation hydrogéologique quantitative s'effectue dans le cadre du projet PACES-CHCN en fonction des propriétés hydrauliques des milieux hydrogéologiques, de la chimie et des écoulements régionaux des eaux souterraines.

La présente partie du rapport propose donc :

- les propriétés hydrauliques des milieux hydrogéologiques;
- la caractérisation hydrogéochimique;
- la piézométrie et l'écoulement des eaux souterraines;
- les zones de recharge et de résurgence.

En l'état des connaissances, les caractéristiques hydrogéologiques ne peuvent être précisément associées à une entité hydrogéologique délimitée. De ce fait, elles sont uniquement réalisées sur la distinction entre les milieux hydrogéologiques perméables (dépôts meubles) et semi-perméables (roc cristallin et sédimentaire).

6.4.1 Propriétés hydrauliques des milieux aquifères du territoire CHCN

6.4.1.1 Sources des données disponibles

Dans le cadre du projet PACES-CHCN, les propriétés hydrauliques sont estimées à partir d'essais *in situ* et de méthodes empiriques. L'ensemble des données est intégré à la base de données spatiales PACES-CHCN et est issu des quatre sources décrites ici.

Interprétation des données du Système d'information hydrogéologique (SIH)

Une série de valeurs de propriété hydraulique a été calculée à partir de valeurs de capacité spécifique provenant principalement du Système d'information hydrogéologique (SIH) du MDDELCC.

Données d'essais de pompage (consultants)

Les propriétés hydrauliques provenant d'analyse d'essais de pompage effectués par des experts en hydrogéologie lors d'études hydrogéologiques. Ces données n'ont pas été analysées par l'équipe PACES-CHCN, elles ont été numérisées à partir des rapports et directement intégrées à la base de données spatiales.

Interprétation des données d'analyses granulométriques

Les valeurs de propriétés hydrauliques obtenues par méthodes empiriques à partir d'analyses granulométriques (Foulon, 2014) ont servi à réaliser une analyse comparative des valeurs de conductivité hydraulique obtenues par différentes méthodes.

Données d'essais de pompage (Campagne d'hydrogéochimie, PACES-CHCN 2013-2014)

Les valeurs de propriétés hydrauliques provenant de l'analyse d'essais de pompage et de remontée résultent de pompages effectués dans le cadre du projet PACES-CHCN au cours de la campagne de prélèvement d'échantillons d'eau souterraine pour l'analyse de la qualité.

6.4.1.2 Sélection et traitement des données

Au total, 1592 valeurs de propriétés hydrauliques associées à 627 puits sont présentes dans la base de données à références spatiales, dont :

- 288 valeurs de conductivité hydraulique ;
- 745 valeurs de transmissivité ;
- 559 valeurs d'emménagement.

Données écartées

Certaines données ont été jugées non représentatives, notamment les données obtenues suite à l'analyse d'essais de pompage simultanés, d'essais de pompage suivant la réhabilitation d'un puits et suivant le développement ou le redéveloppement d'un puits. Les deux derniers cas donnent de l'information sur la capacité spécifique qui caractérise davantage l'efficacité de l'ouvrage de captage que le milieu hydrogéologique. De plus, les données pour lesquelles il n'y a pas d'information sur le type de milieu hydrogéologique capté (perméable ou semi-perméable) ont également été retirées.

Simplification des données

Aussi, pour nombre de puits d'observation, la base de données spatiales contient plus d'une valeur par propriété hydraulique. Afin d'associer une seule valeur par paramètre pour un puits donné ; et sachant que ces valeurs possèdent le même ordre de grandeur ; la moyenne arithmétique de chaque paramètre a été estimée.

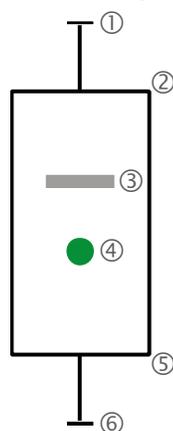
Le nombre total de valeurs de propriétés hydrauliques après traitement est donc de 1231 valeurs associées à 627 puits. Le nombre de valeurs de propriétés hydrauliques estimées, par paramètre, type de milieu et source de donnée, est présenté au tableau 6-4.

Tableau 6-4 : Répartition des valeurs de propriétés hydrauliques, par paramètre, type de milieu et source de donnée

<i>Propriétés hydrauliques</i>	<i>Milieux semi-perméables</i>	<i>Milieux perméables</i>	<i>Total</i>
<i>Interprétation des données du Système d'information hydrogéologique (SIH)</i>			
Emmagasinement	448	53	501
Transmissivité (m ² /s)	448	53	501
Conductivité hydraulique (m/s)	90	2	92
<i>Données d'essais de pompage (Consultants)</i>			
Emmagasinement	12	7	19
Transmissivité (m ² /s)	20	16	36
Conductivité hydraulique (m/s)	15	11	26
<i>Interprétation des données d'analyses granulométriques</i>			
Emmagasinement	0	0	0
Transmissivité (m ² /s)	0	0	0
Conductivité hydraulique (m/s)	0	16	16
<i>Données d'essais de pompage (Campagne d'hydrogéochimie, PACES-CHCN 2013-2014)</i>			
Emmagasinement	0	0	0
Transmissivité (m ² /s)	32	8	40
Conductivité hydraulique (m/s)	0	0	0

Traitement statistique

Pour chacun des types de milieu hydrogéologique, soit perméable et semi-perméable, les valeurs disponibles des propriétés hydrauliques (transmissivité, conductivité hydraulique et emmagasinement) sont présentées sous la forme de figure en « boîte à moustaches » illustrant les valeurs statistiques suivantes :



- ① maximum (max) : valeur la plus élevée observée sur l'ensemble des données sélectionnées;
- ② troisième quartile (Q3) : 75% des données sélectionnées sont inférieures à cette valeur ;
- ③ médiane (médiane) : 50% des données sélectionnées sont inférieures à cette valeur ;
- ④ moyenne géométrique : les propriétés hydrauliques présentent communément une distribution statistique log-normale, dans ce cas, la moyenne géométrique s'applique ;
- ⑤ premier quartile (Q1) : 25% des données sélectionnées sont inférieures à cette valeur;
- ⑥ minimum (min) : valeur la plus faible observée sur l'ensemble des données sélectionnées.

Représentation des données

Lors de la phase II du projet PACES-CHCN, la numérisation des données associe les valeurs de propriétés hydrauliques à un ouvrage (puits ou piézomètre). Lorsque disponible, une évaluation du schéma de l'ouvrage (position de la crépine ou zone de captage de l'ouvrage) et de son log stratigraphique a permis dans de nombreux cas d'associer précisément un type de milieu capté (perméable ou semi-perméable) à la propriété hydraulique mesurée.

Toutefois, tous les points de mesures ne possèdent pas de données précises sur l'ouvrage de mesure. Dans ce cas, une interprétation a été réalisée pour estimer, selon la profondeur de l'ouvrage, le milieu potentiellement capté auquel s'associent les valeurs de propriétés hydrauliques.

De ce fait, les valeurs extrêmes (minimum et maximum) compilées pour une propriété peuvent représenter la précision des interprétations et non la valeur du paramètre considéré. Régionalement, il est donc conseillé d'analyser en priorité les valeurs moyennes et médianes de chaque paramètre.

Pour les mêmes raisons, la caractérisation hydrogéologique quantitative des paramètres hydrauliques des eaux souterraines ne présente pas d'analyses ou d'interprétations spatiales des points de données mais un portrait statistique des valeurs moyennées pour un environnement donné. Néanmoins, les récents travaux de Foulon (2014) ont précisé qu'aucune relation n'est clairement établie entre les facteurs géologiques et le contrôle des propriétés hydrauliques.

Ces caractéristiques sont ainsi appliquées aux milieux hydrogéologiques perméables et semi-perméables tels que définis à la section 6.1.1.5.

6.4.1.3 Propriétés hydrauliques des milieux hydrogéologiques perméables

Les milieux hydrogéologiques perméables regroupent l'intégralité des dépôts meubles à granulométrie moyenne à grossière tels que les sables et graviers. La figure 6-26 illustre le traitement statistique effectué sur les valeurs obtenues des propriétés hydrauliques et leur localisation.

Régionalement, peu de valeurs sont disponibles sur les propriétés hydrauliques pour l'ensemble des milieux hydrogéologiques perméables ; les valeurs disponibles sont concentrées dans la MRC de Charlevoix.

Conductivité hydraulique

Tel que défini plus haut, la conductivité hydraulique se rapproche de la perméabilité, de ce fait, plus la conductivité d'un milieu est élevée plus l'extraction de l'eau souterraine est facilitée.

- Régionalement, les valeurs de conductivité hydraulique mesurées dans les ouvrages vont de 10^{-7} à 10^{-2} m/s. Cette large gamme de valeurs est représentative allant de milieux constitués de sables fins jusqu'à des milieux constitués de graviers fins à grossiers.
- Les valeurs médianes et moyennes indiquent une conductivité hydraulique de l'ordre de 10^{-4} m/s représentative de milieux constitués de sables fins à grossiers.
- La valeur minimale observée, très éloignée du Q1, peut être considérée comme une valeur extrême, peu représentative du milieu.

Régionalement, les dépôts perméables du territoire de CHCN présentent une conductivité hydraulique d'intérêt pour l'exploitation de l'eau souterraine. Des études locales (forages, essais de pompage) sont toutefois nécessaires pour préciser les capacités locales d'exploitation.

Transmissivité

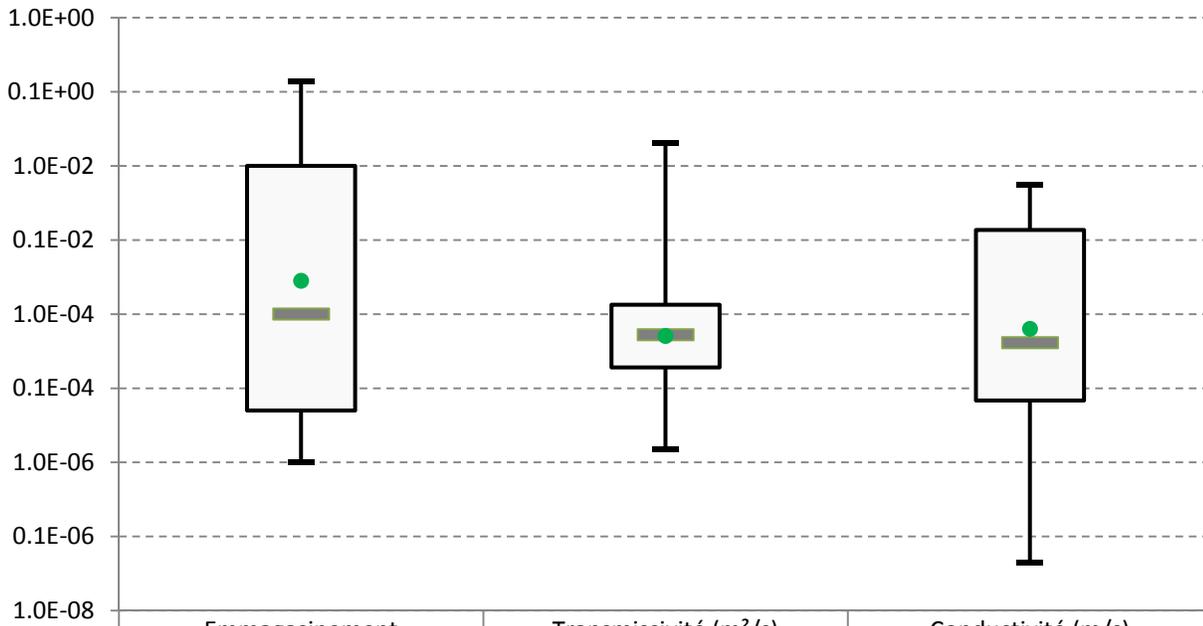
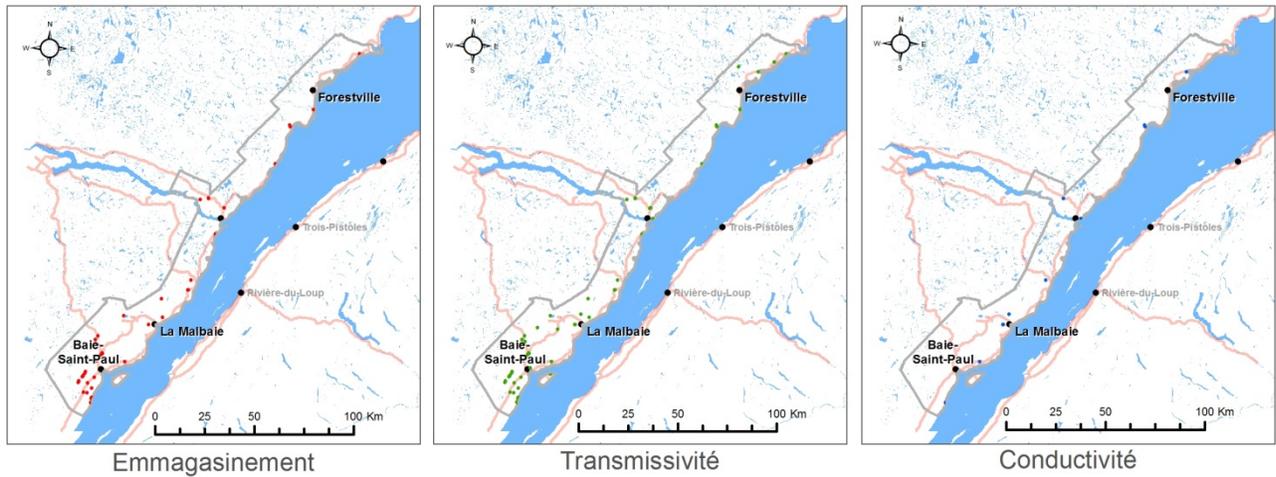
Tel que défini, la transmissivité permet d'évaluer indirectement la capacité d'extraction de l'eau souterraine qui varie en fonction de la position géographique du point de mesure. La présente étude statistique ne fait pas état de la répartition spatiale des valeurs de transmissivité. Toutefois, les valeurs présentées sont similaires ou approximativement d'un ordre de grandeur supérieur aux valeurs de conductivité hydraulique.

- La valeur maximale observée, très éloignée du Q3, peut être considérée comme une valeur extrême, peu représentative du milieu hydrogéologique perméable.
- Sachant que par définition la transmissivité (T) est le produit de la conductivité hydraulique (K) par l'épaisseur saturée d'un milieu perméable (e) : $T = K * e$, la comparaison des ordres de grandeur de ces deux paramètres permet de démontrer que régionalement les épaisseurs saturées estimées des milieux perméables sont de l'ordre de 1 à 10 m.

Emmagasinement

Tel que défini, le coefficient d'emmagasinement est utilisé pour caractériser plus précisément le volume d'eau extractible par unité de volume du matériel considéré.

Régionalement, l'emmagasinement moyen estimé pour les milieux perméables est de l'ordre de 10^{-4} ce qui représente une capacité moyenne d'exploitation des milieux hydrogéologiques perméables de l'ordre de **0,1 litre d'eau par mètre cube de sol saturé**. Ce coefficient d'emmagasinement peut paraître faible, mais il est en réalité caractéristique de la moyenne des emmagasineurs mesurés en nappes libre et captive.



	Emmagasinement (60 valeurs)	Transmissivité (m ² /s) (77 valeurs)	Conductivité (m/s) (29 valeurs)
Q1	5.0E-06	0.2E-04	6.8E-06
— Min	1.0E-06	1.5E-06	4.4E-08
— Méd	1.0E-04	0.5E-04	0.4E-04
— Max	0.1E+00	2.0E-02	0.5E-02
● Moy	2.8E-04	0.5E-04	0.6E-04
Q3	1.0E-02	1.3E-04	0.1E-02

Figure 6-26 : Statistiques et localisations du coefficient d'emmagasinement, de la transmissivité et de la conductivité hydraulique des milieux perméables.

6.4.1.4 Propriétés hydrauliques des milieux hydrogéologiques semi-perméables

Les milieux hydrogéologiques semi-perméables regroupent les milieux rocheux cristallin et sédimentaire (calcaires). La figure 6-27 illustre le traitement statistique effectué sur les valeurs obtenues des propriétés hydrauliques et leur localisation.

Régionalement, les valeurs disponibles pour les propriétés hydrauliques des milieux hydrogéologiques semi-perméables sont concentrées dans les MRC de Charlevoix et de Charlevoix-Est.

Conductivité hydraulique

- Régionalement, les valeurs de conductivité hydraulique mesurées dans les ouvrages vont de 10^{-9} à 10^{-4} m/s. Cette large gamme de valeurs est représentative de milieux semi-perméables de roches cristallines et sédimentaires fracturées.
- Les valeurs médianes et moyennes indiquent une conductivité hydraulique de l'ordre de 10^{-6} m/s représentative du caractère semi-perméable des milieux rocheux fracturés.
- Les valeurs minimale et maximale observées, très éloignées du Q1 et du Q3, peuvent être considérées comme des valeurs extrêmes, peu représentatives du milieu.

Régionalement, les milieux hydrogéologiques semi-perméables du territoire de CHCN présentent une conductivité hydraulique moyenne mais d'intérêt pour l'exploitation de l'eau souterraine. Des études locales (forages, essai de pompages) sont toutefois nécessaires pour préciser les capacités locales d'exploitations.

Transmissivité

Les valeurs de transmissivité présentées sont d'un à deux ordres de grandeur supérieurs aux valeurs de conductivité hydraulique avec une variation totale de 10^{-8} à 10^{-2} m²/s. Cette large gamme est caractéristique de milieux moyennement transmissifs.

- Les valeurs minimale et maximale observées, très éloignées du Q1 et du Q3, peuvent être considérées comme des valeurs extrêmes, peu représentatives du milieu.
- La comparaison des ordres de grandeur de la transmissivité (T) et de la conductivité hydraulique (K) permet de démontrer que régionalement les épaisseurs saturées estimées des milieux hydrogéologiques semi-perméables sont de l'ordre de 10 à 100 m.

Emmagasinement

Régionalement, l'emmagasinement moyen estimé pour les milieux hydrogéologiques semi-perméables est de l'ordre de 10^{-3} ce qui représente une capacité moyenne d'exploitation des milieux semi-perméable de l'ordre de **1 litre d'eau par mètre cube de sol saturé.**

Toutefois, les récents travaux de Foulon (2014) ont précisé qu'aucune relation n'est clairement établie entre les facteurs géologiques et le contrôle des propriétés hydrauliques.

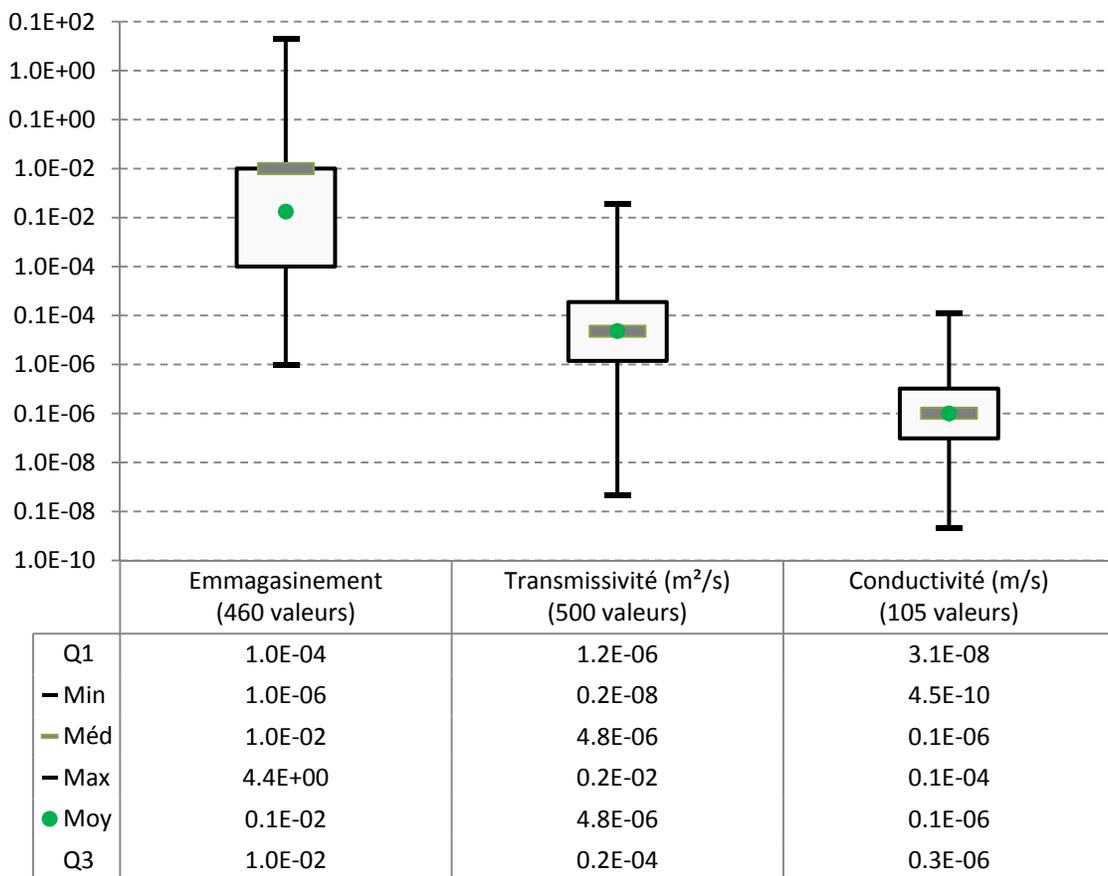
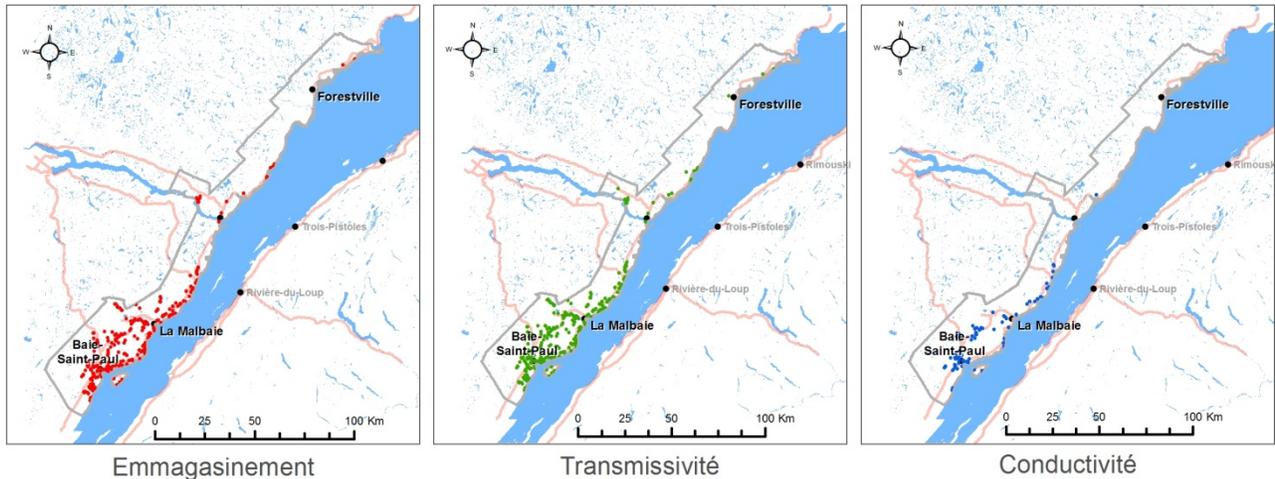


Figure 6-27 : Statistiques et localisations du coefficient d'emmagasinement, de la transmissivité et de la conductivité hydraulique des milieux semi-perméables.

6.4.1.5 Amélioration de l'estimation des propriétés hydrauliques

L'interprétation des essais de pompage est une méthode extrêmement utilisée par les praticiens de l'hydrogéologie, car elle permet de stimuler directement la ressource en eau souterraine et d'en déduire des informations sur les propriétés hydrauliques de l'aquifère. Cette technique permet en effet de suivre l'évolution temporelle du rabattement s , soit la baisse du niveau d'eau dans le puits de pompage.

Jusqu'à présent, l'interprétation des données de rabattement s'est majoritairement réalisée avec le modèle de Theis (1935) en supposant que les écoulements sont radiaux autour du puits de pompage dans un aquifère à nappe captive, horizontal, isotrope et d'étendue infinie. Cette forte idéalisation des écoulements ne permet donc pas de considérer la réelle complexité des écoulements observés dans la nature. Il en découle de fortes approximations sur l'estimation des propriétés hydrauliques.

Les travaux de doctorat, en cours de réalisation, de Madame Anouck Ferroud ont pour objectif de mieux comprendre les configurations d'écoulement à proximité des puits de captage afin d'améliorer l'estimation des propriétés hydrauliques. Ces travaux se basent sur de nouveaux outils interprétatifs, tels que la dérivée logarithmique du rabattement $ds/dlogt$ (Bourdet et al., 1989) qui permettent de rendre le signal du rabattement beaucoup plus sensible aux conditions géologiques et hydrauliques de l'aquifère. À partir de données d'essais de pompage réalisés dans des puits municipaux localisés notamment sur le territoire de CHCN, elle met en avant la complexité des écoulements au sein des aquifères fracturés et fluvio-glaciaires du territoire d'étude et la nécessité d'améliorer les outils d'analyses afin de mieux adapter la gestion de la ressource en eau souterraine.

6.4.2 Caractérisation hydrogéochimique

L'eau souterraine se caractérise par une multitude de paramètres bactériologiques, physiques et chimiques. Dans le cadre du projet PACES-CHCN, ce sont principalement les caractéristiques chimiques de l'eau souterraine qui ont été caractérisées (chapitre 2). Cette caractérisation permet de mettre en évidence la signature hydrogéochimique de chaque échantillon résultant des échanges entre l'eau et les différents milieux composés de différentes minéralogies à travers lesquels l'eau a circulé.

Cette section présente la localisation des stations utilisées pour prélever les échantillons d'eau souterraine, les résultats hydrogéochimiques par paramètres, la caractérisation hydrogéochimique pour les éléments majeurs et les types d'eau obtenus selon deux méthodes.

6.4.2.1 Données hydrogéochimiques

Campagne d'échantillonnage

La base de données spatiales contient 136 stations pour lesquelles des analyses bactériologiques, physiques ou chimiques caractérisent l'eau souterraine. Ces données proviennent majoritairement de rapports de consultants; elles ont été collectées entre 1973 et 2012 suivant différents protocoles d'échantillonnage et d'analyse. La chimie de l'eau est variable dans le temps et la méthode de prélèvement des échantillons a une influence sur le résultat analytique.

La caractérisation doit permettre une comparaison des différents échantillons d'eau souterraine, ce qui requiert d'analyser les mêmes paramètres d'un échantillon à l'autre. Pour ces raisons, suivant les recommandations du GRIES, l'équipe PACES-CHCN a préféré ne pas intégrer les analyses disponibles dans les rapports de consultants et faire son propre échantillonnage afin de s'assurer que le protocole d'échantillonnage (annexe numérique AN5) suivi est le même pour tous les échantillons.

Tel que décrit au chapitre 2, deux campagnes d'échantillonnage se sont déroulées au cours des étés 2013 et 2014. L'ensemble des échantillons a été prélevé dans des puits individuels domestiques ou des résurgences utilisées pour fins d'alimentation en eau potable ou pour l'entretien extérieur (arrosage de jardins, lavage de véhicule, etc.). Au total, 114 stations d'échantillonnage ont été visitées (dont 88 en 2013 et 28 en 2014) et un échantillon a été prélevé à chaque station (figure 2-10). Également, 19 stations échantillonnées en 2013 ont été ré-échantillonnées en 2014, ce qui élève le nombre d'échantillons total à 133.

Lors du prélèvement des échantillons, des paramètres ont été mesurés *in situ* et d'autres ont été analysés en laboratoire (chapitre 2).

Sélection des stations d'échantillonnage

Pour dresser un portrait régional hydrogéochimique, il est requis que les stations soient réparties le plus uniformément possible sur le territoire (figure 2-10) et que l'eau souterraine provenant des aquifères perméables (granulaires) et semi-perméables (roc fracturé) soit échantillonnée le plus également possible.

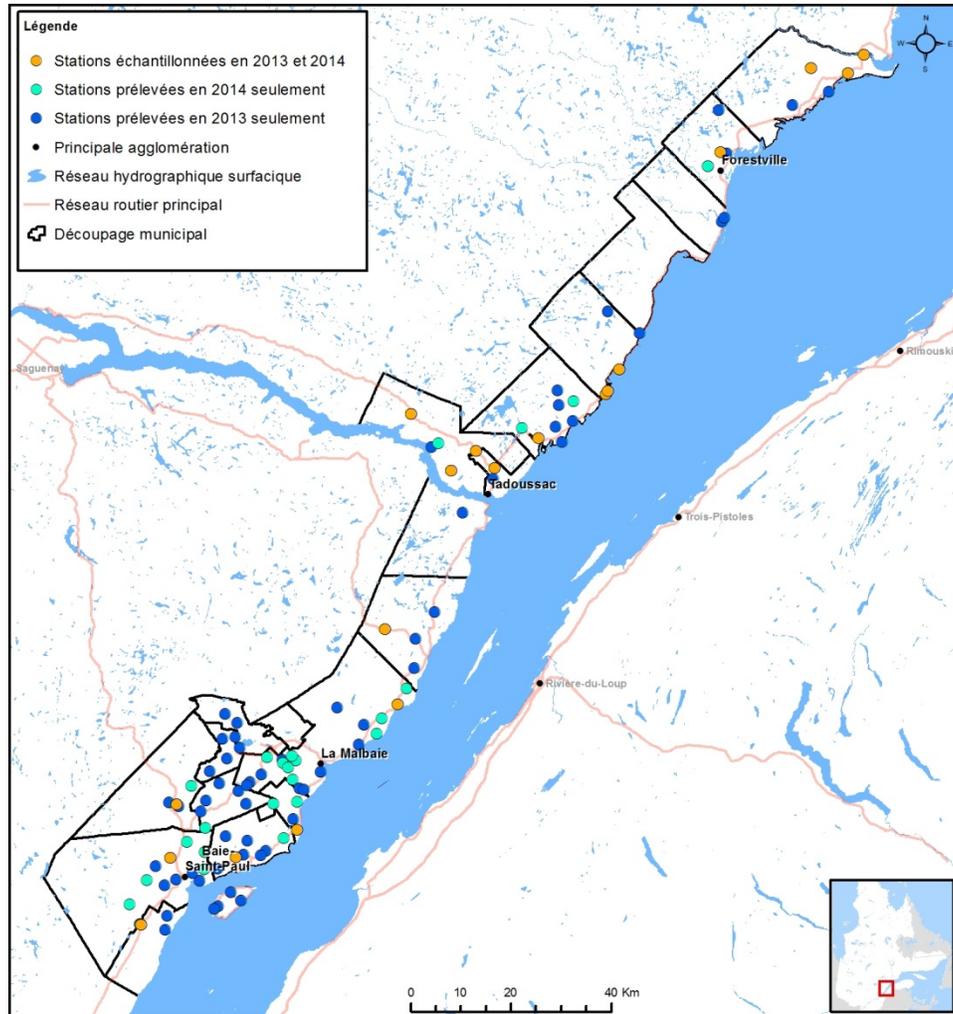


Figure 6-28 : Localisation des stations d'échantillonnage hydrogéochimique.

Biais d'échantillonnage

Bien qu'un effort considérable ait été fait pour que la distribution des stations d'échantillonnage soit régulière, la collaboration des propriétaires des puits individuels et l'accessibilité sur le territoire de ces puits ont été déterminantes pour assurer le succès de cette campagne d'échantillonnage. D'une part, les propriétaires des puits ont majoritairement été très réceptifs à collaborer au projet PACES-CHCN. D'autres part, les puits ciblés servent à l'alimentation en eau potable pour un usage domestique, ainsi ils sont construits en grande majorité dans les secteurs habités du territoire de CHCN. La population étant concentrée à proximité des centres urbains de chaque municipalité, il y a des secteurs où, sur plusieurs km², aucun puits n'a été recensé par l'équipe PACES. Ainsi, tel qu'illustré à la figure 2-10, la distribution des stations d'échantillonnage est plutôt aléatoire mais permet tout de même de dresser un portrait régional.

En plus de l'accessibilité des puits, un biais d'échantillonnage important consiste à sélectionner des puits domestiques servant majoritairement à l'alimentation en eau potable. Ces puits présentent, le plus souvent, une bonne qualité ou nécessitent un traitement à un coût raisonnable. Dans le cas contraire, aux endroits où la qualité de l'eau ne respecte pas les normes de potabilité ou pour laquelle les coûts reliés à un système de traitement sont trop onéreux, les puits sont colmatés et non disponibles à l'échantillonnage.

Contrôle de la qualité des données

Un total de 133 échantillons ont été analysés auxquels s'ajoutent 13 duplicatas. Les duplicatas sont utilisés pour contrôler la méthode de prélèvement et la qualité des résultats d'analyse du laboratoire. L'analyse des duplicatas montre que pour chaque échantillon, la majorité des paramètres présente une erreur relative inférieure à 10%, ce qui représente une erreur acceptable. Les méthodes de prélèvement des échantillons et d'analyse en laboratoire sont alors considérées.

Une autre méthode de contrôle de la qualité des échantillons et des analyses consiste à vérifier la balance ionique des échantillons. Cette méthode revient à vérifier que la somme calculée des anions égale plus ou moins 10% de la somme des cations. Dans ce projet, l'étude de la balance ionique des échantillons conduit à rejeter sept échantillons : CHCN-002-2013, CHCN-031-2013, CHCN-041-2013, CHCN-074-2013, CHCN-086-2013, CHCN-107-2014 et CHCN-119-2014. Les résultats analytiques des 126 échantillons restants sont présentés ci-dessous.

6.4.2.2 Caractérisation hydrogéochimique par paramètres analysés et mesurés

Le tableau 6-5 montre les résultats pour les paramètres mesurés *in situ* et analysés en laboratoire. Pour chaque paramètre sont présentés :

- la valeur de la limite de détection (L.D.);
- le nombre d'échantillon pour lequel ce paramètre est détecté (Nombre de détection);
- la valeur minimale (Min.);
- la valeur du premier quartile pour laquelle 25% des valeurs mesurées sont inférieures (25%);
- la valeur médiane pour laquelle 50% des valeurs mesurées sont inférieures (Méd.);
- la valeur du troisième quartile pour laquelle 75% des valeurs mesurées sont inférieures (75%);
- la valeur maximale (Max.).

Le tableau 1-2 présente les paramètres en fonction du nombre décroissant de détection. Ainsi, les premiers paramètres du tableau correspondent majoritairement aux éléments majeurs ainsi qu'aux paramètres mesurés *in situ*. Les derniers paramètres du tableau correspondent majoritairement aux métaux mineurs et sont rarement détectés. Parmi les 126 échantillons, 124 ont des valeurs pour les paramètres mesurés *in situ*. Les données manquantes sont dues à des problèmes survenus lors du prélèvement des échantillons. Pour plusieurs paramètres les valeurs minimale et maximale analysées montrent un intervalle s'étalant sur 2 à 4 ordres de grandeur. Ceci démontre que la qualité de l'eau souterraine est très variable sur le territoire d'étude.

Tableau 6-5 : Résultats statistiques par paramètres.

Paramètres	L.D. (mg/L)	Nombre de détections	Min.	25%	Méd.	75%	Max.
Alcalinité totale (en CaCO ₃)	1	126	3,0	31,3	53,5	89,3	520,0
pH 4_5							
Ca (mg/L)	0,1	126	0,40	7,50	16,00	22,00	110,00
Cl (mg/L)	0,05	126	0,300	1,100	3,850	19,000	580,000
Mg (mg/L)	0,01	126	0,100	1,300	2,200	3,550	25,000
Na (mg/L)	0,1	126	1,00	3,43	5,80	17,50	620,00
Si_d (mg/L)	0,1	126	0,22	4,90	5,90	7,28	16,00
Sr (mg/L)	0,002	126	0,0079	0,0540	0,0995	0,1975	2,6000
K (mg/L)	0,1	125	0,16	0,55	1,10	2,20	14,00
Conductivité (uS/cm)		124	0	81	136	256	2959
Eh (mV)		124	-353,10	-80,60	-3,15	58,65	736,40
pH		124	5,41	6,55	7,13	8,11	9,61
Température (°C)		124	4,9	6,7	7,5	8,4	19,5
Oxygène dissous (mg/l)		111	0,000	0,465	3,640	6,985	39,700
Ba (mg/l)	0,002	109	0,0000	0,0000	0,0054	0,0160	0,4300
Cu (mg/l)	0,0005	99	0,00054	0,00160	0,00430	0,01500	0,12000
Mn (mg/l)	0,0004	98	0,00051	0,00150	0,00650	0,04050	2,20000
Pb (mg/l)	0,0001	98	0,00010	0,00017	0,00025	0,00045	0,00300
SO ₄ (mg/l)	0,5	92	1,20	5,00	7,50	11,25	150,00
Dureté_estimée	1	91	1	43	55	88	369
MDT_estimée		91	36	101	131	329	2009
F (mg/l)	0,1	77	0,10	0,20	0,30	0,70	4,50
NH ₄ (mg N/l)	0,02	77	0,020	0,040	0,050	0,110	1,000
Zn (mg/l)	0,005	71	0,0051	0,0071	0,0092	0,0125	0,1100
NO ₂ -NO ₃ (mg N/l)	0,1	54	0,03	0,20	0,40	0,97	4,80
Mo (mg/l)	0,0005	53	0,00054	0,00120	0,00240	0,00480	0,01800
Al (mg/l)	0,001	41	0,0100	0,0170	0,0460	0,0720	0,7300
B (mg/l)	0,005	41	0,0200	0,0260	0,0560	0,1900	1,2000
Co (mg/l)	0,0005	32	0,00055	0,00076	0,00130	0,00170	0,00290
Cr (mg/l)	0,0005	32	0,00054	0,00065	0,00090	0,00110	0,00200
Phosphore inorg. (mg/l)	0,03	31	0,030	0,040	0,080	0,290	4,400
Fe (mg/l)	0,1	27	0,12	0,19	0,73	1,40	25,00
U (mg/l)	0,001	24	0,0010	0,0020	0,0047	0,0178	0,0220

Paramètres	L.D. (mg/L)	Nombre de détectations	Min.	25%	Méd.	75%	Max.
Se (mg/l)	0,001	13	0,0016	0,0017	0,0019	0,0020	0,0026
Ag (mg/l)	0,0001	10	0,00011	0,00012	0,00018	0,00029	0,00140
Ni (mg/l)	0,001	9	0,0010	0,0012	0,0014	0,0015	0,0032
V (mg/l)	0,002	6	0,0020	0,0028	0,0031	0,0034	0,0056
Li (mg/l)	0,01	5	0,012	0,014	0,015	0,018	0,019
As (mg/l)	0,001	3	0,0013	0,0013	0,0014	0,0015	0,0016
Br (mg/l)	0,1	2	1,700	1,775	1,850	1,925	2,000
Ti (mg/l)	0,001	2	0,0140	0,0188	0,0235	0,0282	0,0330
Cd (mg/l)	0,0002	1	0,00025	0,00025	0,00025	0,00025	0,00025
Sn (mg/l)	0,001	1	0,0066	0,0066	0,0066	0,0066	0,0066
Sulfures (mg S/l)	0,02	1	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
Be (mg/l)	0,0005	0					
Bi (mg/l)	0,00025	0					
Sb (mg/l)	0,001	0					

Chacun des paramètres suivants est représenté sur une carte du territoire de CHCN en fonction de ses concentrations : alcalinité totale, calcium, chlorures, magnésium, potassium, sodium et sulfates. Chaque paramètre correspond à un élément majeur et la carte montre si l'échantillon provient d'aquifères en milieu poreux (55 échantillons) et d'aquifères en milieu fracturé (70 échantillons). Les concentrations sont classées par quartile tel qu'indiqué sur le tableau 6-5. Les données de l'échantillon CHCN-092-2014 sont intégrées au tableau 6-5 mais ne sont pas représentées sur les cartes des figures (figure 6-29 et figure 6-30) parce que le type d'aquifère est inconnu.

Calcium

Les 126 échantillons ont une concentration en calcium supérieure à la limite de détection. Les concentrations en calcium des échantillons provenant d'aquifères en milieu poreux présentent majoritairement des valeurs inférieures à 7,5 mg/L (premier quartile, tableau 6-5). Seulement 4 échantillons présentent des concentrations supérieures à 22,0 mg/L (troisième quartile, tableau 6-5). Deux de ces échantillons se localisent dans le secteur de l'astroblème de Charlevoix et les deux autres dans les municipalités de Tadoussac et des Bergeronnes (figure 6-29a). Les concentrations en calcium des échantillons provenant d'aquifères en milieu fracturé présentent des valeurs qui sont généralement supérieures à 16,0 mg/L (deuxième quartile, figure 6-29a).

Alcalinité totale (CaCO₃)

Les 126 échantillons ont une concentration en calcium supérieure à la limite de détection. Les concentrations en CaCO₃ des échantillons provenant d'aquifères en milieu poreux présentent majoritairement des valeurs inférieures à 53,5 mg/L (deuxième quartile, tableau 6-5 et figure 6-29b). Tandis que les concentrations en calcium des échantillons provenant d'aquifères en milieu fracturé présentent majoritairement des valeurs supérieures à 53,5 mg/L (deuxième quartile, tableau 6-5), ce qui correspond à 47 échantillons répartis sur l'ensemble du territoire CHCN (figure 6-29b).

Sulfates (SO₄)

Des 126 échantillons, 92 ont une concentration en sulfates supérieure à la limite de détection (tableau 6-5) dont 27 proviennent d'aquifères en milieu poreux, 64 d'aquifères en milieu fracturé et 1 dont le milieu aquifère est inconnu (figure 6-29c).

Magnésium

Les 126 échantillons ont une concentration en magnésium supérieure à la limite de détection (tableau 6-5). Les concentrations en magnésium semblent réparties quasi-uniformément entre les échantillons provenant d'aquifères en milieu poreux et ceux provenant d'aquifères en milieu fracturé (figure 6-30a).

Potassium

Des 126 échantillons, 125 ont une concentration en potassium supérieure à la limite de détection (tableau 6-5), dont 55 provenant d'aquifères en milieu poreux et 69 d'aquifères en milieu fracturé. De façon générale, les échantillons prélevés sur le secteur de la Haute-Côte-Nord présentent des concentrations en potassium plus élevées que ceux du secteur de Charlevoix (figure 6-30b).

Chlorures

Les 126 échantillons ont une concentration en chlorures supérieure à la limite de détection (tableau 6-5). Sur le territoire de Charlevoix, les échantillons présentant les plus fortes concentrations se situent à proximité de la côte du fleuve Saint-Laurent (figure 6-30c). Sur la Haute-Côte-Nord, les concentrations en chlorures sont généralement supérieures à 3,85 mg/L (deuxième quartile, tableau 6-5).

Sodium

Les 126 échantillons ont une concentration en sodium supérieure à la limite de détection (tableau 6-5). Sur le territoire de Charlevoix, les échantillons présentant les plus fortes concentrations se situent à proximité de la côte du fleuve Saint-Laurent (figure 6-30d). Sur la Haute-Côte-Nord, les concentrations en chlorures sont généralement supérieures à 5,80 mg/L (deuxième quartile, tableau 6-5).

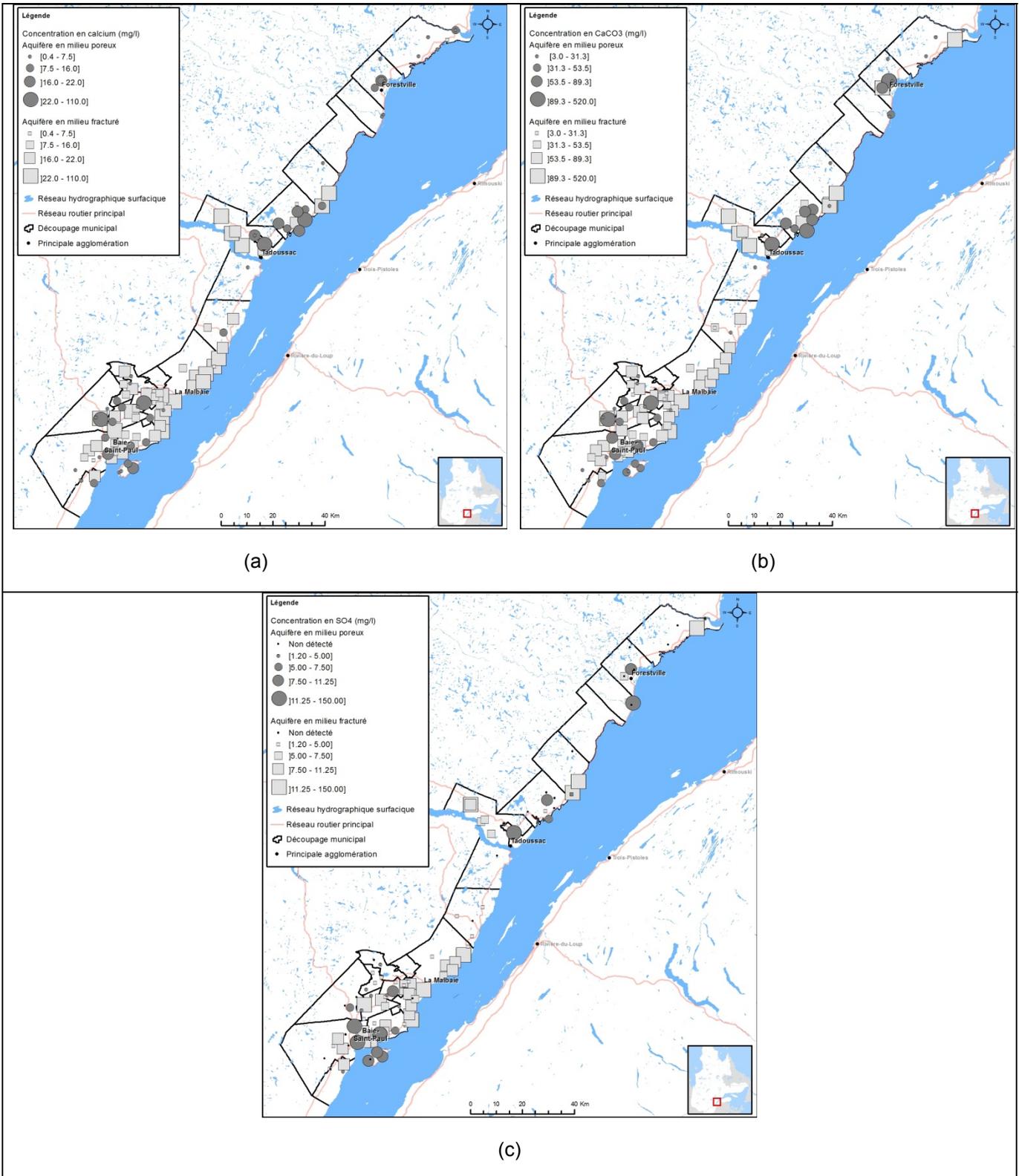


Figure 6-29 : Concentration en calcium (a), de l'alcalinité totale (b) et des sulfates (c) pour l'eau souterraine provenant d'aquifères granulaire et en milieu fracturé.

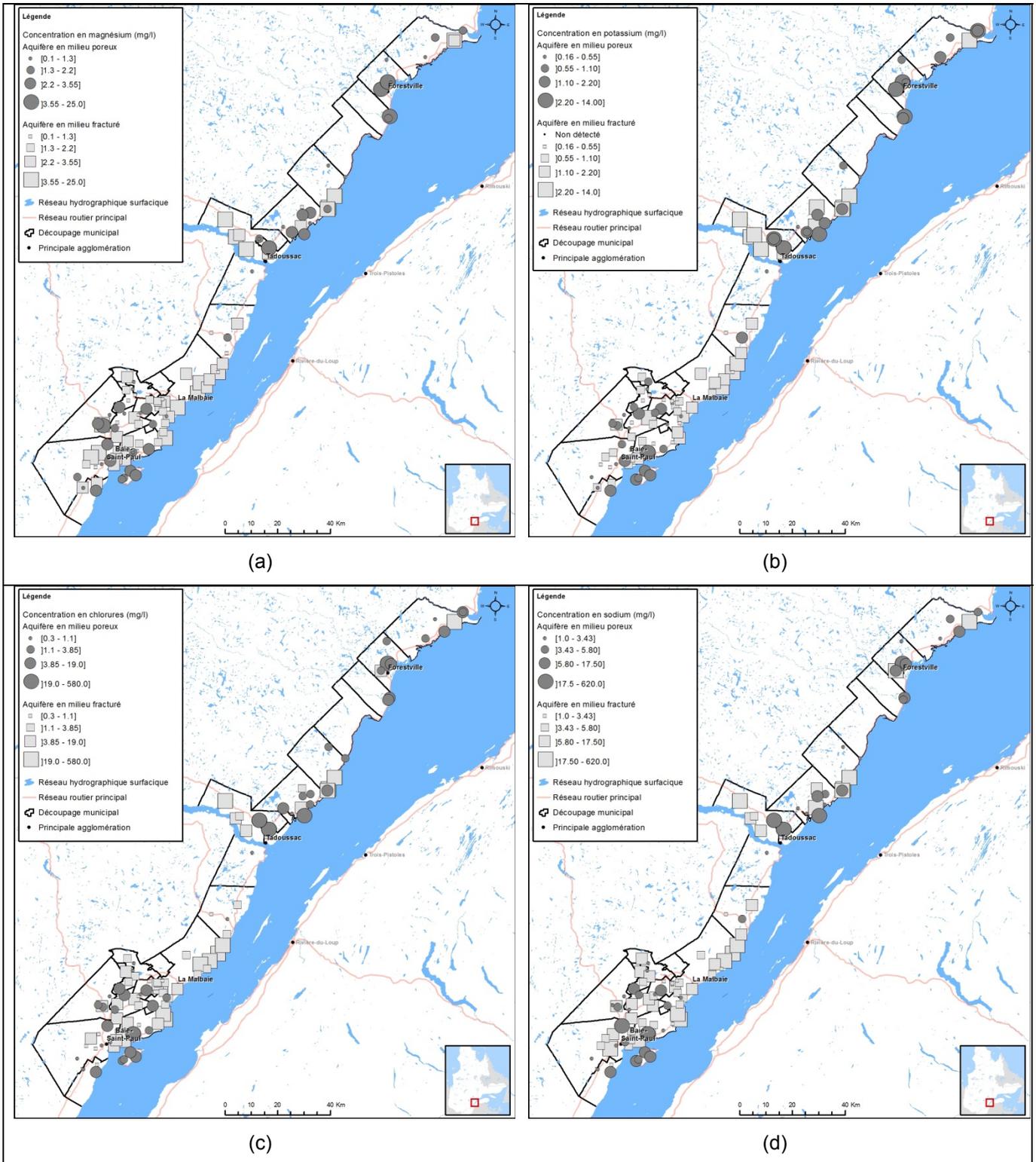


Figure 6-30 : Concentration en magnésium (a), en potassium (b), en chlorures (c) et en sodium (d) pour l'eau souterraine provenant d'aquifères granulaire et en milieu fracturé.

6.4.2.3 Caractérisation hydrogéochimique par types d'eau

La signature hydrogéochimique de l'eau souterraine traduit l'évolution de l'eau souterraine influencée par la composition des eaux de recharge et les échanges ioniques entre le milieu aquifère et l'eau souterraine. Différentes méthodes permettent de différencier ces types d'eau; par exemple, des représentations en diagrammes tel celui de Durov (Durov, 1948) et des méthodes d'analyses statistiques telle que l'analyse factorielle.

Selon le diagramme de Durov

Dans le cadre du projet PACES-CHCN, des travaux de recherche portant sur le volet hydrogéochimique sont en cours de réalisation à l'UQAC par Madame Ombeline Ghesquière dans le cadre d'un projet de maîtrise intitulé « Caractérisation de la géochimie des eaux souterraines et des facteurs la contrôlant dans les régions de Charlevoix et de la Haute-Côte-Nord ». Cette section présente les types d'eau identifiés par le graphique de Durov et les groupes d'eau résultant d'une analyse factorielle (Ghesquière et al., 2015).

Pour ces analyses, 105 échantillons ont été retenus sur le territoire de CHCN dont 62 proviennent d'aquifères en milieu fracturé et 43 d'aquifères en milieu poreux. Ces échantillons sont placés sur le diagramme de Durov (Durov, 1948) qui permet de distinguer deux types d'eau, soit le type bicarbonaté (Na-Ca)-HCO₃ qui s'apparente aux eaux douces de recharge, et le type chloruré (Na-Ca)-Cl qui s'apparente aux eaux salines (figure 6-31). La majorité des échantillons de CHCN, soit 89%, correspondent à des eaux de type bicarbonaté tel qu'indiqué au tableau 6-6.

Tableau 6-6 : Nombre d'échantillons par type d'eau provenant d'aquifères en milieu poreux ou en milieu fracturé.

Type d'aquifère	Type (Na-Ca)-HCO ₃	Type (Na-Ca)-Cl
Granulaire	37	6
Roc fracturé	56	6
Total	93	12

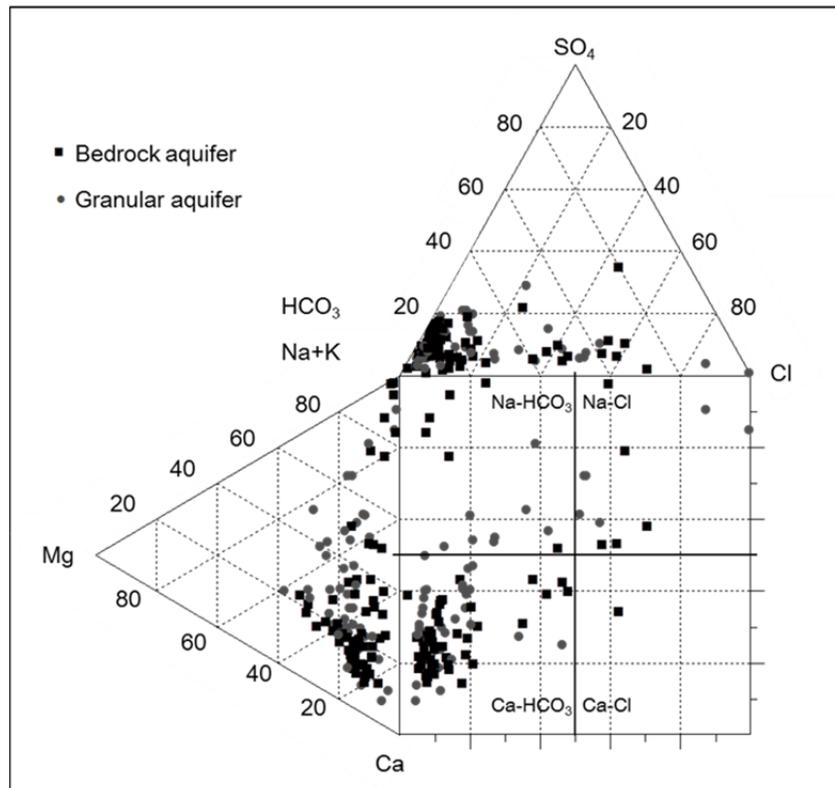


Figure 6-31 : Diagramme de Durov présentant 105 échantillons d'eau souterraine provenant du territoire de CHCN (tiré de Ghesquière et al., 2015). Carrés noirs = aquifère en milieu de roc fracturé; cercles gris = aquifère en milieu poreux.

Selon l'analyse multifactorielle

Une méthode statistique multivariée et une analyse multifactorielle ont été réalisées par Ghesquière et al. (2015) pour distinguer des groupes d'eau. Cette analyse se fait à partir du logiciel *Statistica version 12.0*. Les paramètres suivants ont été utilisés pour établir les liens entre les différents groupes : Ca, Mg, K, Si, Sr, Na, HCO₃, Cl et SO₄. Tel que montré à la figure 6-32, un total de quatre groupes a été identifié par Ghesquière et al. (2015) :

- Le groupe 1 comporte 22 échantillons dont 21 provenant d'aquifères en milieu poreux. 20 échantillons de ce groupe sont de type bicarbonaté selon le diagramme de Durov.
- Le groupe 2 se compose de 38 échantillons dont 26 provenant d'aquifères en milieu fracturé. 35 échantillons de ce groupe sont de type bicarbonaté selon le diagramme de Durov.
- Le groupe 3 regroupe 24 échantillons dont 16 proviennent d'aquifères en milieu fracturé. 24 échantillons de ce groupe sont de type bicarbonaté selon le diagramme de Durov.
- Le groupe 4 englobe 21 échantillons dont 16 proviennent d'aquifères en milieu fracturé. 7 échantillons de ce groupe sont de type chloruré selon le diagramme de Durov.

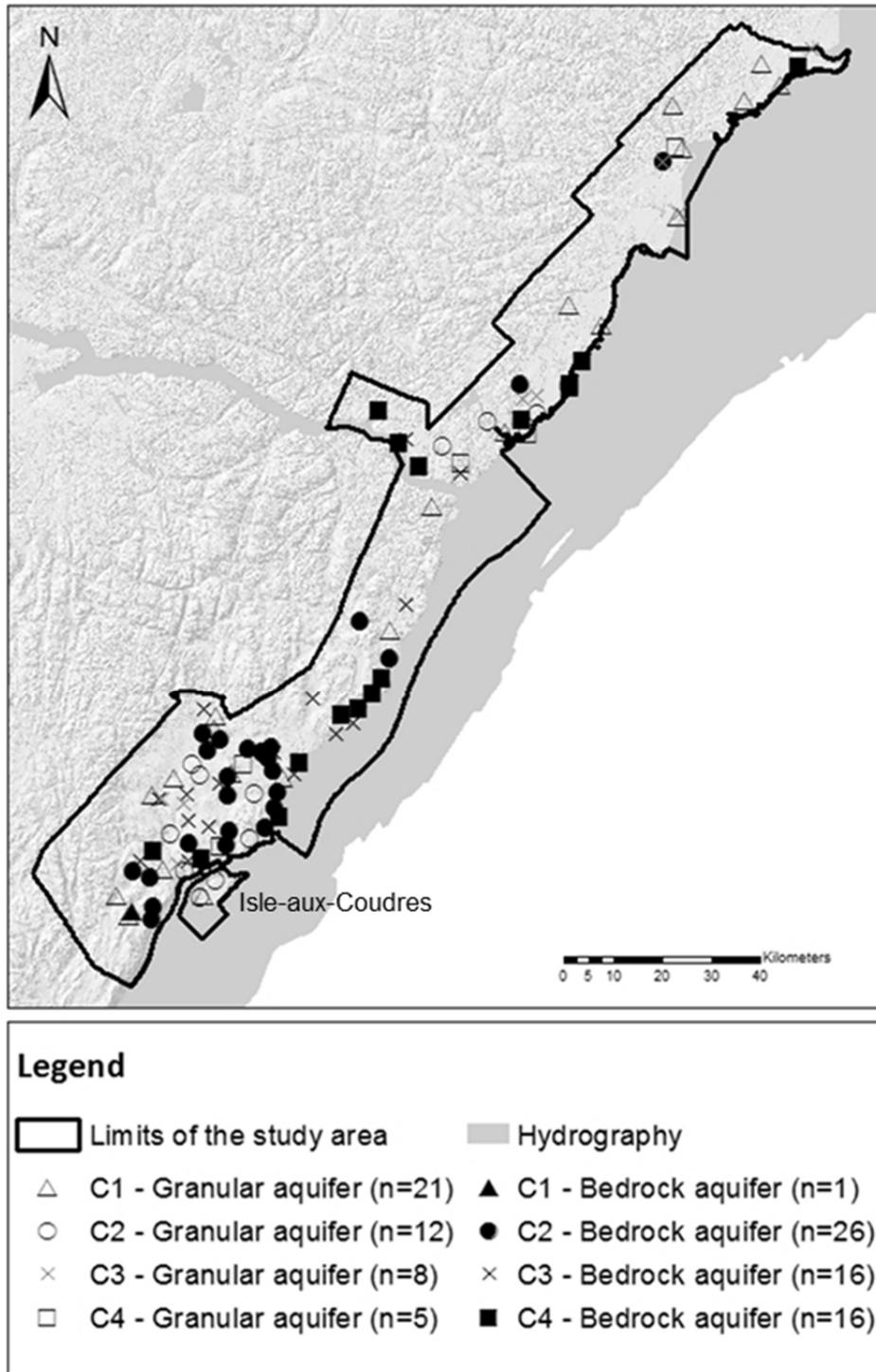


Figure 6-32 : Groupes d'eau obtenus par l'analyse multifactorielle pour les aquifères en milieu poreux et en milieu fracturé; C1 : groupe 1, C2 : groupe 2, C3 : groupe 3 et C4 : groupe 4 (tirée de Ghesquière et al., 2015).

Les principaux résultats de Ghesquière et al. (2015) indiquent que les échantillons appartenant au groupe 1 correspondent aux eaux souterraines les moins évoluées, c'est-à-dire celles dont la géochimie se rapproche le plus des eaux de recharge, elles se répartissent de façon aléatoire sur le territoire et sont majoritairement

prélevées dans les aquifères en milieu poreux (figure 6-32). Les échantillons appartenant aux groupes 2 et 3 correspondent à des eaux dont la composition géochimique est intermédiaire, c'est-à-dire entre les eaux de recharge et les eaux à salinité élevée. De la totalité des échantillons prélevés pour PACES-CHCN, 2/3 des eaux de ces groupes proviennent d'aquifères en milieu fracturé et 1/3 d'aquifères en milieu poreux. La majorité des échantillons correspondant à ces eaux se situe dans le secteur de l'astrolème de Charlevoix (figure 6-32). Finalement, les échantillons appartenant au groupe 4 constituent les eaux dont la géochimie présente la salinité la plus élevée; les échantillons proviennent au 3/4 d'aquifères en milieu fracturé et se localisent principalement en bordure de la côte du Fleuve Saint-Laurent.

Types d'eau pour le territoire CHCN

Les travaux de Ghesquière et al. (2015) présentent divers processus pouvant être à l'origine de l'évolution des eaux souterraines sur le territoire de CHCN. Parmi les processus évoqués par Ghesquière et al. (2015), on trouve la recharge des eaux souterraines, les interactions entre les milieux aquifères et l'eau souterraine, les échanges ioniques, les intrusions d'eau salée et les connexions hydrauliques entre les aquifères en milieu fracturé et en milieu poreux.

La figure 6-33 montre la localisation des eaux souterraines douces, (Na-Ca)-HCO₃, et salées, (Na-Ca)-Cl, selon le diagramme de Durov, ainsi que le groupe auquel ils appartiennent d'après l'analyse statistique de leur contenu en Ca, Mg, K, Si, Sr, Na, HCO₃, Cl et SO₄. Les travaux de Ghesquière et al. (2015) montrent que les eaux douces du groupe 1 proviennent majoritairement d'aquifères en milieu poreux (figure 6-32) présents sur l'ensemble du territoire de CHCN et leur signature hydrogéochimique est représentative des eaux de recharge, soit les moins évoluées.

Les eaux souterraines salées correspondent majoritairement à des eaux souterraines du groupe 4, soit les eaux les plus évoluées qui proviennent d'aquifères en milieu fracturé confinés. L'ensemble des eaux salées sont principalement localisées en bordure du Fleuve Saint-Laurent. Leur présence peut résulter d'eaux souterraines profondes qui font résurgence à proximité du fleuve Saint-Laurent ou encore de mélanges avec des intrusions d'eaux salées.

Les eaux des groupes 2 et 3 correspondent à des eaux dont la composition hydrogéochimique est intermédiaire entre les groupes 1 et 4 provenant probablement d'aquifères en milieu poreux et en milieu fracturé interconnectés.

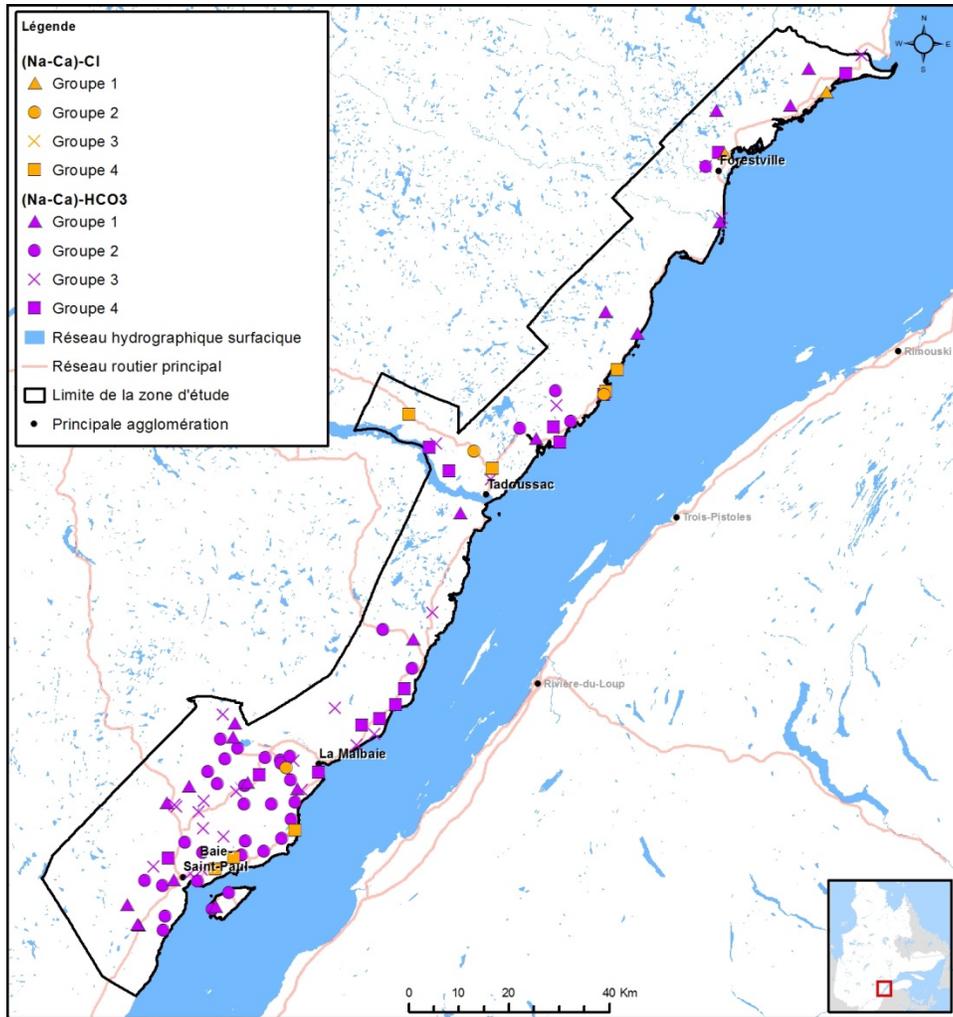


Figure 6-33 : Localisation des échantillons d'eau souterraine douce et salée selon le diagramme de Durov et correspondant aux 4 groupes résultant de l'analyse multifactorielle (Ghesquière et al., 2015).

6.4.3 Piézométrie et écoulements

6.4.3.1 Données de cotes piézométriques

Une mesure de cote piézométrique est réalisée à l'aide d'un piézomètre, qui représente tout ouvrage artificiel (puits, forage, etc.) ou naturel (grotte, gouffre, etc.) permettant l'estimation du niveau de l'eau souterraine. De plus, les eaux souterraines et les eaux de surface présentent des relations et une interdépendance étroite et complexe.

Dans le cadre de cette étude, l'hydrographie est ainsi hypothétiquement assimilée à « un affleurement » de la surface des nappes souterraines et, de ce fait, toute mesure de l'élévation de l'hydrographie peut être considérée comme une valeur de cote piézométrique. Pour le territoire de CHCN, les mesures de cote piézométrique sont donc issues :

1. des valeurs mesurées dans des puits ou forages compilés dans la base de données spatiales;
2. des valeurs mesurées dans des forages réalisés lors des travaux de terrain du projet PACES-CHCN;
3. des valeurs mesurées lors la campagne d'échantillonnage hydrogéochimique du projet PACES-CHCN;
4. des valeurs d'élévation du réseau hydrographique.

Comme illustré (figure 6-34), peu de points de cote piézométrique issus d'ouvrages sont présents sur le territoire et ils présentent une grande variabilité dans la distribution spatiale. Dans le cadre du projet PACES-CHCN, il a donc été choisi de n'utiliser que les valeurs de cotes issues de l'élévation du réseau hydrographique pour déterminer la surface piézométrique régionale. Ceci permet d'obtenir une quantité appréciable de données avec une répartition plus homogène. Les points de cote piézométrique issus d'ouvrages sont, par la suite, utilisés pour vérifier la validité de cette hypothèse.

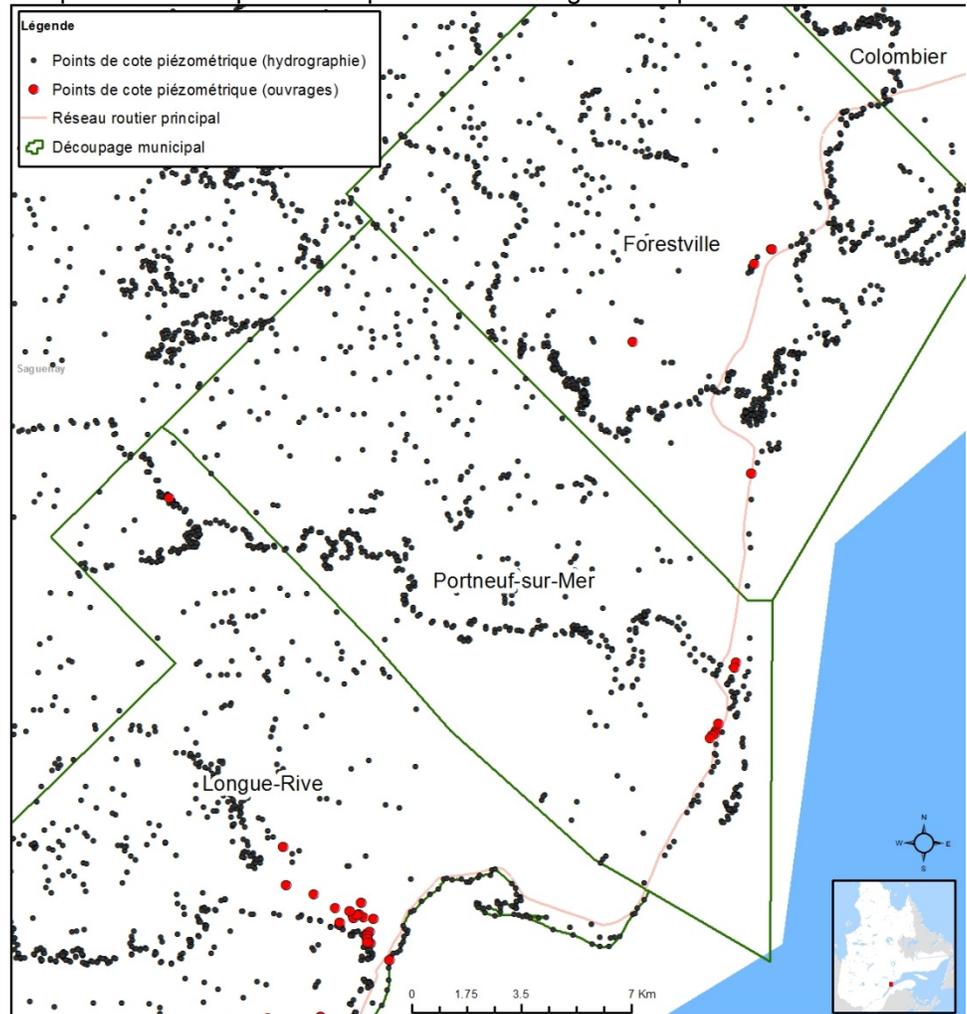


Figure 6-34 : Extrait de la répartition de points de cote piézométrique.

6.4.3.2 Méthode d'interpolation de la surface piézométrique régionale

Les mesures d'élévation de l'hydrographie de la base de données topographiques du Québec (BDTQ; présentées sous la forme de données linéaires ou surfaciques) sont converties en données ponctuelles à l'aide du logiciel *ArcMap* d'*ArcGIS*, et leur élévation est extraite du modèle numérique d'altitudes (MNA).

La piézométrie régionale a été obtenue en interpolant l'élévation de l'hydrographie surfacique. La méthode d'interpolation choisie est « Topo to Raster ». L'interpolation a été effectuée sur la carteA0 en ajoutant un corridor de 10 km autour du territoire municipalisé.

6.4.3.3 Validation de la méthode

L'utilisation unique des points d'élévation hydrographique induit indéniablement un biais dans l'estimation de la surface piézométrique régionale. Dans ce contexte, l'élévation de l'eau souterraine est considérée comme identique à l'élévation des eaux de surface. Cette méthode est donc discutable d'un point de vue quantitatif (profondeur ou élévation de la nappe).

Pour vérifier la validité de l'hypothèse de cette méthode, les points de cote piézométrique issus d'ouvrages ont été utilisés afin de comparer les valeurs de piézométrie ponctuelle contenues dans la base de données avec les valeurs interpolées à partir de l'hydrographie.

La mise en graphique des valeurs réelles en fonction des valeurs interpolées correspondantes (figure 6-35) illustre le bon degré de corrélation de l'interpolation. La régression linéaire indique un coefficient de détermination (R^2) de 0,89 pour les 1 303 points de validation.

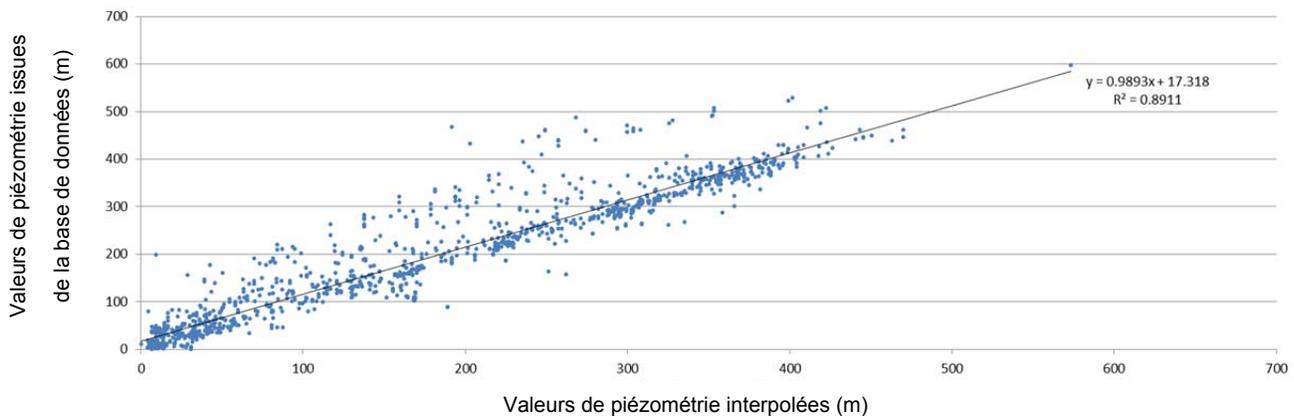


Figure 6-35 : Validation des hypothèses d'interpolation de la piézométrie.

Les eaux souterraines et de surface sont donc probablement liées hydrauliquement, le comportement hydraulique ou la direction d'écoulement des eaux souterraines seront donc qualitativement représentatifs de l'écoulement réel.

6.4.3.4 Piézométrie, écoulements régionaux et profondeur de l'eau souterraine

Dans le cadre du projet PACES-CHCN, la carte #19 – *Piézométrie régionale* (annexe numérique AN1) montre les courbes piézométriques régionales.

Profondeur de l'eau souterraine

À l'aide des valeurs de topographie de surface et de piézométrie, il est possible de déterminer la profondeur relative de l'eau souterraine (figure 6-36). Ainsi les profondeurs estimées vont de 0 à 450 m de profondeur pour une moyenne régionale de 38 m. Toutefois, les valeurs de profondeur de plus de 100 m sont des anomalies non réalistes résultant de l'approche indirecte d'estimation de ce paramètre. Malgré leur caractère approximatif, les estimations de la piézométrie permettent d'illustrer la direction de l'écoulement et la très grande variabilité spatiale de la piézométrie, laquelle résulte du relief prononcé du secteur de Charlevoix. Les valeurs les plus élevées sont observables au droit des hauts reliefs des Laurentides, principalement sur le territoire de Charlevoix qui présente également la plus forte variabilité de profondeurs estimées. En comparaison, le secteur de la Haute-Côte-Nord présente des variations de plus faible amplitude : entre 0 et 50 m.

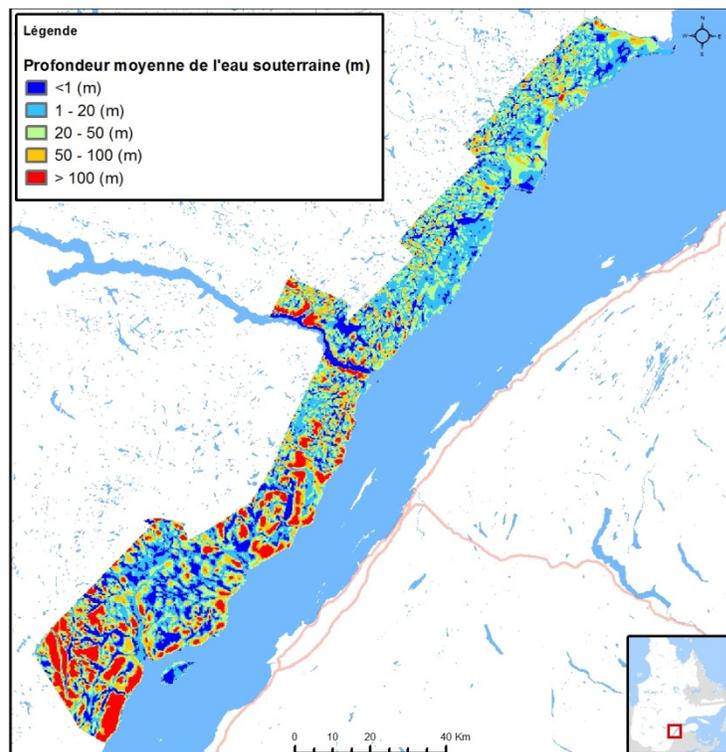


Figure 6-36 : Profondeur de l'eau souterraine du territoire CHCN.

Piézométrie et écoulements régionaux

La figure 6-37 illustre la piézométrie régionale du territoire de CHCN. Les courbes iso-piézométriques sont présentées à une équidistance de 50 m. L'élévation des isopièzes varie de 0 à 900 m pour les MRC de Charlevoix et de Charlevoix-Est. Ces variations sont moins prononcées sur la Haute-Côte-Nord avec une gamme entre 0 et 250 m d'altitude.

Comme définie à la section 6.1.3, la piézométrie permet de définir la direction et le sens d'écoulement des eaux souterraines.

- Régionalement, l'écoulement s'effectue du nord-ouest au sud-est, des hauts reliefs vers le fleuve Saint-Laurent.
- Localement, les écoulements sont orientés vers l'hydrographie principale telle que les rivières Saguenay, du Gouffre et Malbaie.

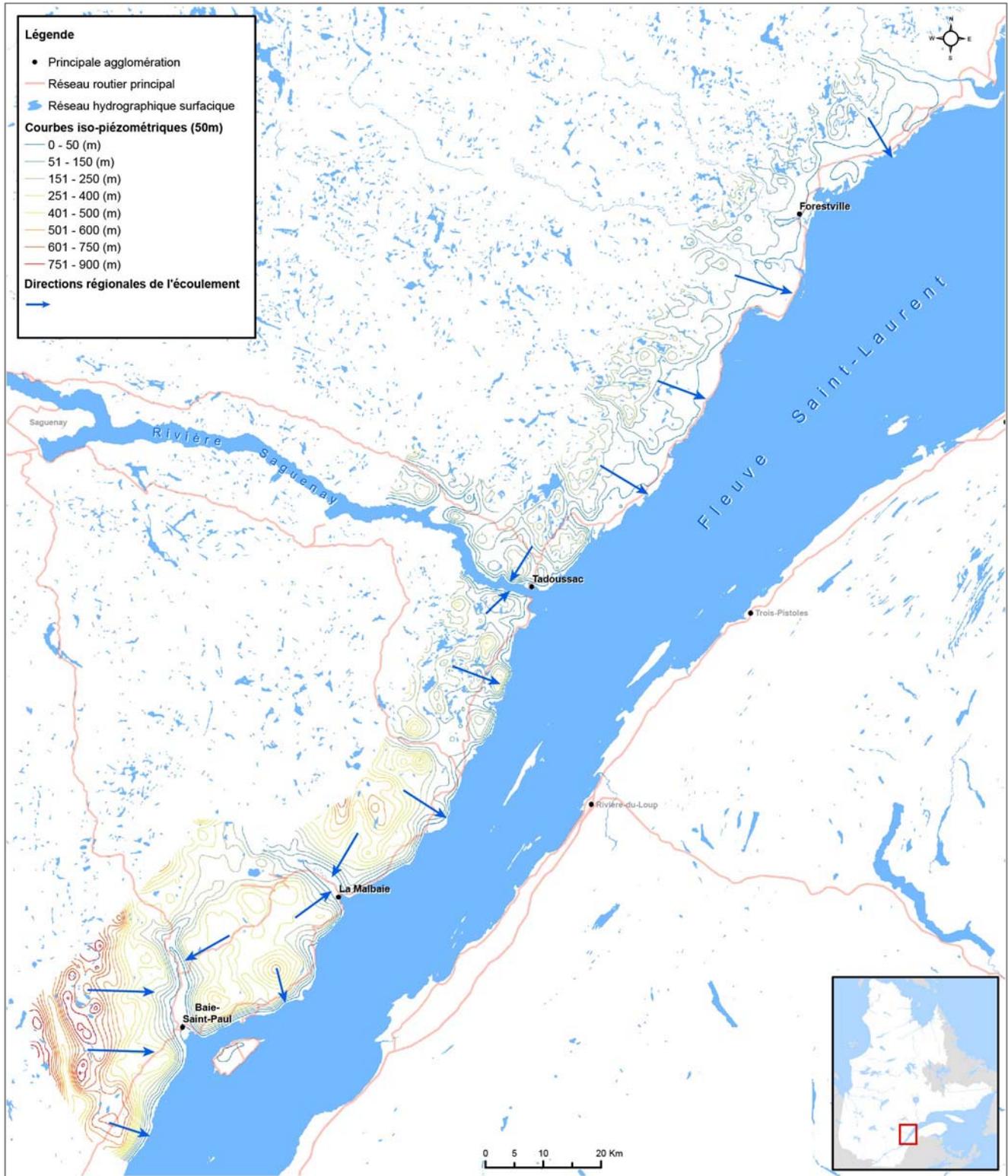


Figure 6-37 : Piézométrie et écoulements régionaux du territoire de CHCN.

6.4.4 Zones de recharge et de résurgence

6.4.4.1 Zones de forte recharge et de recharge préférentielle

Dans le cadre du projet PACES-CHCN, les zones de forte recharge et de recharge préférentielle sont présentées sur la carte #28 – *Zones de recharge préférentielle et de résurgence* (annexe numérique AN1) et à la figure 6-38.

Les zones de forte recharge sont celles où la recharge annuelle est estimée supérieure à 250 mm. Ces zones (en gris sur la figure 6-38) sont représentatives des basses terres sur la Haute-Côte-Nord et aux vallées dans Charlevoix. Une zone de forte recharge est également présente à l'extrême sud de la région d'étude sur le territoire municipale de Petite-Rivière-Saint-François, principalement en raison des fortes précipitations enregistrées dans ce secteur.

Les zones de recharge préférentielle ont été définies ici comme celles où la proportion de la recharge est estimée supérieure à 40% des précipitations. Ces zones (en hachures vertes sur la figure 6-38) représentent une subdivision des zones de forte recharge, caractéristiques de zones de forte infiltration. Indépendamment des conditions climatiques, ces zones de recharge préférentielle sont à mettre en parallèle avec la vulnérabilité des aquifères. Suivant l'utilisation locale des eaux souterraines (alimentation en eau potable); ces zones sont donc à interpréter comme des secteurs prioritaires de protection.

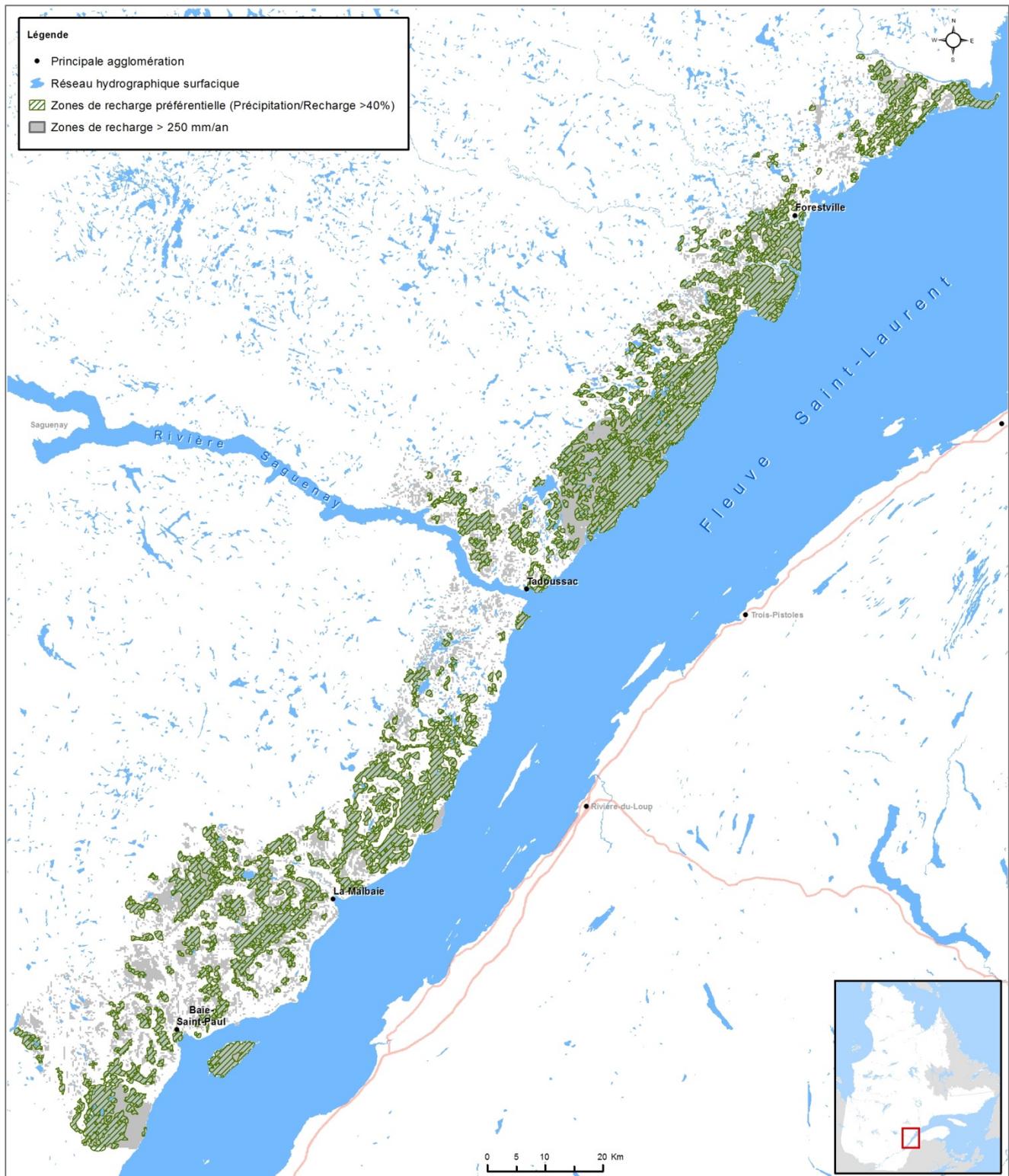


Figure 6-38 : Zones de forte recharge et de recharge préférentielle du territoire de CHCN.

6.4.4.2 Zones de résurgence ou d'affleurement potentiel de nappe

Dans le cadre du projet PACES-CHCN, les zones **de résurgence ou d'affleurement potentiel de nappe** sont présentées sur la carte #28 – *Zones de recharge préférentielle et de résurgence* (annexe numérique AN1) et à la figure 6-39.

Trois types de zone de résurgence sont identifiés sur le territoire. D'une part, 19 sources (symbolisées par un point vert sur la figure 6-39) ont été répertoriées. D'autre part, les zones de suintement ou d'affleurement potentiel de la nappe (en hachures sur la figure 6-39) ont été interprétées par soustraction de la piézométrie aux valeurs de topographie de surface. Ces zones correspondent aux secteurs où localement la piézométrie se situe au-dessus de la surface du sol. À l'échelle régionale, ces zones de suintement ou de résurgence potentielle sont localisées dans des zones de fortes variations de topographie (ruptures de pente, falaises) et en bordure des cours d'eau. Finalement, les affleurements de la nappe (en rouge sur la figure 6-39), correspondent aux milieux humides de la carte #7 – *Occupation des sols* (annexe numérique AN1). Ceux-ci sont considérés comme un affleurement de la nappe, en l'absence d'étude spécifique pour identifier ou non les liens hydrauliques existants entre les milieux humides cartographiés et les eaux souterraines.

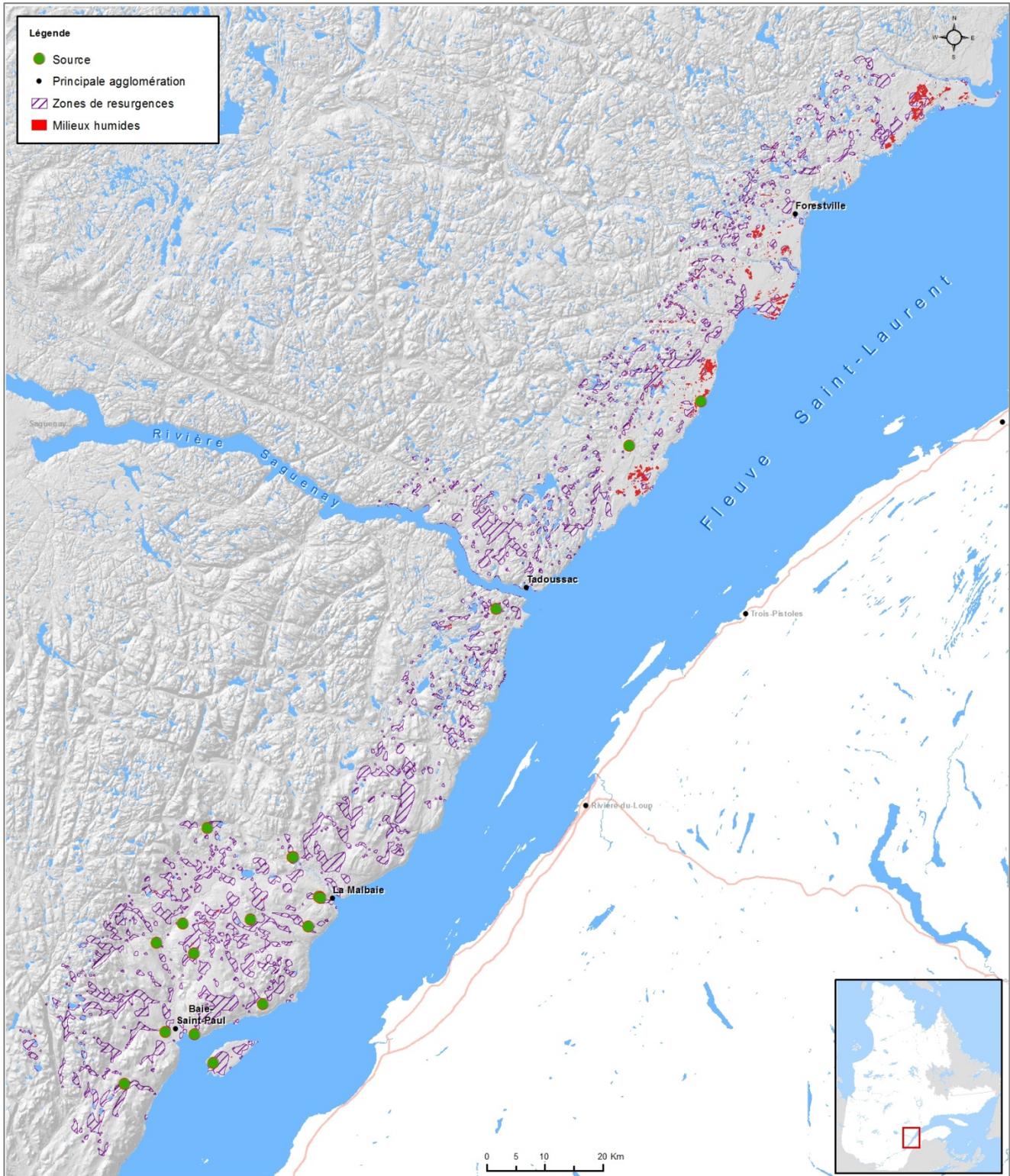


Figure 6-39 : Zones de résurgences ou d'affleurement potentiel de nappe du territoire de CHCN.

7 ÉTAT DE LA RESSOURCE EN EAUX

La ressource en eaux sert à de multiples usages allant de l'alimentation en eau potable des populations jusqu'à l'utilisation dans des procédés industriels, en passant par une multitude d'autres usages. Ces eaux proviennent de deux principales sources : l'eau de surface et l'eau souterraine. Dans une perspective d'alimentation en eau potable, la ressource en eaux se caractérise principalement par la quantité disponible et sa qualité physico-chimique et bactériologique.

Ce chapitre présente le portrait de la ressource en eaux pour le territoire de Charlevoix et de La Haute-Côte-Nord (CHCN) pour lequel est présentée l'origine de l'eau et le type d'aquifère sollicité pour l'alimentation en eau potable municipal (section 7.1), une estimation des quantités d'eau de surface et d'eau souterraine prélevées sur le territoire annuellement ainsi que les usages auxquels les eaux souterraines sont utilisées (section 7.2), la qualité de l'eau pour l'alimentation en eau potable selon le Règlement sur la qualité de l'eau potable (RQEP) du Québec (section 7.3), et finalement la vulnérabilité et la nécessité de protection de la ressource (section 7.4).

7.1 Prélèvements d'eau

Les prélèvements d'eau pour le territoire de CHCN répondent premièrement à un besoin d'alimentation en eau potable. Chaque municipalité a ses propres installations de prélèvement et de distribution d'eau destinée à l'alimentation en eau potable. Les réseaux municipaux alimentent une proportion importante de foyers et de personnes en eau potable.

7.1.1 Origines de l'eau prélevée et distribuée dans les réseaux municipaux

Lors de la phase I du PACES-CHCN, en 2012, la majorité des installations municipales de captage d'eau souterraine ont été visitées et localisées par l'équipe du PACES-CHCN. Ces visites démontrent que l'eau prélevée par les municipalités du territoire de CHCN provient de trois différentes origines tel que présenté sur la figure 7-1 et au tableau 7-1 : eau de surface, eau souterraine et eau de résurgence. Nous appelons eau de résurgence une eau souterraine qui surgit naturellement à la surface du terrain sans nécessiter l'installation de puits de pompage.

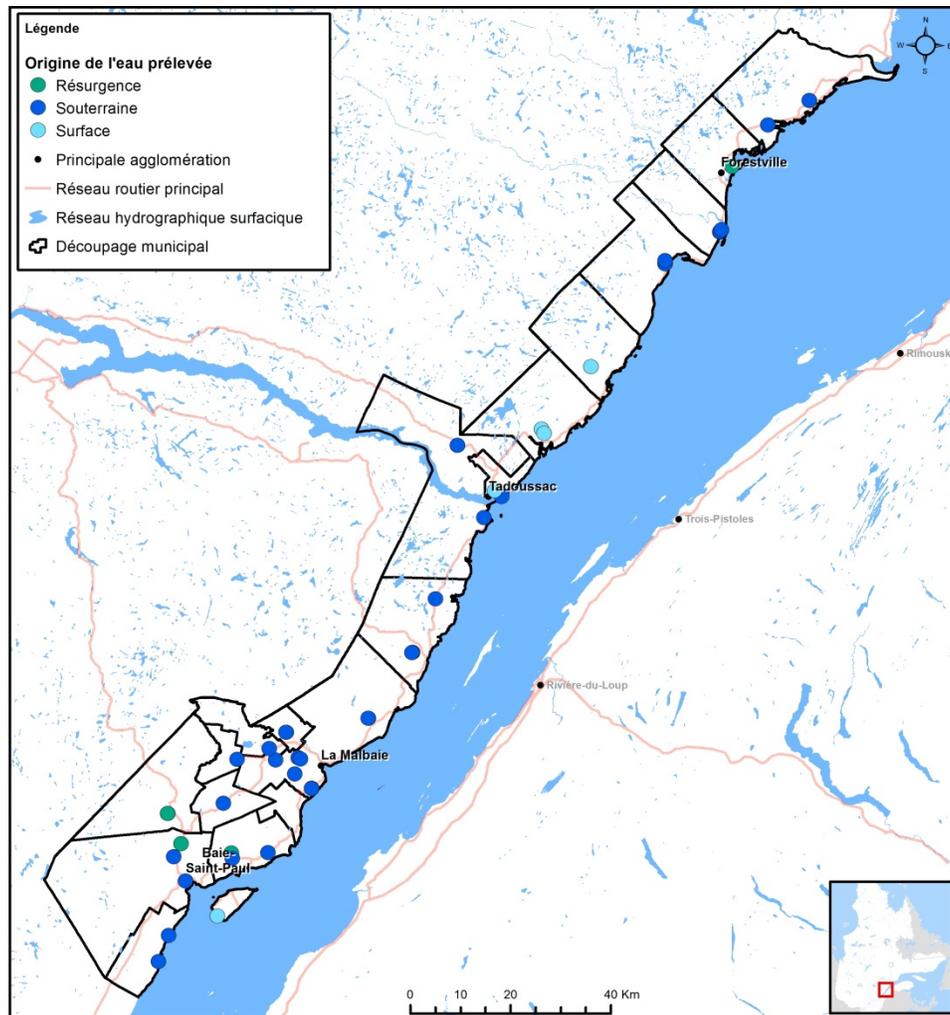


Figure 7-1 : Localisation de 50 stations de prélèvements d'eau distribuée dans les réseaux municipaux pour l'alimentation en eau potable.

7.1.1.1 Les captages municipaux

La plupart des municipalités alimentent leur réseau à partir d'eau provenant d'une seule origine tandis que trois d'entre elles en combinent deux (figure 7-1). C'est le cas de Baie-Saint-Paul et Les Éboulements dans la MRC de Charlevoix dont l'eau prélevée est d'origine souterraine et de résurgence. C'est également le cas pour la municipalité de Tadoussac dans la MRC de La Haute-Côte-Nord qui alimente son réseau à partir d'eau de surface et d'eau souterraine.

La municipalité de Tadoussac prélève majoritairement de l'eau de surface pour l'alimentation en eau potable distribuée par le réseau municipal (tableau 7-1). Le puits de captage d'eau souterraine est utilisé de façon complémentaire, principalement en période estivale où l'affluence touristique augmente considérablement la demande en eau potable distribuée par la municipalité.

La municipalité des Escoumins a également un puits de captage d'eau souterraine localisé à proximité de sa prise d'eau de surface, toutefois ce puits n'est pas utilisé. Cette municipalité s'alimente donc en eau potable à partir d'eau de surface (tableau 7-1).

Au cours des dernières années, il a été envisagé à la municipalité des Bergeronnes d'alimenter la population à partir d'eau souterraine. Un puits a été aménagé dans le roc fracturé et la quantité d'eau souterraine est

suffisante mais la qualité ne correspond pas aux normes du RQEP et doit être traitée. Puisque le traitement requiert des coûts élevés, la municipalité préfère continuer de prélever de l'eau de surface et ne pas modifier ses installations de distribution d'eau potable (tableau 7-1).

L'utilisation d'eau provenant de résurgences d'eau souterraine, communément appelé sources, constitue une particularité du territoire de CHCN. Les résurgences sont nombreuses et présentent un débit qui, dans certains cas, permet d'alimenter en eau potable l'ensemble d'une municipalité. C'est le cas pour quatre d'entre elles sur le territoire de CHCN dont les réseaux de distribution d'eau potable sont alimentés en partie ou en totalité à partir de résurgences (figure 7-1 et tableau 7-1) : Baie-Saint-Paul, Les Éboulements et Saint-Urbain dans la MRC de Charlevoix, et Forestville dans la MRC de La Haute-Côte-Nord.

Tableau 7-1 : Population, origine de l'eau prélevée et milieu aquifère capté pour chaque territoire municipalisé.

Nom du territoire	Population (nbre habitants)	Origine de l'eau prélevée	Milieu aquifère capté
CHCN	40 930		
MRC de CHARLEVOIX	13 338		
Baie-Saint-Paul	7 332	Souterraine et résurgence	Roc fracturé et granulaire
Les Éboulements	1 328	Souterraine et résurgence	Roc fracturé
L'Isle-aux-Coudres	1 279	Surface	NA*
Petite-Rivière-Saint-François	744	Souterraine	Granulaire
Saint-Hilarion	1 181	Souterraine	Roc fracturé
Saint-Urbain	1 474	Résurgence	Roc fracturé
MRC de CHARLEVOIX-EST	16 046		
Baie-Sainte-Catherine	204	Souterraine	Granulaire
Clermont	3 118	Souterraine	Roc fracturé
La Malbaie	8 862	Souterraine	Roc fracturé
Notre-Dame-des-Monts	815	Souterraine	Roc fracturé
Saint-Aimé-des-Lacs	1 073	Souterraine	Roc fracturé
Saint-Irénée	674	Surface	NA*
Saint-Siméon	1 300	Souterraine	Roc fracturé et granulaire
MRC de LA HAUTE-CÔTE-NORD	11 546		
Colombier	747	Souterraine	Granulaire
Forestville	3 270	Résurgence	Granulaire
Les Bergeronnes	693	Surface	NA*
Les Escoumins	2 000	Surface	NA*
Longue-Rive	1 113	Souterraine	Granulaire
Portneuf-sur-Mer	761	Souterraine	Granulaire
Sacré-Coeur	1 881	Souterraine	Granulaire
Tadoussac	813	Souterraine et surface	Granulaire
Essipit	268	Surface	NA*

* NA : non applicable.

7.1.1.2 *Résurgence de Baie-Saint-Paul*

À Baie-Saint-Paul, deux réseaux distincts sont utilisés pour l'alimentation en eau potable dont le principal distribue de l'eau souterraine captée à partir de puits tandis que le réseau secondaire capte une résurgence en bordure d'un ruisseau (figure 7-2a) et alimente le secteur de Cap-aux-Corbeaux.

L'eau surgit d'un dépôt de sable et gravier. Un caisson de béton a été aménagé pour capter l'eau de résurgence (figure 7-2a) et un tuyau l'achemine vers la station de pompage située à quelques mètres de la résurgence. Un

autre tuyau, le blanc sur la photo (figure 7-2b) sert de trop-plein et rejette le surplus d'eau quelques mètres en aval vers le ruisseau.



Figure 7-2 : Installation de captage de la résurgence dans un caisson de béton (a) et vue de l'intérieur du caisson avec les tuyaux d'amenés d'eau (b).

7.1.1.3 Résurgences de Saint-Urbain

La municipalité de Saint-Urbain capte l'eau souterraine qui fait résurgence du roc fracturé. Pour chacun des trois points de résurgence un caisson de béton est aménagé pour capter l'eau souterraine et l'acheminer vers une station de pompage. Puisque les résurgences sont localisées en altitude par rapport à la municipalité, l'eau est distribuée dans le réseau par gravité.



Figure 7-3 : Captage de résurgences à Saint-Urbain; a) exemple de caisson de béton qui confine l'eau de résurgence avant qu'elle soit acheminée vers la station de distribution (b) quelques mètres plus bas.

7.1.1.4 Résurgences Des Éboulements

Deux réseaux de distribution sont utilisés aux Éboulements. Le réseau principal est alimenté par deux résurgences et un puits artésien jaillissant captant l'eau provenant d'un aquifère rocheux fracturé. Les résurgences sont captées dans des bassins de béton (figure 7-4) et acheminées vers la station de traitement (chloration) en amont du réseau de distribution. L'eau captée par le puits est également acheminée vers cette station d'où l'eau est distribuée dans le réseau par gravité.



Figure 7-4 : Bassin servant à capter l'eau de résurgence aux Éboulements avant qu'elle soit acheminée vers la station de traitement.

7.1.1.5 Résurgence de Forestville

La municipalité de Forestville distribue de l'eau provenant d'une résurgence pour l'alimentation en eau potable. L'eau s'écoule dans un milieu granulaire fin (sable fin, silt) où elle fait résurgence dans un talus boisé. Elle ruisselle sur quelques dizaines de mètres, voire près d'une centaine, avant d'être captée par deux bassins (figure 7-5). Le premier bassin accumule les sédiments transportés lors du ruissellement de l'eau qui s'écoule vers le second bassin avant d'être amenée vers la station de pompage pour être traitée (chloration et ultraviolet) et distribuée.



**Figure 7-5 : Vue des bassins de captage de l'eau de résurgence à Forestville.
Les poutres installées en surface servent à diminuer la vitesse d'écoulement de l'eau.**

Les résurgences alimentant les municipalités de Baie-Saint-Paul et de Saint-Urbain sont captées dans des caissons de béton étanches dès leur arrivée en surface. Ceci évite que l'eau soit en contact avec de potentiels contaminants en surface. Toutefois, l'eau de résurgence captée aux Éboulements et à Forestville coule en surface sur quelques dizaines de mètres avant de s'accumuler dans des bassins de rétention d'où l'eau est dirigée vers la station de pompage. Cette eau de résurgence se trouve exposée à de potentiels contaminants pendant son écoulement en surface.

7.1.2 Aquifères exploités par les municipalités pour l'alimentation en eau potable

Parmi les vingt-et-une municipalités du territoire de CHCN, dix-sept d'entre elles sont alimentées en eau potable en totalité ou en partie à partir d'eau souterraine (tableau 7-1). Les résurgences captées par quatre municipalités sont considérées ici comme appartenant à la catégorie des eaux souterraines. Parmi ces dix-sept municipalités (figure 7-6) :

- dix captent l'eau souterraine dans un aquifère granulaire (ou perméable), soit les municipalités de Colombier, Forestville, Portneuf-sur-Mer, Longue-Rive, Tadoussac, Sacré-Cœur, Baie-Sainte-Catherine, Clermont, Notre-Dame-des-Monts et Petite-Rivière-Saint-François;
- cinq captent l'eau souterraine dans un aquifère de roc fracturé (ou semi-perméable), soit les municipalités de La Malbaie, Saint-Aimé-des-Lacs, Saint-Hilarion, Saint-Urbain et Les Éboulements;
- deux captent dans les deux types d'aquifères granulaire (perméable) et de roc fracturé (semi-perméable), soit les municipalités de Baie-Saint-Paul et Saint-Siméon.

Dans les MRC de Charlevoix et de Charlevoix-Est, ce sont principalement les aquifères de roc fracturé (semi-perméables) qui sont exploités par les municipalités pour l'alimentation en eau potable. Tandis que dans la MRC de La Haute-Côte-Nord, ce sont plutôt les aquifères granulaires (perméables) qui sont exploités.

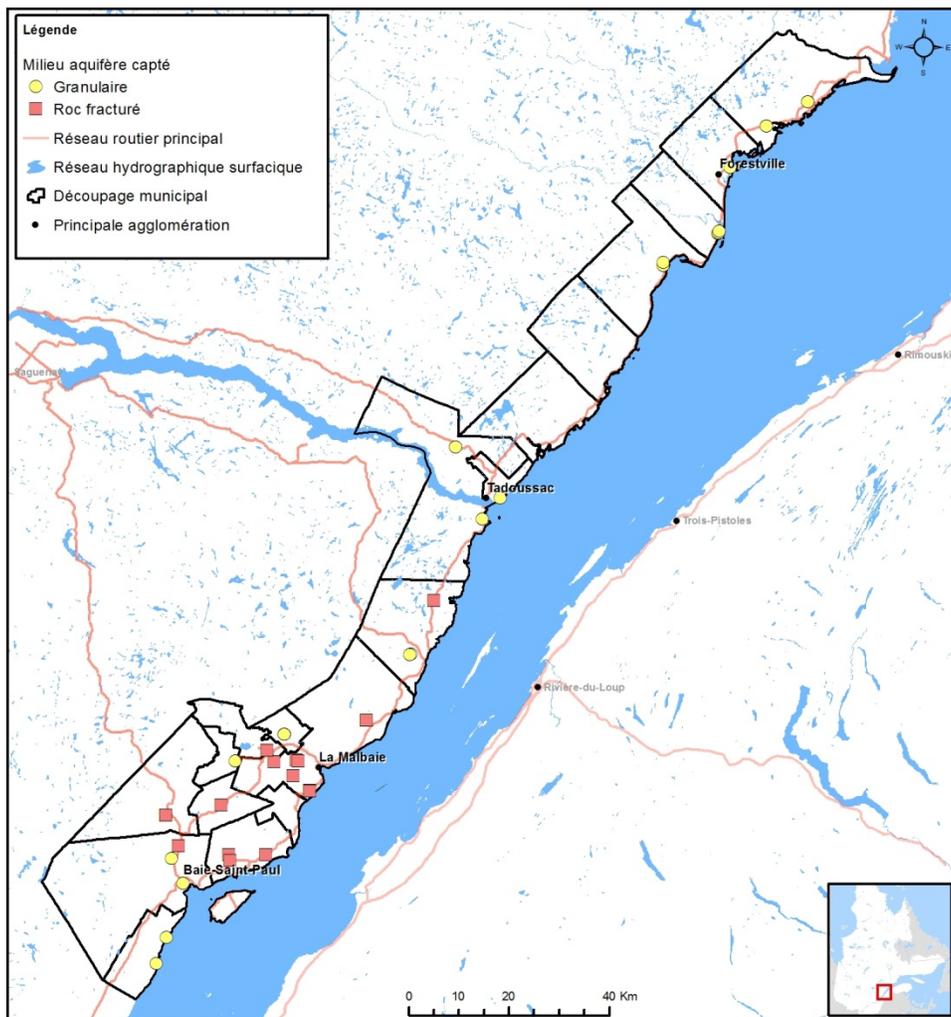


Figure 7-6 : Localisation des 45 ouvrages de captage d'eau souterraine relevés par l'équipe PACES.

7.1.2.1 Aquifères de roc fracturé exploités par les municipalités

Des quarante-cinq ouvrages de captages, dix-huit captent un aquifère de roc fracturé (figure 7-6) correspondant à différents contextes hydrogéologiques (voir section 6.3.1). Ils se localisent tous sur le territoire des MRC de Charlevoix et de Charlevoix-Est. Six d'entre eux correspondent au contexte hydrogéologique A caractérisé par un aquifère semi-perméable en milieu fracturé (figure 7-7a) :

- trois correspondent aux puits et résurgences alimentant la municipalité des Éboulements;
- deux sont des puits de captage pour l'alimentation en eau potable de la municipalité de La Malbaie;
- un correspond à un puits de captage utilisé pour l'alimentation en eau potable de la municipalité de Saint-Siméon.

Trois autres ouvrages captent l'eau souterraine dans le contexte hydrogéologique B caractérisé par deux aquifères semi-perméables, en milieux fracturé et mixte (section 6.3.1; figure 7-7b). Ils se localisent tous sur le territoire de la municipalité de Saint-Urbain dans la MRC de Charlevoix et correspondent aux résurgences alimentant cette municipalité.

Sept ouvrages captent l'eau souterraine d'un aquifère de roc fracturé correspondant au contexte hydrogéologique C caractérisé par deux aquifères superposés, celui localisé à la base est un aquifère semi-perméable en milieu fracturé (chapitre 6.3.1; figure 7-7c). Cet aquifère est recouvert par un aquifère perméable en milieu poreux. Parmi ces derniers, six se localisent sur le territoire de la municipalité de La Malbaie et un dans la municipalité de Saint-Hilarion. Tous servent à l'alimentation en eau potable de ces municipalités.

Deux puits captent l'eau d'un aquifère de roc fracturé correspondant au contexte hydrogéologique F caractérisé à la base par un aquifère semi-perméable en milieu fracturé ou mixte, à nappe captive (chapitre 6; figure 7-7d). Ces puits se localisent dans les municipalités de Baie-Saint-Paul et de Saint-Aimé-des-Lacs.

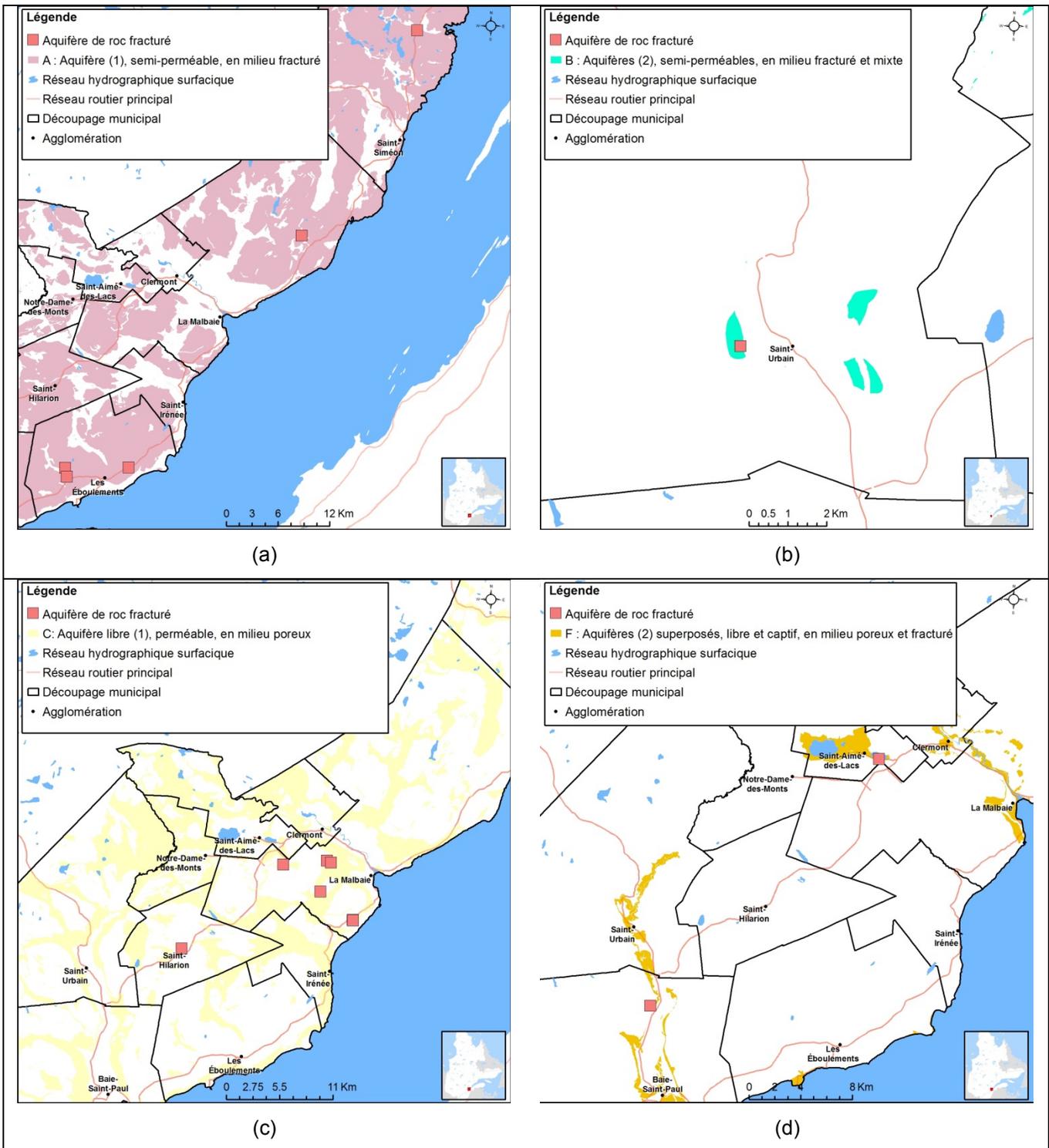


Figure 7-7 : Localisation des ouvrages captant l'eau souterraine d'aquifères de roc fractures (semi-perméables).

- A) Six ouvrages captent l'eau souterraine du contexte hydrogéologique A;
- B) trois ouvrages captent l'eau souterraine du contexte hydrogéologique B;
- C) sept ouvrages captent l'eau souterraine du contexte hydrogéologique C;
- D) deux ouvrages captent l'eau souterraine du contexte hydrogéologique F.

7.1.2.2 Aquifères granulaires exploités par les municipalités

Des quarante-cinq ouvrages de captages, vingt-sept captent un aquifère granulaire (ou perméable) en milieu poreux (figure 7-6) dont onze se localisent sur les territoires des MRC de Charlevoix et de Charlevoix-Est et seize sur le territoire de la MRC de La Haute-Côte-Nord.

Le puits de captage qui sert à l'alimentation en eau potable de la municipalité de Notre-Dame-des-Monts correspond au contexte hydrogéologique A caractérisé par un aquifère semi-perméable en milieu fracturé (voir section 6.3.1; figure 7-8a). Toutefois, l'aquifère capté à Notre-Dame-des-Monts est un aquifère poreux qui correspond davantage au contexte hydrogéologique C caractérisé par un aquifère perméable en milieu poreux qui est cartographié à proximité du puits sur la figure 7-8a. Ceci résulte des incertitudes attribuées au découpage des contextes hydrogéologiques à l'échelle régionale.

Trois autres ouvrages de captage aménagés dans un aquifère en milieu poreux captent l'eau souterraine dans le contexte hydrogéologique E caractérisé par deux aquifères poreux superposés, perméables, l'un libre et l'autre captif (voir section 6.3.1; figure 7-8b). Deux se localisent sur le territoire de la municipalité de Saint-Siméon dans la MRC de Charlevoix-Est tandis que l'autre correspond au puits de captage de la municipalité de Tadoussac.

Vingt-trois ouvrages captent l'eau souterraine d'un aquifère granulaire correspondant au contexte hydrogéologique F caractérisé par deux aquifères superposés dont celui qui est au sommet est perméable, en milieu poreux et à nappe libre (voir section 6.3.1; figure 7-8c). Sur le territoire de CHCN, ce contexte est typique de milieu aquifère poreux de faible épaisseur (10 à 15 mètres donc environ 10 m et moins d'épaisseur saturée), ce qui limite l'épaisseur du rabattement de la nappe disponible au-dessus de la crépine lors de l'aménagement d'un puits. Il est observé dans plusieurs municipalités que plusieurs puits captant de faible débit sont aménagés dans un même périmètre pour atteindre le débit journalier requis afin d'assurer l'alimentation en eau potable de ces mêmes municipalités. Les éléments suivants sont retenus pour ces puits.

- Deux servent à l'alimentation en eau potable de la municipalité de Petite-Rivière-Saint-François.
- Deux correspondent à des puits de captage utilisés pour l'alimentation en eau potable de la municipalité de Baie-Saint-Paul.
- Quatre puits très rapprochés l'un de l'autre (moins de 20 mètres) se localisent sur le territoire de Clermont et sont utilisés pour l'alimentation en eau potable.
- Un puits de captage est utilisé par la municipalité de Baie-Sainte-Catherine.
- Deux puits de la municipalité de Sacré-Cœur sont exploités pour l'alimentation en eau potable.
- Quatre puits de captage sont aménagés et utilisés pour l'alimentation en eau potable pour la municipalité de Portneuf-sur-Mer.
- Une résurgence provenant d'un aquifère granulaire est exploitée pour l'alimentation en eau potable de la municipalité de Forestville. Il n'y a toutefois pas d'information stratigraphique caractéristique du milieu d'où provient la résurgence (puits de captage ou puits d'observation), ainsi peut-être que le contexte réel correspond à un autre type.
- Quatre puits de captage servant à l'alimentation en eau potable de la municipalité de Colombier.

Selon la carte #17 – *Contextes hydrogéologiques* (annexe numérique AN1), les trois puits de la municipalité de Longue-Rive captent l'eau souterraine destinée à l'alimentation en eau potable dans le contexte hydrogéologique F (figure 7-8d). Toutefois, l'aquifère poreux capté à Longue-Rive est captif et correspond davantage au contexte hydrogéologique E qui apparaît sur la carte #17 à environ 1 km au sud des puits de Longue-Rive. Ceci résulte des incertitudes attribuées au découpage des contextes hydrogéologiques à l'échelle régionale.

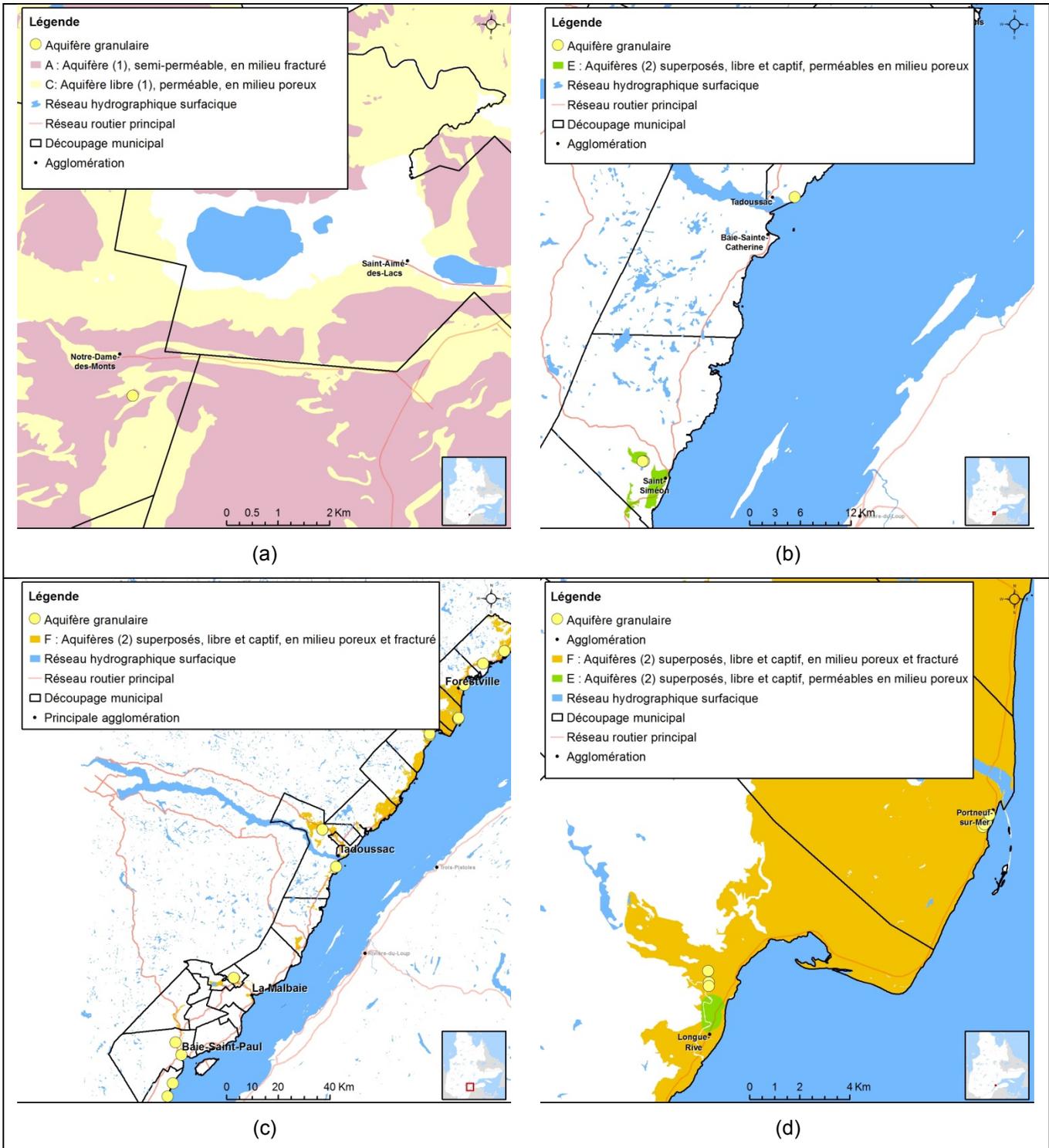


Figure 7-8 : Localisation des ouvrages captant l'eau souterraine d'aquifères granulaires; a) Un ouvrage capte l'eau souterraine du contexte hydrogéologique A; b) trois ouvrages captent l'eau souterraine du contexte hydrogéologique E; c) vingt-trois ouvrages captent l'eau souterraine du contexte hydrogéologique F dont les trois localisés à Longue-Rive (d).

7.2 Estimation des quantités d'eau prélevée par MRC

La carte #26 – *Utilisation de l'eau* (annexe numérique AN1) illustre les volumes d'eau de surface et d'eau souterraine consommées annuellement pour chacune des trois MRC. Ils sont estimés selon le protocole proposé par le GRIES (annexe numérique 13). Ce protocole présente l'ensemble des données utilisées et la méthodologie suivie. L'encadré suivant décrit certaines hypothèses considérées par le protocole

- 1) la consommation d'eau potable d'un individu est estimée à 250 l/jour;
- 2) la population alimentée en eau potable en dehors du réseau municipal est toujours alimentée par des installations privées qui captent l'eau souterraine;
- 3) les installations agricoles sont toutes alimentées en eau potable à partir d'eau souterraine captée par des puits individuels;
- 4) la consommation d'eau potable par type d'élevage est tirée de chartes de consommation d'eau par type d'animaux fournies par le MAPAQ;
- 5) la consommation industrielle-commerciale-institutionnelle correspond aux volumes restants de l'eau potable distribuée par les réseaux (après avoir soustrait la consommation domestique et les pertes) et aux volumes indiqués dans le registre des grands préleveurs fournis par le MDDEFP;
- 6) les pertes en réseau sont estimées à 20% de l'eau distribuée annuellement par le réseau.

7.2.1 Eau de surface

En plus des cinq municipalités qui alimentent leur population en eau potable à partir d'eau de surface (tableau 7-1), quelques industries utilisent cette ressource dans leur procédé, ce qui nécessite des volumes importants. Les volumes estimés d'eau de surface consommée annuellement par MRC sont présentés au tableau 7-2. Selon ce tableau, la consommation d'eau de surface se fait en grande majorité, soit à 93,5%, par des installations privées qui appartiennent à des entreprises récréatives ou des industries, par exemples. La MRC de Charlevoix-Est consomme près de 90% des volumes annuels d'eau de surface pour l'ensemble du territoire de CHCN et la MRC de La Haute-Côte-Nord consomme le 10% restant. La MRC de Charlevoix consomme moins de 1% des volumes annuels en eau de surface pour l'ensemble du territoire CHCN, soit environ 90 800 m³/an.

Tableau 7-2 : Volumes estimés d'eau de surface distribuée annuellement provenant des réseaux municipaux ou d'installations privées.

<i>MRC</i>	<i>Distribués par le réseau municipal</i>		<i>Distribués par des installations privées</i>		<i>Volume total consommé annuellement</i>	
	<i>m³/an</i>	<i>%</i>	<i>m³/an</i>	<i>%</i>	<i>m³/an</i>	<i>%</i>
Charlevoix	89 501	98,6	1 302	1,4	90 803	100
Charlevoix-Est	168 255	1,4	11 858 612	98,6	12 026 867	100
La Haute-Côte-Nord	608 489	48,1	656 567	51,9	1 265 056	100
TOTAL	866 245	6,5	12 516 481	93,5	13 382 726	100

La figure 7-9a) montre que l'eau de surface distribuée par la MRC de Charlevoix provient en majorité des réseaux municipaux tandis que l'eau de surface distribuée par la MRC de Charlevoix-Est provient presque uniquement d'installations privées. L'eau de surface distribuée dans la MRC de La Haute-Côte-Nord provient autant des réseaux municipaux que d'installations privées.

La figure 7-9b) illustre que la MRC de La Haute-Côte-Nord distribue 70% de la totalité de l'eau de surface distribuée par les réseaux municipaux. La MRC de Charlevoix-Est distribue près de la totalité de l'eau de surface provenant des installations privées.

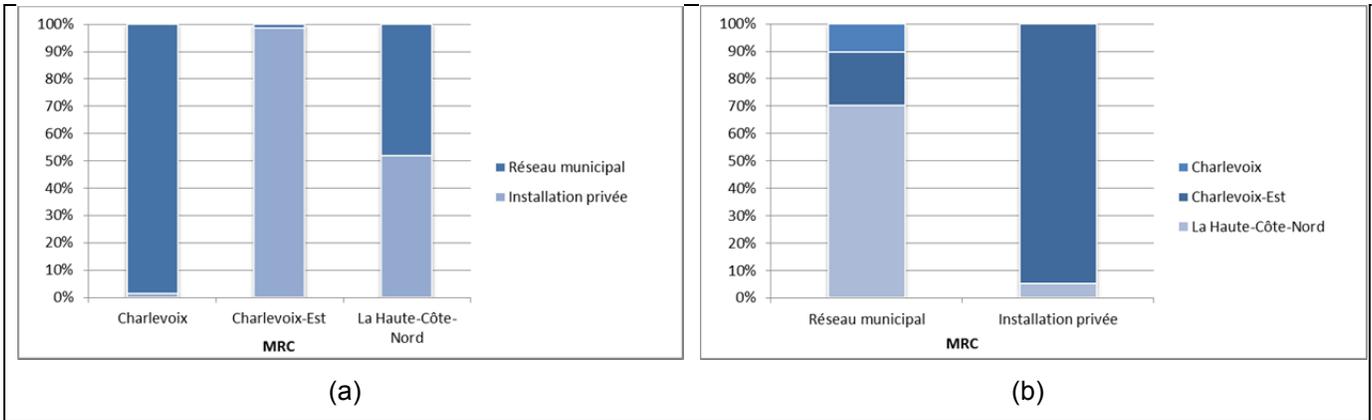


Figure 7-9 : Proportions des volumes annuels estimés d'eau de surface distribuée par les réseaux municipaux et les installations privées a) par MRC et b) pour l'ensemble du territoire.

7.2.2 Eau souterraine par catégories d'usage

L'eau souterraine distribuée par les réseaux municipaux ou par les puits individuels sert à différents usages qui se divisent en trois catégories : domestique, agricole et industriel-commercial-institutionnel (ICI). Une quatrième catégorie correspond aux pertes dans les réseaux d'aqueduc. Les volumes pour les différents usages sont estimés suivant le protocole du GRIES (annexe numérique AN13). La carte #26 – *Utilisation de l'eau* (annexe numérique AN1) présente les volumes d'eau souterraine attribués aux différents usages pour chacune des MRC du territoire de CHCN. Le tableau 7-3 montre que le volume total d'eau souterraine consommée s'estime à 6 296 592 m³/an.

- 52% de ce volume sert à l'alimentation en eau potable pour usage domestique;
- 8% sert pour l'approvisionnement en eau souterraine pour l'usage agricole, c'est-à-dire pour les fermes d'élevage;
- 25% sert à l'approvisionnement en eau potable pour la catégorie des ICI;
- 15% fuit par les réseaux de distribution ce qui constitue une perte.

Le tableau 7-3 montre aussi que :

- la MRC de Charlevoix-Est consomme 53% de toute l'eau souterraine consommée sur le territoire de CHCN pour 39% de la population totale;
- la MRC de Charlevoix consomme 33% de toute l'eau souterraine captée et sa population correspond à 33% de la population totale pour le territoire d'étude;
- la MRC de La Haute-Côte-Nord utilise 14% du volume total d'eau souterraine utilisé pour le territoire de CHCN et sa population correspond à 28% de la population totale.

Tableau 7-3 : Volumes estimés d'eau souterraine consommée annuellement pour chacune des quatre catégories d'usage.

MRC	Population ¹		Usage ² domestique		Usage ² agricole		Usage ² ICI		Pertes ² en réseau		TOTAL ³	
	Nbre	%	m ³ /an	%	m ³ /an	%	m ³ /an	%	m ³ /an	%	m ³ /an	%
Charlevoix	13 338	33	1 100 384	53	311 251	15	362 969	17	318 069	15	2 092 673	33
Charlevoix-Est	16 046	39	1 429 796	43	132 482	4	1 197 364	36	585 661	18	3 345 303	53
La Haute-Côte-Nord	11 546	28	720 901	84	35 636	4	21 550	3	80 529	9	858 616	14
TOTAL	40 930	100	3 251 081	52	479 369	8	1 581 884	25	984 259	15	6 296 592	100

¹ : % de la population totale dans CHCN;

² : % pour cet usage ou les pertes dans la MRC;

³ : % de la consommation totale dans CHCN.

7.2.2.1 Usage domestique

La majeure partie de l'eau souterraine utilisée pour chacune des MRC sert à un usage domestique (tableau 7-3), soit 53% pour la MRC de Charlevoix, 43% pour la MRC de Charlevoix-Est et 84% pour la MRC de La Haute-Côte-Nord.

Le pourcentage de la population s'alimentant en eau potable à partir d'eau souterraine a augmenté de façon significative depuis la publication d'une étude réalisée en 2000 par le ministère de l'Environnement du Québec (chapitre 1; tableau 1-1). Ceci correspond à l'application en 2001 du Règlement sur la qualité de l'eau potable qui a resserré les normes de potabilité de l'eau. En considérant la population totale des trois MRC, 46% de la population était alimentée en eau potable en 2000 à partir d'eau souterraine provenant d'un réseau ou de puits individuels (tableau 1-1; figure 7-10). Depuis, plusieurs municipalités ont choisi l'eau souterraine comme source d'alimentation en eau potable, si bien que la population totale du territoire de CHCN s'alimentant en eau potable à partir d'eau souterraine atteint 87% en 2011 (figure 7-10).

Tableau 7-4 : Pourcentage de la population, en 2000, qui s'alimente en eau potable à partir d'eau de surface et souterraine pour chacune des MRC.

MRC	Données de 2000			Données de 2011*		
	Population totale	Population alimenté en eau potable à partir d'eau souterraine		Population totale	Population alimenté en eau potable à partir d'eau souterraine	
	Nbre	Nbre	%	Nbre	Nbre	%
Charlevoix	12 916	6 329	49	13 338	12 059	90
Charlevoix-Est	16 165	4 203	26	16 046	15 669	98
La Haute-Côte-Nord	13 155	8 814	67	11 278	7 900	70
TOTAL	42 236	19 346	46	40 908	35 628	87

* Les données de 2011 sont les données les plus récentes de Statistique Canada.

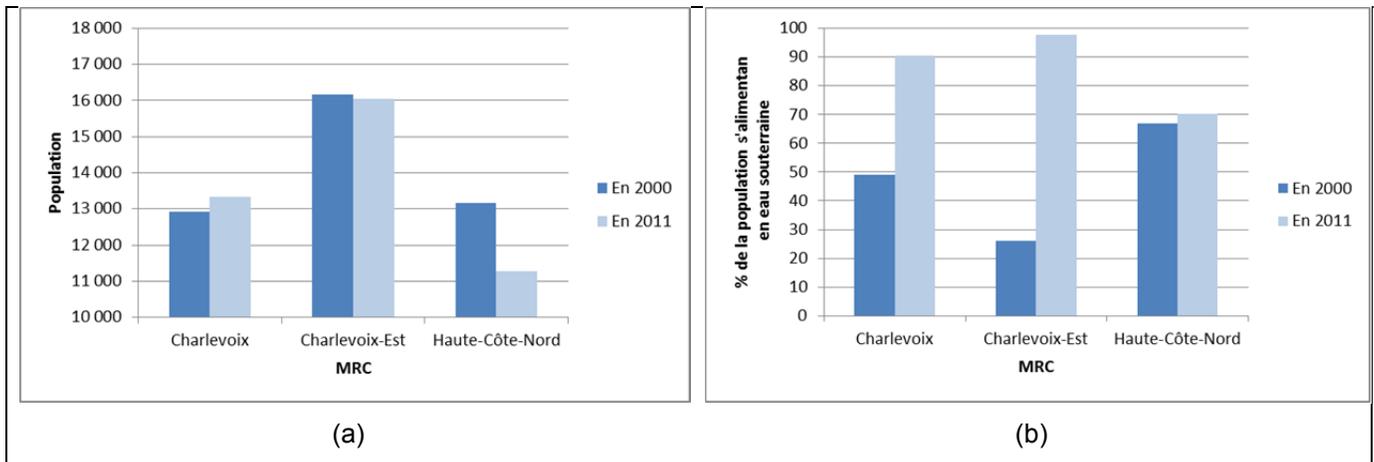


Figure 7-10 : a) Évolution de la population entre 2000 et 2011 et b) augmentation de la consommation d'eau souterraine pour l'alimentation en eau potable.

7.2.2.2 Usage agricole

L'estimation des volumes d'eau souterraine pour l'usage agricole considère uniquement les fermes d'élevage (annexe numérique AN13). Ainsi, si des fermes de culture (champs, serres, jardins) ont recours à l'irrigation, elles ne sont pas considérées dans cet usage, ce qui constitue une limite à la méthode.

Les principaux types d'élevage présents sur l'ensemble du territoire de CHCN correspondent à des élevages de porcs pour l'engraissement, de poulets à griller, de bovins laitiers et de boucherie. Plusieurs autres types d'élevage sont également présents tels les élevages de chevaux, de veaux, de moutons, de chèvres, d'autres volailles.

Le tableau 7-3 montre que 8% de l'eau souterraine totale prélevée sur le territoire de CHCN sert à un usage agricole. La proportion d'eau souterraine utilisée dans les différentes MRC pour l'usage agricole est de 15% pour la MRC de Charlevoix, et 4% pour les MRC de Charlevoix-Est et de La Haute-Côte-Nord. Bien que les proportions soient les mêmes pour les MRC de Charlevoix-Est et de La Haute-Côte-Nord, les volumes diffèrent. En effet, la MRC de Charlevoix-Est consomme 132 482 m³ d'eau souterraine par année destinée à un usage agricole et la MRC de La Haute-Côte-Nord un volume de 35 636 m³ d'eau souterraine pour les différents élevages. Pour la MRC de Charlevoix le volume estimé pour l'usage agricole correspond à 311 251 m³.

7.2.2.3 Usage industriel-commercial-institutionnel (ICI)

En plus des services à la communauté, aux institutions (écoles, hôpitaux, garderies, etc.), les activités industrielles-commerciales-institutionnelles (ICI) correspondent à des activités industrielles et récréatives liées au développement des industries touristiques et forestières.

Au total, 25% de l'eau souterraine prélevée sert aux usages de type ICI (tableau 7-3). La MRC de Charlevoix-Est est celle qui consomme le volume le plus important d'eau souterraine utilisée par les ICI, soit 1 197 364 m³/an, ce qui correspond à 36% de l'eau souterraine utilisée par cette MRC. La MRC de Charlevoix consomme 362 969 m³/an pour l'usage ICI, ce qui correspond à 17% du volume total d'eau souterraine qu'elle prélève, ce qui est presque équivalent au volume estimé pour l'usage agricole (15%) ainsi qu'aux pertes générées par les fuites des réseaux de distribution (15%). La MRC de La Haute-Côte-Nord utilise 21 550 m³ d'eau souterraine annuellement pour fournir la demande ICI, ce qui correspond à 3% du volume total d'eau souterraine prélevé par cette MRC.

7.2.2.4 Pertes en réseau

Les pertes en réseau se basent sur l'hypothèse que 20% de l'eau distribuée par les réseaux est perdue par les fuites. Ainsi, les pertes en réseau sont évaluées à 15% du volume total d'eau souterraine prélevée sur le territoire de CHCN (réseaux et hors réseaux, c'est-à-dire puits domestiques, puits agricoles et ICI). Cette proportion de perte représente deux fois plus que le volume total d'eau souterraine attribué aux usages agricoles.

Sachant que la Stratégie québécoise d'économie d'eau potable du ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (MAMROT) vise la réduction des pertes d'eau en réseau à moins de 20% de l'eau distribuée, il y a fort à parier que la moyenne des pertes en réseau est supérieure à 20%. Donc, les quantités d'eau correspondant aux pertes sont probablement sous-estimées.

Les pertes en réseau sont évaluées à 15% de la consommation totale d'eau souterraine pour la MRC de Charlevoix, ce qui représente autant d'eau souterraine que le volume requis pour les besoins agricoles et les besoins des ICI. Pour la MRC de Charlevoix-Est, le volume d'eau souterraine perdu à cause des fuites des réseaux de distribution est évalué à 18%, ce qui représente environ la moitié du volume destiné aux usages domestiques et aux usages ICI. Les pertes de la MRC de La Haute-Côte-Nord sont évaluées à 9% du volume total, soit plus que les sommes des volumes attribués aux usages agricole et ICI.

7.2.2.5 Validité des volumes estimés d'eau souterraine utilisée

Les volumes d'eau souterraine consommée par type d'usage sont estimés d'après la méthodologie proposée par le protocole du GRIES (annexe numérique AN13), ce qui nécessite plusieurs simplifications. Pour valider la méthode utilisée, une étude a été réalisée dans le cadre d'un stage au sein de l'équipe du projet PACES-CHCN (Cyr-Parent, 2014). Cette étude a consisté à appliquer trois méthodes distinctes pour estimer les volumes d'eau souterraine utilisée pour chaque usage, ceci dans une municipalité sélectionnée sur le territoire, soit celle de Saint-Hilarion. La première méthode est celle proposée par le protocole du GRIES, la seconde est la méthode GRIES simplifiée qui a été appliquée par l'équipe du CERM lors de la réalisation du PACES Saguenay – Lac-Saint-Jean (SLSJ), et la troisième méthode consiste à effectuer une enquête téléphonique auprès des différents groupes d'usager, principalement ceux du milieu agricole et du milieu industriel.

Les volumes d'eau souterraine estimés à partir de ces méthodes sont présentés à la figure 7-11. Les principales conclusions indiquent que la méthode du GRIES simplifiée fait l'estimation la plus faible du volume d'eau souterraine consommée annuellement à Saint-Hilarion avec un total de 141 918 m³/an. Lorsque le volume est estimé à partir de la méthode proposée par le GRIES, le volume d'eau souterraine consommée annuellement pour la municipalité correspond à 154 532 m³/an, soit environ 8% de plus qu'avec la méthode simplifiée. La méthode d'enquête téléphonique estime les volumes les plus élevés, soit un total de 181 944 m³/an. Cette méthode semble la plus juste parce qu'elle utilise moins de simplifications et qu'elle considère plus de données récoltées sur le terrain (enquête téléphonique) auprès d'un grand nombre d'utilisateurs d'eau souterraine.

Les volumes estimés pour les usages domestiques sont tous identiques. Les méthodes se distinguent dans l'estimation des volumes d'eau souterraine destiné aux usages agricoles et ceux destinés aux usages ICI.

La façon la plus efficace d'estimer les volumes d'eau consommée annuellement consisterait à prendre des mesures et à faire un suivi régulier sur une longue période de temps (au moins annuelle). Ainsi, l'utilisation de compteurs d'eau permettrait de connaître plus précisément les volumes consommés annuellement.

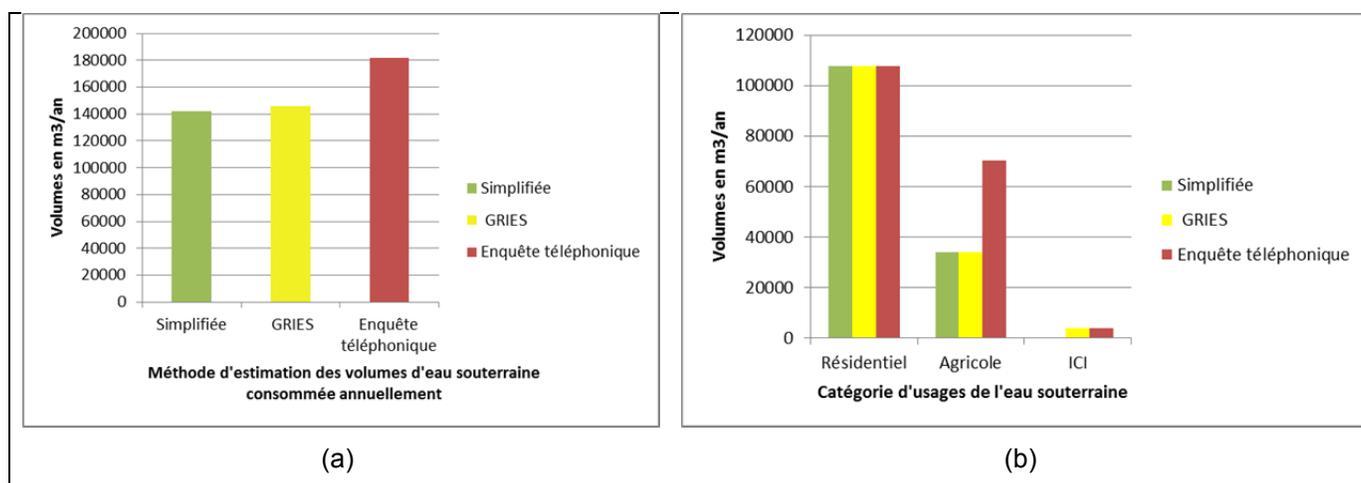


Figure 7-11 : Estimations des volumes d'eau souterraine consommés annuellement
a) par méthodes et b) par catégories d'usages

7.2.3 Eau souterraine et eau de surface

Les volumes d'eau souterraine consommée annuellement sont également estimés selon le protocole du GRIES (annexe numérique AN13). Le tableau 7-5 présente les volumes estimés et les proportions d'eau de surface et souterraine consommée annuellement pour chacune des trois MRC (voir la carte #26 – *Utilisation de l'eau*). Près de 20 000 000 m³ d'eau sont consommés annuellement pour l'ensemble du territoire de CHCN. Les 2/3 de l'eau consommée pour l'ensemble du territoire provient d'eau de surface et 1/3 d'eau souterraine. La MRC de Charlevoix-Est consomme 78% de l'eau totale consommée pour le territoire CHCN répartie suivant ces proportions : 78% correspond à de l'eau de surface et 22% à de l'eau souterraine. Les deux autres MRC, Charlevoix et La Haute-Côte-Nord, consomment 11% chacune de la totalité de l'eau consommée annuellement mais leur proportion d'eau de surface et d'eau souterraine consommée est différente. En effet, la MRC Charlevoix consomme presque uniquement de l'eau souterraine tandis que la MRC La Haute-Côte-Nord consomme 60% d'eau de surface et 40% d'eau souterraine.

Tableau 7-5 : Volumes estimés d'eau de surface et souterraine consommée annuellement pour chaque MRC.

MRC	Eau de surface consommée annuellement		Eau souterraine consommée annuellement		Consommation totale eau de surface et souterraine	
	m ³ /an	% ¹	m ³ /an	% ¹	m ³ /an	% ²
Charlevoix	90 803	4	2 092 673	96	2 183 476	11
Charlevoix-Est	12 026 867	78	3 345 303	22	15 372 170	78
La Haute-Côte-Nord	1 265 056	60	858 616	40	2 123 672	11
TOTAL	13 382 726	68	6 296 592	32	19 679 318	100

¹ Les % correspondent se lisent par MRC.

² Le % correspond à la consommation totale pour le territoire de CHCN.

La figure 7-12 présente graphiquement les proportions indiquées au tableau 7-5. La figure 7-12a montre que près de 100% de l'eau prélevée sur le territoire de la MRC de Charlevoix provient d'eau souterraine. L'eau prélevée sur le territoire de la MRC de Charlevoix-Est provient à 80% d'eau de surface et à 20% d'eau souterraine. La

proportion d'eau souterraine prélevée sur le territoire de la MRC de La Haute-Côte-Nord est de 40% pour 60% d'eau de surface.

La figure 7-12b montre que le principal territoire à prélever de l'eau de surface est la MRC de Charlevoix-Est qui est également le plus grand consommateur d'eau souterraine avec près de 50% de l'eau souterraine prélevée sur l'ensemble de la région à l'étude. La MRC de La Haute-Côte-Nord prélève environ 10% d'eau de surface sur le volume total et 15% d'eau souterraine. Finalement, la MRC de Charlevoix prélève presque uniquement de l'eau souterraine qui correspond à 35% de la consommation totale d'eau souterraine pour l'ensemble du territoire.

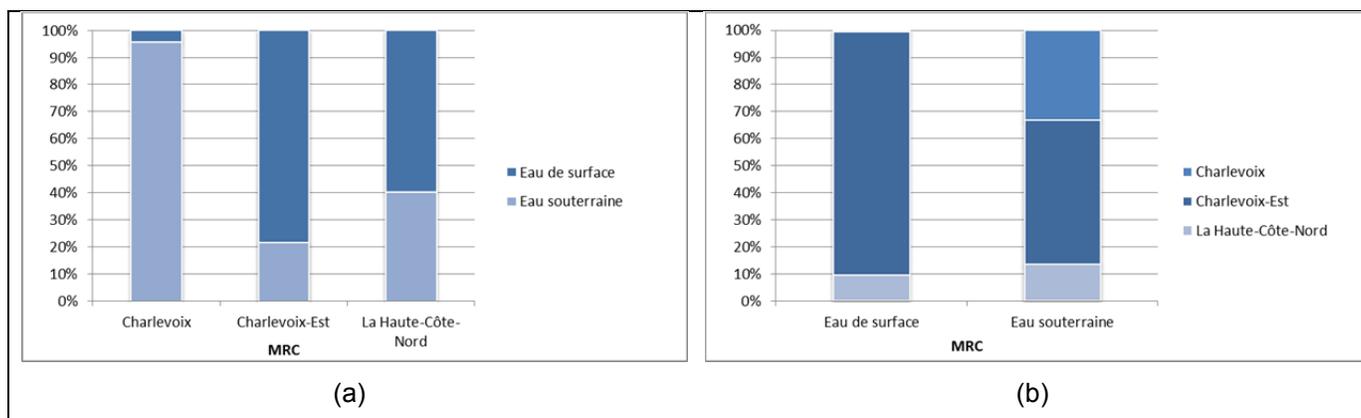


Figure 7-12 : Proportion des volumes annuels estimés d'eau de surface et d'eau souterraine prélevées a) par MRC et b) pour l'ensemble du territoire.

Le volume total d'eau consommée sur le territoire de CHCN correspond à 19 679 318 m³/an. L'eau de surface se distingue en deux catégories, soit l'eau de surface distribuée par les réseaux municipaux et l'eau de surface distribuée par des installations privées. L'eau souterraine se divise en quatre usages, soit domestique, agricole, industriel-commercial-institutionnel (ICI) et pertes en réseau.

Sur le territoire de la MRC de Charlevoix, un total de 2 183 476 m³/an d'eau (surface et souterraine) est consommée (tableau 7-5). L'eau de surface se scinde en deux catégories, l'eau de surface distribuée par les réseaux municipaux et celle distribuée par des installations privées. L'eau de surface consommée correspond à moins de 5% du total de l'eau consommée (figure 7-13a). Tandis que l'eau souterraine consommée correspond surtout à de l'eau destinée à l'alimentation en eau potable pour un usage domestique. L'eau souterraine consommée pour les usages agricole, ICI et en pertes en réseau est d'environ 15% pour chacun (figure 7-13a).

Sur le territoire de la MRC de Charlevoix-Est, un total de 15 372 170 m³/an d'eau (surface et souterraine) est consommée (tableau 7-5). L'eau de surface consommée correspond à 78% de la totalité de l'eau consommée (figure 7-13a). L'eau souterraine est surtout destinée aux usages domestiques et ICI avec environ 10% de l'eau totale consommée pour chacun de ces usages (tableau 7-5). Les pertes en réseau correspondent environ à 5% de la consommation totale d'eau pour cette MRC.

Sur le territoire de la MRC de La Haute-Côte-Nord, un total de 2 123 672 m³/an d'eau (surface et souterraine) est consommée (tableau 7-5). L'eau de surface consommée correspond à 60% de la totalité de l'eau consommée, ces eaux de surface proviennent autant des réseaux municipaux que des installations privées (tableau 7-5). L'eau souterraine consommée sert surtout à l'alimentation en eau potable pour un usage domestique qui correspond à près de 35% de la quantité totale d'eau consommée. Les pertes d'eau souterraine en réseau sont estimées à 5% (tableau 7-5).

La consommation d'eau de surface de la MRC de Charlevoix-Est s'estime à 11 858 612 m³/an (figure 7-13b), ce qui correspond à 60% du volume annuel total estimé pour l'ensemble du territoire. L'eau souterraine consommée

sert majoritairement à des usages domestiques pour les territoires des trois MRC. L'eau souterraine prélevée sur le territoire de la MRC de Charlevoix-Est sert également en grande partie aux usages ICI (figure 7-13b).

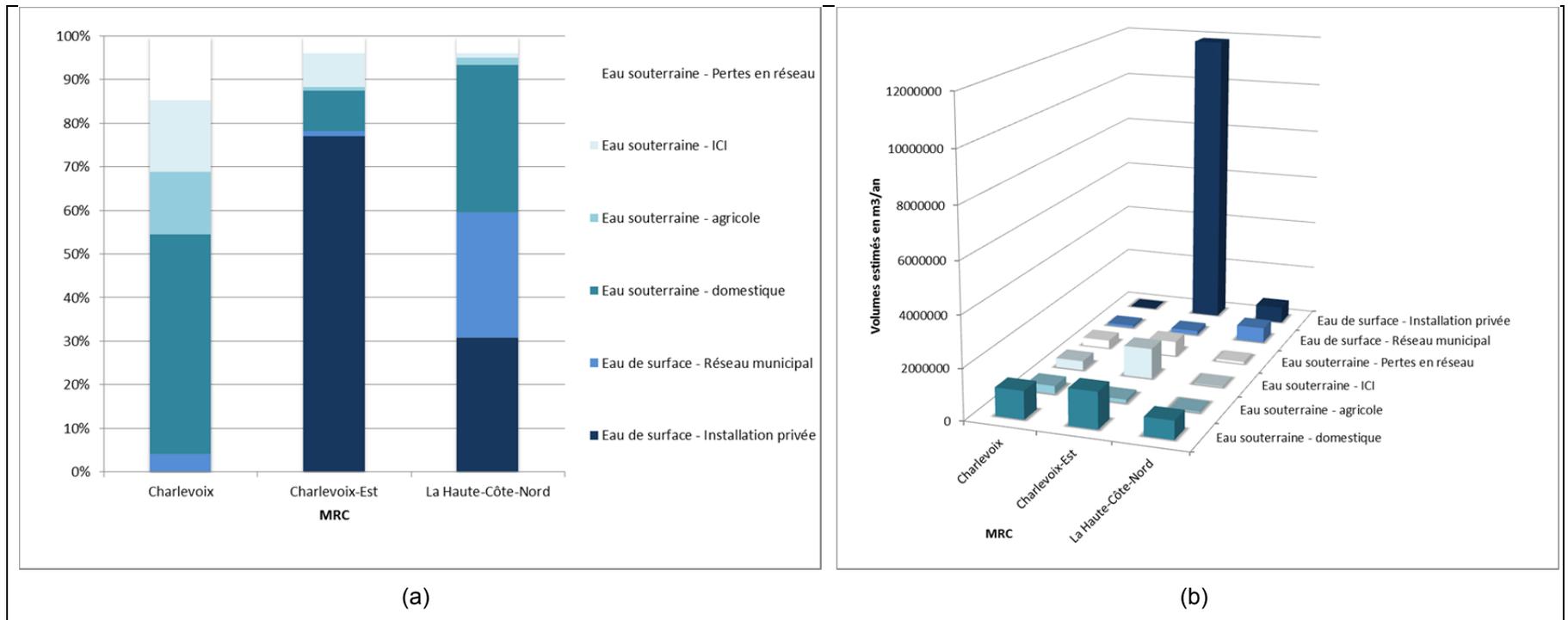


Figure 7-13 : Volumes annuels estimés d'eau de surface et d'eau souterraine consommés par MRC présentés a) sous forme de proportion et b) en m³/année.

7.3 Qualité de la ressource

Au Québec la qualité de l'eau potable est régie par le Règlement sur la qualité de l'eau potable (RQEP). Ce règlement présente, entre autres, les critères de potabilité déterminés par les concentrations de certains paramètres physico-chimiques et microbiologiques. Dans le cadre du PACES-CHCN, seuls certains paramètres physico-chimiques sont mesurés *in situ*, d'autres paramètres chimiques sont analysés en laboratoire. Les paramètres microbiologiques n'ont pas été analysés parce que leur concentration peut varier dans des intervalles de temps très courts, voire quotidien. Aussi, les procédures de prélèvement d'échantillons établies par l'équipe du PACES-CHCN ne permettaient pas de respecter toutes les contraintes de conservation des échantillons destinés aux analyses microbiologiques.

L'eau distribuée par les réseaux municipaux est contrôlée de façon régulière pour plusieurs paramètres, suivant la fréquence prescrite par le RQEP. L'eau souterraine prélevée dans le cadre du PACES-CHCN provient de puits individuels (privés) qui ne sont pas soumis par règlement à un suivi analytique régulier. De plus, le protocole d'échantillonnage d'eau souterraine du GRIES (annexe numérique AN5), requiert que l'eau brute soit prélevée, c'est-à-dire que l'eau soit prélevée en amont du système de traitement lorsque présent.

Les résultats des analyses hydrogéochimiques indiquent que certains paramètres ont des concentrations :

1. inférieures à la limite de détection de l'appareil analytique;
2. supérieures à la limite de détection de l'appareil analytique mais inférieures aux concentrations maximales acceptables (CMA) émises par le RQEP ou aux objectifs esthétiques (OE) émis par Santé Canada;
3. supérieures aux CMA émises par le RQEP ou aux OE émis par Santé Canada.

Seuls les résultats correspondant au troisième cas sont présentés dans les prochaines sections. En ce qui concerne les CMA, les paramètres dont les concentrations sont supérieures aux CMA dans certains cas sont les fluorures et l'uranium. Tandis que les dépassements observés pour les OE concernent des paramètres mesurés *in situ* (matières dissoutes totales ou MDT, pH et température) et certains paramètres analysés en laboratoire (aluminium, chlorures, dureté, fer, manganèse, sodium et sulfures).

Il est à noter que les propriétaires des puits où un ou des dépassements de norme ont été observés ont été avisés par téléphone et par courrier. Ils ont pu ainsi, au besoin, se référer aux agences de la santé de leur région. Aussi, plusieurs propriétaires de puits ne consomment pas cette eau ou encore la traite, ce qui permet de réduire les concentrations sous les CMA du RQEP ou sous les OE de Santé Canada.

7.3.1 **Concentrations maximales acceptables selon le RQEP**

Pour ce qui est de la potabilité pour les paramètres physico-chimiques, les substances inorganiques et organiques doivent respecter les concentrations maximales acceptables (CMA) selon le RQEP. Dans le cadre du PACES-CHCN, seuls certains paramètres concernant les substances inorganiques considérées dans le RQEP ont été analysés, ils sont présentés au tableau 7-6. Ces paramètres peuvent avoir des incidences sur la santé s'ils excèdent les CMA.

Tableau 7-6 : Paramètres concernant les substances inorganiques analysés dans le cadre du PACES-CHCN et qui sont considérés dans le Règlement sur la qualité de l'eau potable; ces paramètres doivent respecter la concentration maximale acceptable.

<i>Substances inorganiques</i>	<i>Unités</i>	<i>Concentration maximale acceptable</i>
Antimoine	mg/l	0,006
Arsenic	mg/l	0,010
Baryum	mg/l	1,0
Bore	mg/l	5,0
Cadmium	mg/l	0,005
Chrome	mg/l	0,050
Fluorures	mg/l	1,50
Nitrites et nitrates	mg/l	10,0
Plomb	mg/l	0,010
Sélénium	mg/l	0,010
Uranium	mg/l	0,020

Dans le cadre du PACES-CHCN, un total de 14 échantillons répartis en 10 stations dépassent les CMA pour les fluorures ou pour l'uranium (tableau 7-7), tandis que les autres paramètres analysés respectent les CMA pour tous les échantillons. La carte #3.24 – *Qualité de l'eau en fonction des concentrations maximales acceptables (CMA)* présente les résultats pour les dépassements en fluorures et en uranium. Une seule station, CHCN-063, présente des dépassements pour ces deux paramètres et ce lors des deux campagnes d'échantillonnage; tandis que les neuf autres stations présentent des dépassements pour un seul des deux paramètres dépassant les CMA selon le RQEP (tableau 7-7).

Tableau 7-7 : Stations et échantillons dont les concentrations pour les fluorures et l'uranium sont supérieures aux CMA selon le RQEP.

Station	Échantillon	Concentration (mg/L)	
		Fluorures	Uranium
		1,5	0,02
CHCN-010	CHCN-010-2013	1,8	
	CHCN-133-2014	1,7	
CHCN-044	CHCN-044-2013	3,9	
	CHCN-103-2014	2,7	
CHCN-047	CHCN-047-2013	2,1	
	CHCN-106-2014	1,6	
CHCN-063	CHCN-063-2013	4,5	0,022
	CHCN-100-2014	4,4	0,022
CHCN-070	CHCN-070-2013	1,7	
CHCN-084	CHCN-138-2014		0,022
CHCN-091	CHCN-091-2013		0,021
CHCN-113	CHCN-113-2014	3,3	
CHCN-128	CHCN-128-2014		0,022
CHCN-143	CHCN-143-2014	1,6	
10 stations	14 échantillons	11 dépassements en fluorures	5 dépassements en uranium

Fluorures

Sept stations correspondant à onze échantillons indiquent des dépassements des CMA pour les fluorures (tableau 7-7). Les concentrations analysées peuvent atteindre trois fois la CMA. Quatre stations pour un total de sept échantillons se localisent sur le territoire de la Haute-Côte-Nord, tandis que trois stations pour un total de quatre échantillons se localisent sur le territoire des MRC de Charlevoix et de Charlevoix-Est (figure 7-14a). Des sept stations, six captent l'eau provenant d'un aquifère rocheux fracturé (semi-perméable) et un seul capte l'eau provenant d'un aquifère granulaire (perméable).

Uranium

Quatre stations correspondant à cinq échantillons présentent des dépassements en CMA pour l'uranium tel que montré au tableau 7-7 et à la figure 7-14b. Les concentrations analysées dépassent au plus de 10% la CMA. Ces échantillons proviennent d'aquifères rocheux fracturés, une station se localise sur le territoire de la Haute-Côte-Nord et les trois autres sur le territoire des MRC de Charlevoix et de Charlevoix-Est.

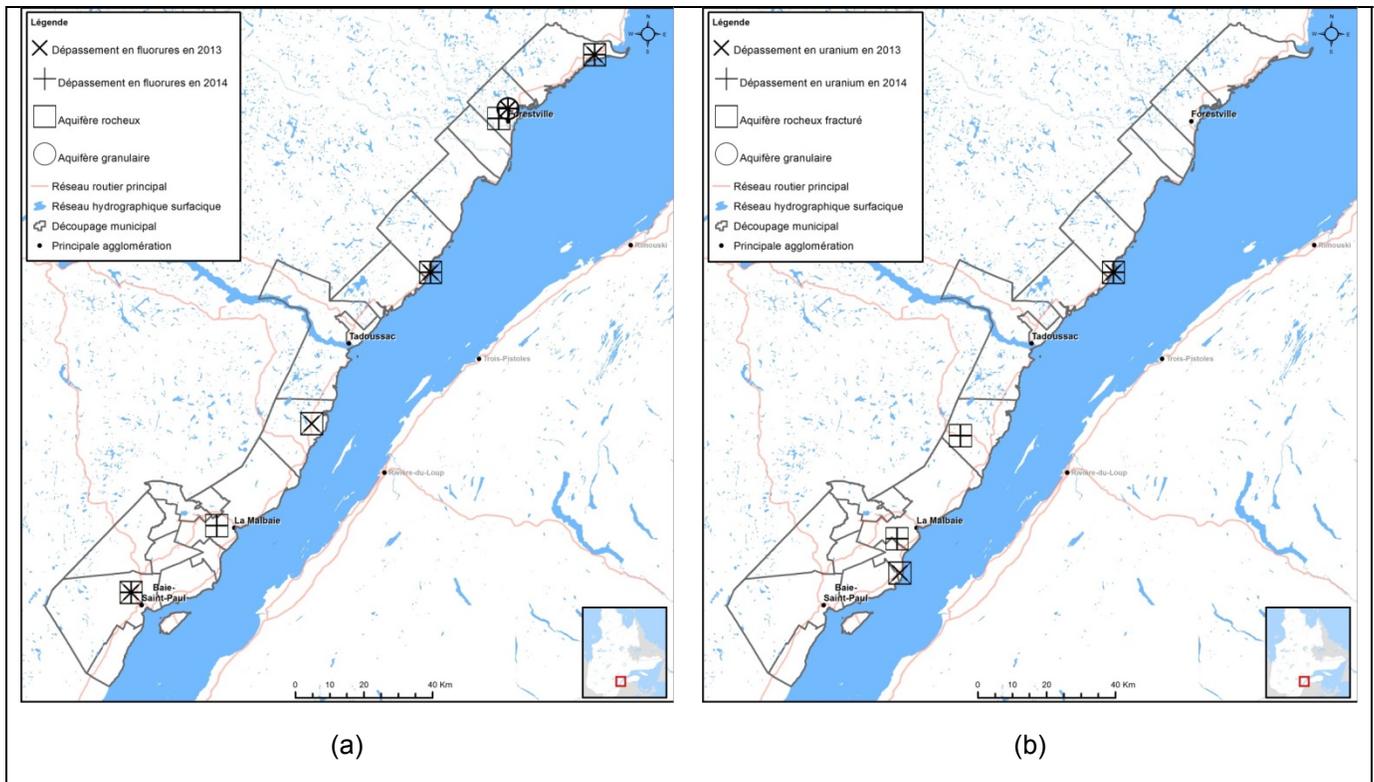


Figure 7-14 : Localisation des échantillons d'eau souterraine montrant des dépassements de CMA pour a) les fluorures et b) l'uranium.

7.3.2 Objectifs esthétiques

Parmi les paramètres mesurés *in situ* et analysés en laboratoire, certains paramètres sont soumis à des objectifs esthétiques (OE) selon Santé Canada. Les OE ne sont pas reconnus pour avoir des incidences sur la santé mais ils peuvent être incommodants pour ce qui est du goût, de l'odeur. Ils peuvent également avoir une incidence sur la détérioration de la plomberie et des appareils électroménagers. Le tableau 7-8 présente les paramètres analysés dans le cadre du PACES-CHCN et pour lesquels des objectifs esthétiques sont recommandés par Santé Canada.

Tableau 7-8 : Paramètres analysés dans le cadre du PACES-CHCN et pour lesquels des objectifs esthétiques sont recommandés par Santé Canada.

Paramètres	Unités	Objectifs esthétiques
<i>Paramètres mesurés in situ</i>		
Matières dissoutes totales	mg/l	500
pH		6,5 – 8,5
Température	°C	15
<i>Paramètres analysés en laboratoire</i>		
Aluminium	mg/l	0,1
Chlorure	mg/l	250
Cuivre	mg/l	1
Dureté	mg/l	200
Fer	mg/l	0,3
Manganèse	mg/l	0,05
Sodium	mg/l	200
Sulfate	mg/l	500
Sulfures	mg/l	0,05
Zinc	mg/l	5

7.3.2.1 Paramètres mesurés *in situ*

Dans le cadre du PACES-CHCN, un total de 56 échantillons répartis en 46 stations dépassent les OE pour un ou plusieurs des trois paramètres suivants mesurés *in situ* : matières dissoutes totales (MDT), pH et température. Les valeurs des dépassements sont indiquées au tableau 7-9. La carte #3.25 – *Qualité de l'eau en fonction des objectifs esthétiques* présente les résultats pour les dépassements.

Tableau 7-9 : Stations et échantillons dont les concentrations ne correspondent pas aux objectifs esthétiques (OE) selon Santé Canada pour les paramètres mesurés *in situ*.

Station	Échantillon	Concentrations		
	Paramètres	MDT (mg/l)	pH	Température (°C)
	Objectif esthétique	500	6,5 – 8,5	15
CHCN-003	CHCN-003-2013		6,38	
CHCN-010	CHCN-010-2013		8,77	
	CHCN-133-2014		8,55	
CHCN-011	CHCN-011-2013			15,5
CHCN-012	CHCN-012-2013		9,42	
CHCN-013	CHCN-013-2013		5,81	
	CHCN-136-2014		5,90	
CHCN-015	CHCN-015-2013		8,61	
CHCN-016	CHCN-016-2013			19,2
CHCN-017	CHCN-017-2013		5,92	
CHCN-022	CHCN-022-2013		8,86	
CHCN-023	CHCN-023-2013		6,49	
CHCN-027	CHCN-027-2013		6,31	
CHCN-029	CHCN-029-2013		6,40	
CHCN-030	CHCN-030-2013		6,23	
CHCN-037	CHCN-037-2013		6,32	
CHCN-038	CHCN-038-2013		6,05	
CHCN-039	CHCN-039-2013	527		
	CHCN-099-2014	591		
CHCN-042	CHCN-042-2013		5,78	
CHCN-044	CHCN-044-2013	791	9,04	
	CHCN-103-2014	708	8,59	
CHCN-049	CHCN-049-2013		5,41	
CHCN-050	CHCN-110-2014		8,83	
CHCN-055	CHCN-055-2013	855		
	CHCN-118-2014	933		
CHCN-056	CHCN-056-2013		5,89	

Station	Échantillon		Concentrations		
	Paramètres		MDT	pH	Température
	Objectif esthétique		(mg/l)		(°C)
		500	6,5 – 8,5	15	
	CHCN-105-2014			6,48	
CHCN-058	CHCN-058-2013			5,52	
CHCN-059	CHCN-059-2013			5,95	
	CHCN-102-2014			6,32	
CHCN-060	CHCN-060-2013			5,45	
CHCN-061	CHCN-061-2013			5,56	
CHCN-063	CHCN-063-2013	1910		8,59	
	CHCN-100-2014	2009		8,71	
CHCN-064	CHCN-064-2013			9,00	
CHCN-066	CHCN-066-2013			6,42	
CHCN-067	CHCN-067-2013			5,63	
	CHCN-109-2013			6,23	
CHCN-068	CHCN-068-2013				15,4
CHCN-071	CHCN-071-2013	763			
	CHCN-111-2014	762			
CHCN-073	CHCN-073-2013			5,93	
CHCN-087	CHCN-087-2013			8,59	
CHCN-088	CHCN-088-2013			8,68	
CHCN-090	CHCN-090-2013	553			
CHCN-095	CHCN-095-2013			5,96	
CHCN-096	CHCN-096-2013			5,86	
CHCN-097	CHCN-097-2013			9,42	
CHCN-113	CHCN-113-2014			9,61	
CHCN-114	CHCN-114-2014			6,36	
CHCN-115	CHCN-115-2014			5,92	
CHCN-122	CHCN-122-2014			8,53	
CHCN-134	CHCN-134-2014			8,74	
CHCN-140	CHCN-140-2014			6,48	
CHCN-147	CHCN-147-2014			6,26	
46 stations	56 échantillons	11 dépassements en MDT	46 dépassements du pH	3 dépassements de la température	

Matières dissoutes totales (MDT)

Six stations correspondant à onze échantillons indiquent des dépassements des OE pour les MDT. Des dépassements pouvant atteindre jusqu'à quatre fois les OE sont mesurés. Quatre stations pour un total de huit échantillons se localisent sur le territoire de la Haute-Côte-Nord, tandis que deux stations pour un total de trois échantillons se localisent sur le territoire des MRC de Charlevoix et de Charlevoix-Est (figure 7-15a). Des six stations, cinq captent l'eau provenant d'un aquifère rocheux fracturé (semi-perméable) et un seul capte l'eau provenant d'un aquifère granulaire (perméable).

pH

Trente-neuf stations correspondant à quarante-six échantillons indiquent des dépassements des OE pour le pH. Environ la moitié se localise sur le territoire de la Haute-Côte-Nord, tandis que l'autre moitié se localise sur le territoire des MRC de Charlevoix et de Charlevoix-Est (figure 7-15b). De l'ensemble des stations, environ la moitié capte l'eau provenant d'un aquifère rocheux fracturé (semi-perméable) et l'autre moitié l'eau provenant d'un aquifère granulaire (perméable; figure 7-15b).

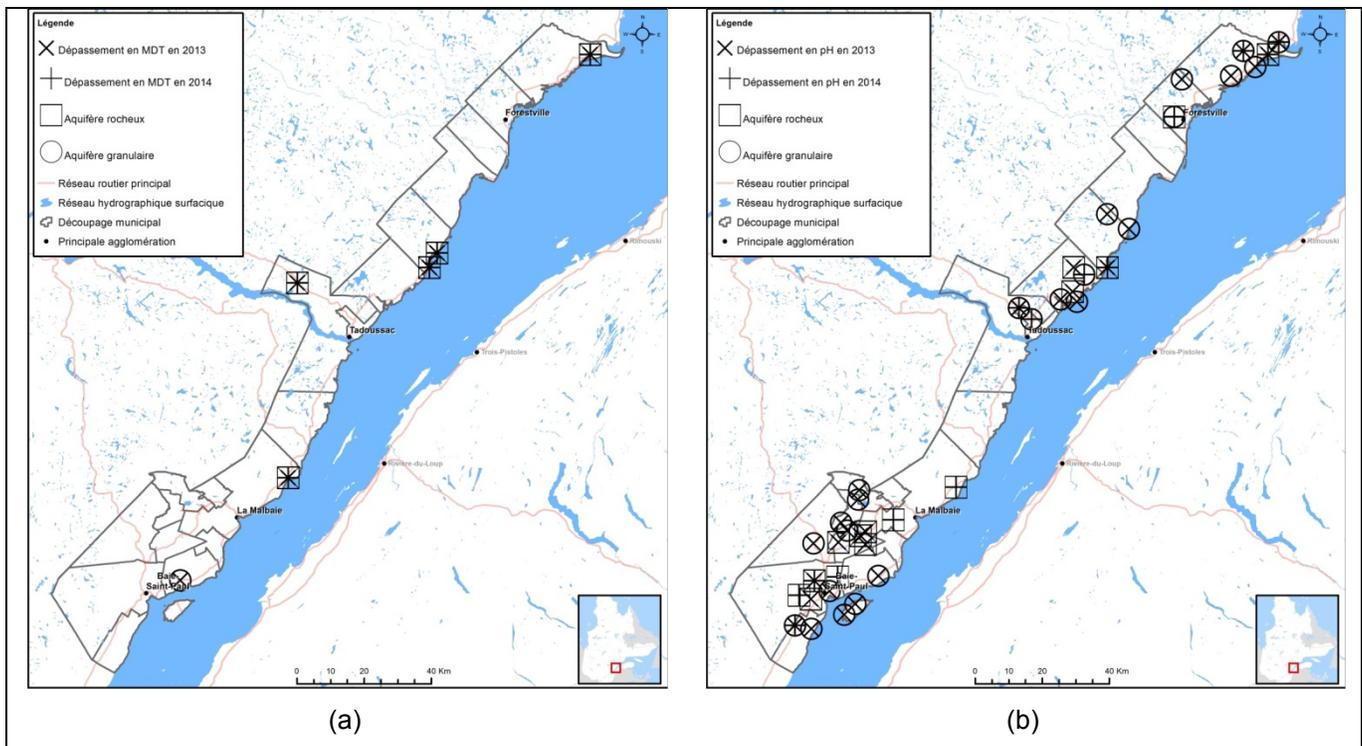


Figure 7-15 : Localisation des échantillons d'eau souterraine montrant des dépassements des OE pour les paramètres mesurés *in situ* tels a) les matières dissoutes totales et b) le pH.

Température

Trois stations correspondant à trois échantillons indiquent des dépassements des OE pour la température. Ces stations se localisent sur le territoire des MRC de Charlevoix et de Charlevoix-Est et captent l'eau provenant d'aquifères granulaires (perméable; figure 7-16).



Figure 7-16 : Localisation des échantillons d'eau souterraine montrant des dépassements des OE pour la température mesurée *in situ*.

7.3.2.2 Paramètres analysés en laboratoire

Dans le cadre du PACES-CHCN, un total de 32 échantillons répartis en 20 stations dépassent les OE pour l'un ou l'autre des paramètres analysés en laboratoire suivants : aluminium, dureté estimée, fer, manganèse, chlorures, sodium et sulfures. Les valeurs des dépassements sont indiquées au (tableau 7-10). La carte #3.25 – *Qualité de l'eau en fonction des objectifs esthétiques* présente les résultats pour les dépassements.

Tableau 7-10 : Stations et échantillons dont les concentrations pour certains paramètres sont supérieures aux objectifs esthétiques (OE) selon Santé Canada pour les paramètres analysés en laboratoire.

Station	Échantillon	Concentration (mg/l)							
		Paramètres	Aluminium	Dureté estimée	Fer	Manganèse	Chlorures	Sodium	Sulfures*
		Objectif esthétique	0,1	200	0,3	0,05	250	200	0,05
CHCN-001	CHCN-001-2013				1,4	0,78			
	CHCN-101-2014				1,7	0,95			
CHCN-010	CHCN-010-2013								0,44
CHCN-013	CHCN-013-2013				0,83	0,08			
	CHCN-136-2014				0,89	0,45			
CHCN-024	CHCN-024-2013								213
CHCN-038	CHCN-038-2013					0,11			
	CHCN-098-2014		0,11			0,11			
CHCN-039	CHCN-039-2013				1,1	0,49			
	CHCN-099-2014				1,1	0,42			
CHCN-044	CHCN-044-2013					0,07		230	
	CHCN-103-2014				0,87	0,27			
CHCN-050	CHCN-050-2013				0,53				
	CHCN-110-2014				0,63				
CHCN-055	CHCN-055-2013							318	22
	CHCN-118-2014							320	25
CHCN-056	CHCN-056-2013					0,08			
	CHCN-105-2014		0,12			0,08			
CHCN-058	CHCN-058-2013				1,4				
CHCN-059	CHCN-059-2013		0,37		0,32	0,06			
	CHCN-102-2014		0,73		0,73				
CHCN-060	CHCN-060-2013		0,17						
CHCN-063	CHCN-063-2013					0,06	550	540	

Station	Échantillon	Concentration (mg/l)						
		Aluminium	Dureté estimée	Fer	Manganèse	Chlorures	Sodium	Sulfures*
	Objectif esthétique	0,1	200	0,3	0,05	250	200	0,05
	CHCN-100-2014				0,05	580	620	
CHCN-065	CHCN-065-2013				0,08			
CHCN-071	CHCN-071-2013		369		0,76			
	CHCN-111-2014						240	
CHCN-076	CHCN-076-2013				0,19			
CHCN-085	CHCN-085-2013			9,9	0,37			
	CHCN-125-2014			9,6	0,36			
CHCN-090	CHCN-090-2013					260		
CHCN-114	CHCN-114-2014	0,11		15	0,97			
20 stations	32 échantillons	6 dép. en aluminium	4 dép. de la dureté estimée	17 dép. en fer	23 dép. en manganèse	5 dép. en chlorures	4 dép. en sodium	1 dép. en sulfures

* La totalité des paramètres a été analysée pour chaque échantillon, sauf les sulfures qui ont été analysés seulement pour deux échantillons, soit dans les cas où l'odeur était persistante lors du prélèvement de l'échantillon.

Aluminium

Cinq stations correspondant à six échantillons indiquent des dépassements des CMA pour l'aluminium. Des dépassements allant jusqu'à plus de sept fois les recommandations des OE sont analysés. Les cinq stations se localisent sur le territoire de la Haute-Côte-Nord et captent l'eau provenant d'un aquifère granulaire (perméable; figure 7-17a).

Dureté

Trois stations correspondant à quatre échantillons indiquent des dépassements des OE pour la dureté. Les dépassements montrent des concentrations allant jusqu'à une fois et demi l'OE sont observés. Deux stations se localisent sur le territoire des MRC de Charlevoix et de Charlevoix-Est, tandis qu'une station se localise sur le territoire de la MRC de La Haute-Côte-Nord (figure 7-17b). Les trois stations captent l'eau provenant d'un aquifère rocheux fracturé (semi-perméable).

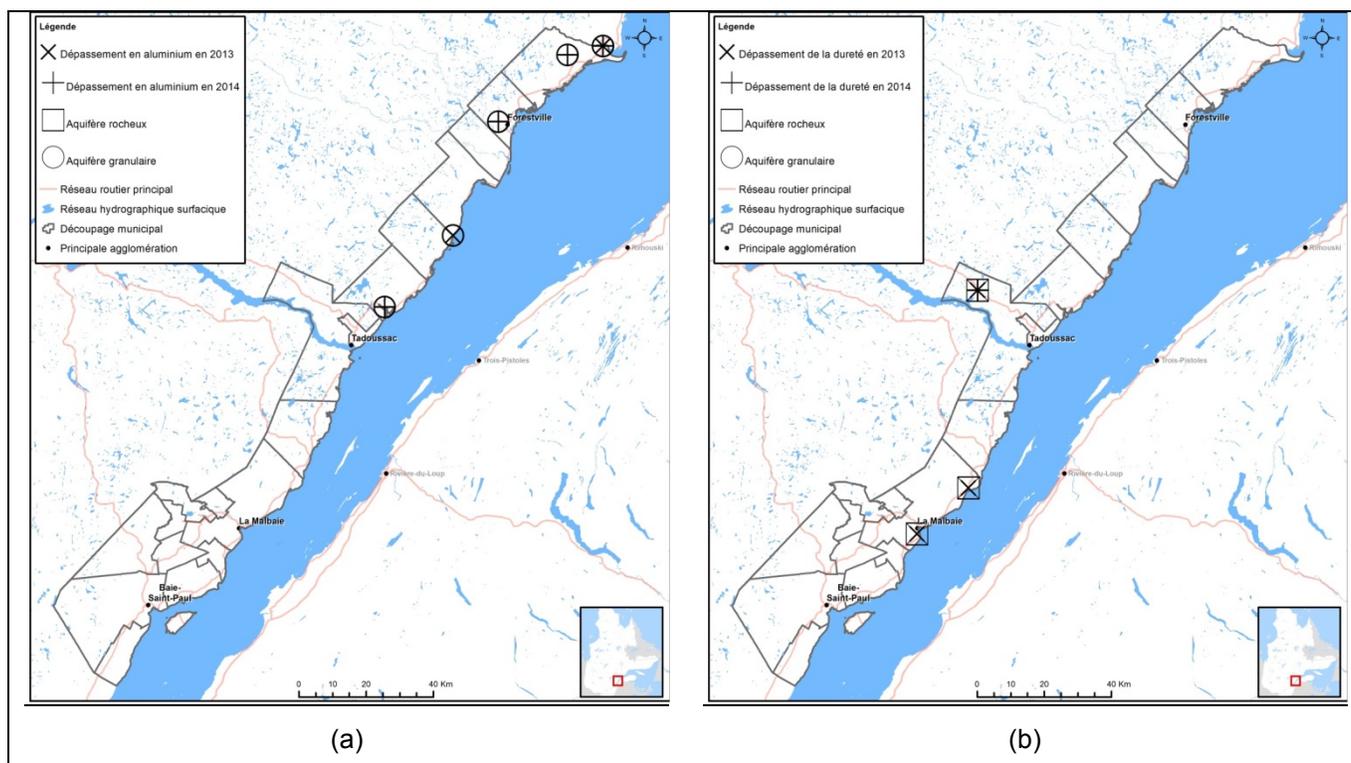


Figure 7-17 : Localisation des échantillons d'eau souterraine montrant des dépassements des OE pour a) l'aluminium et b) la dureté estimée.

Fer

Pour le fer, huit échantillons dépassent les objectifs esthétiques dont deux sont localisés dans la partie ouest de l'astroblème de Charlevoix et six sont dispersés sur le territoire de la Haute-Côte-Nord. Des dépassements peuvent être inférieurs à deux ou trois fois les OE recommandés mais peuvent également atteindre 30 à 50 à plus de 80 fois les recommandations. Des huit échantillons, quatre proviennent du socle rocheux fracturé (semi-perméable) et quatre autres proviennent des dépôts granulaires (perméables). Pour la majorité des échantillons, le fer n'est pas détecté lors de l'analyse. La figure 7-18a montre la répartition spatiale de la concentration en fer.

Manganèse

Quant au manganèse, treize échantillons dépassent les objectifs esthétiques dont quatre se localisent sur le territoire de Charlevoix et neuf sur le territoire de la Haute-Côte-Nord. Certains échantillons dépassent à peine les

recommandations des OE tandis que d'autres atteignent plus de quarante fois les recommandations. Des treize échantillons, neuf proviennent d'aquifères fracturés (semi-perméables) et quatre d'aquifères granulaires (perméables). Pour la majorité des échantillons le manganèse est détecté lors de l'analyse. Certains échantillons ont une concentration en manganèse inférieure à la limite de détection; ces échantillons se localisent principalement dans l'astroblème de Charlevoix et proviennent majoritairement d'aquifère fracturé tel que montré à la figure 7-18b.

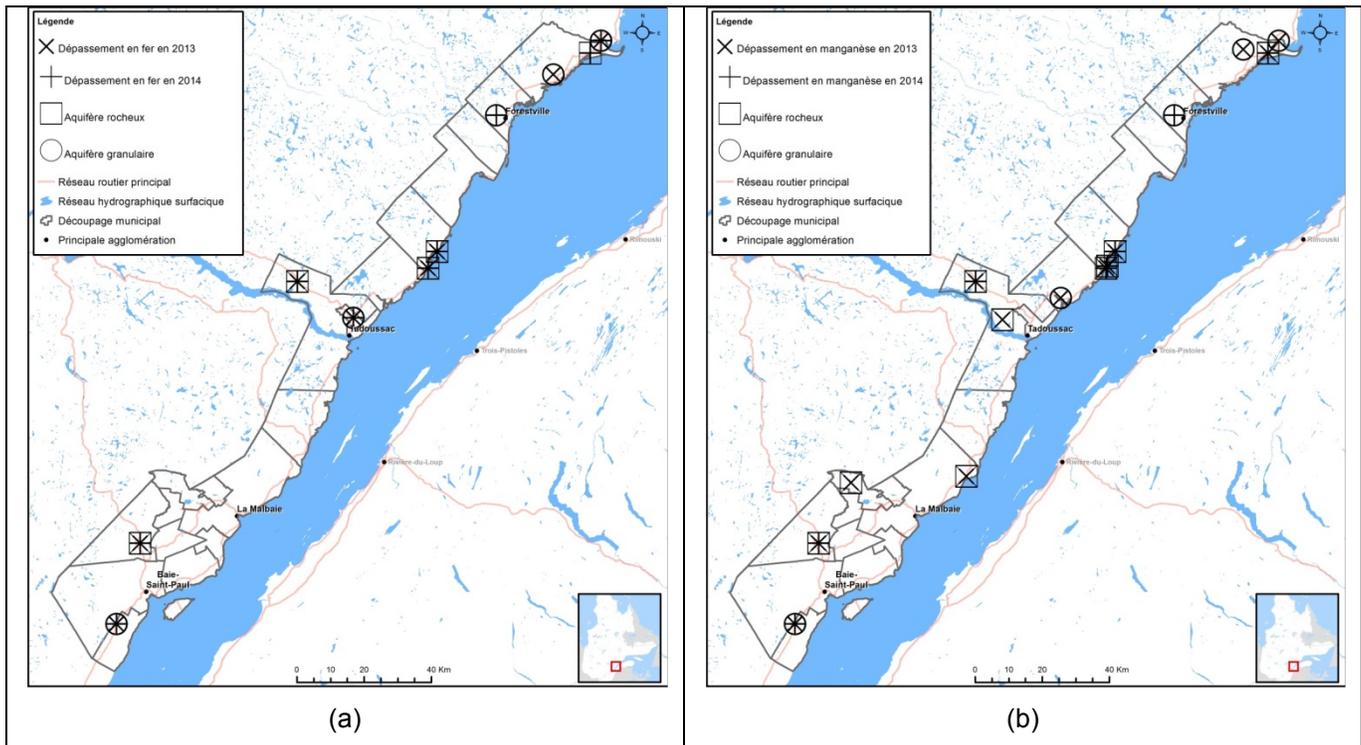


Figure 7-18 : Localisation des échantillons d'eau souterraine montrant des dépassements des OE pour a) le fer et b) le manganèse.

Chlorures

Les chlorures sont détectés dans tous les échantillons. Les dépassements sont entre deux et trois fois plus que les valeurs recommandées par les OE. Toutefois, seuls trois échantillons présentent des dépassements des objectifs esthétiques, dont deux localisés sur la Haute-Côte-Nord et provenant d'aquifères fracturés (semi-perméables), et un localisé dans l'astroblème de Charlevoix et provenant d'un aquifère granulaire (perméables; figure 7-19a).

Sodium

Le sodium est détecté dans tous les échantillons tels que le montre la figure 7-19b. Tout comme les chlorures, les dépassements sont entre deux et trois fois plus que les valeurs recommandées par les OE. Toutefois, seuls deux échantillons localisés sur la Haute-Côte-Nord, provenant d'aquifères fracturés (semi-perméables) et localisé à proximité du fleuve Saint-Laurent présentent des dépassements des objectifs esthétiques.

Sulfures

Les sulfures ont été analysés seulement pour deux échantillons provenant d'aquifères fracturés (semi-perméables) soit ceux qui ont présenté une forte odeur de soufre lors du prélèvement. L'échantillon localisé dans

la partie sud-ouest de l'astroblème de Charlevoix dépasse les objectifs esthétiques tandis que celui localisé sur la Haute-Côte-Nord a une concentration sous la limite de détection analytique (figure 7-19c).

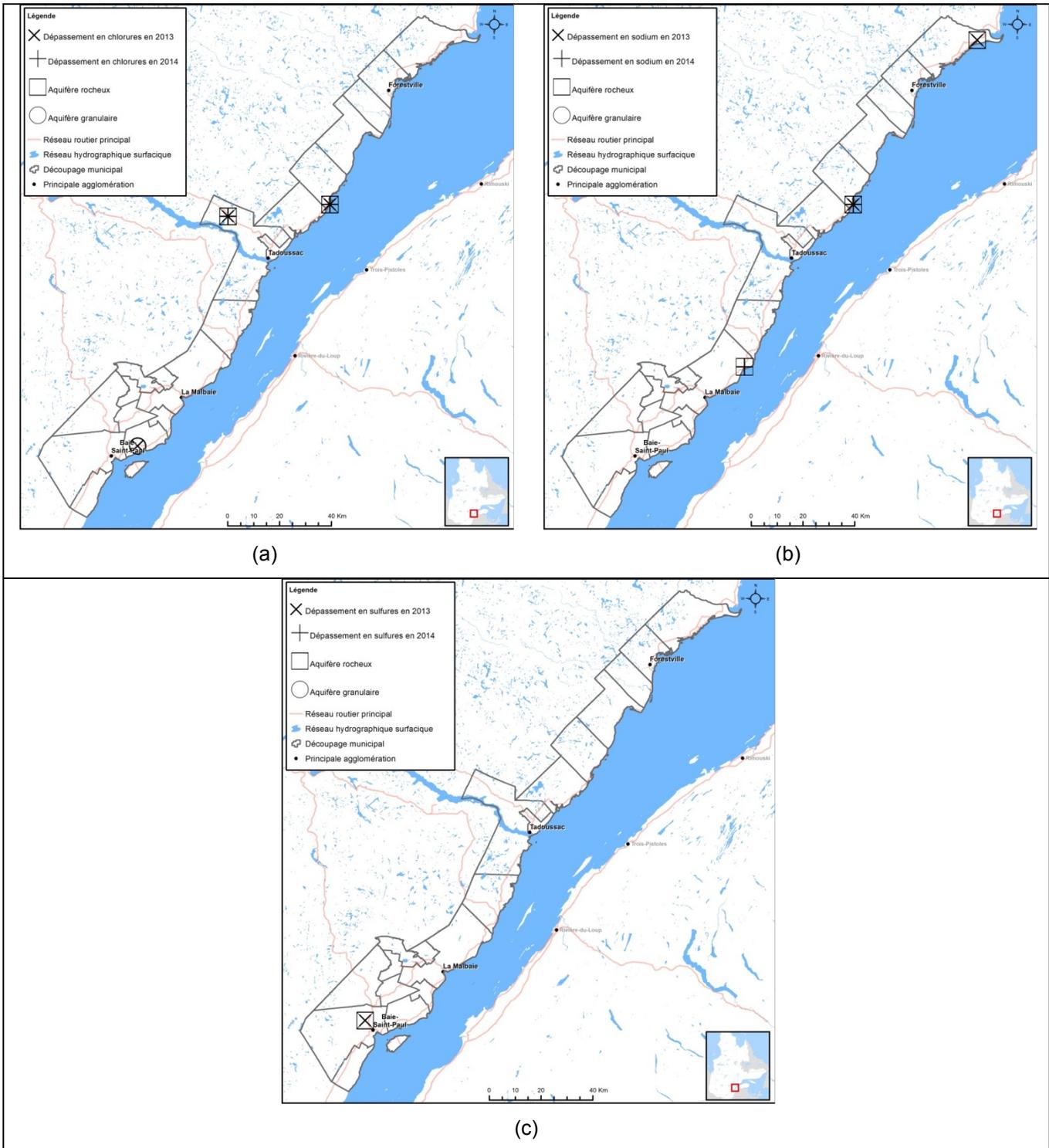


Figure 7-19 : Localisation des échantillons d'eau souterraine montrant des dépassements des objectifs esthétiques (OE) pour a) les chlorures, b) le sodium et c) les sulfures.

7.4 Vulnérabilité et protection de la ressource

La ressource en eau souterraine est une source d'alimentation en eau potable importante autant par le nombre de personnes qu'elle alimente que pour sa qualité qui rencontre, dans la majorité des cas, les critères de potabilité. Cette ressource est pourtant vulnérable à la contamination et doit être protégée, principalement lorsqu'elle est utilisée à des fins d'alimentation en eau potable mais également lorsqu'elle n'est pas captée.

Cette section présente une carte de vulnérabilité de l'eau souterraine évaluée selon l'indice DRASTIC et des moyens mis en place par le MDDELCC pour prévenir la contamination de l'eau souterraine captée, principalement les aires de protection et d'alimentation des ouvrages de captage. Finalement, une courte présentation des plans directeurs de l'eau élaborés par les OBV, principalement concernant les recommandations liées aux eaux souterraines.

7.4.1 Vulnérabilité des aquifères selon l'indice DRASTIC

Diverses méthodes d'estimation de la vulnérabilité sont reconnues et utilisées de par le monde. Murat (2000) distingue ainsi :

1. Les méthodes contextuelles ou cartographiques qui permettent l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines par les contextes hydrogéologiques représentatifs des conditions de vulnérabilité (méthode développée par le département des ressources naturelles du Minnesota).
2. Les méthodes des systèmes paramétriques qui assignent une valeur numérique ou un poids aux paramètres caractéristiques du milieu (DRASTIC, GOD).
3. Les méthodes analytiques et de modélisation numérique qui permettent de simuler le transport et l'écoulement de contaminants à l'aide d'équations mathématiques (FEFLOW, EV ARISK, SEEPW).

La vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination de surface pour le territoire de CHCN est définie d'après la méthode DRASTIC. Cette méthode paramétrique pondérée a été développée par la *U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA)*.

Comme l'illustre la figure 7-20, cette méthode est basée sur la pondération de sept paramètres dont la première lettre de chacun définit l'acronyme « DRASTIC ». Les valeurs obtenues pour chaque paramètre sont additionnées et leur somme donne une valeur caractéristique de la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination (Aller et al., 1987). La suite du texte reprend sommairement le contenu du protocole d'estimation de la vulnérabilité (annexe numérique AN14).

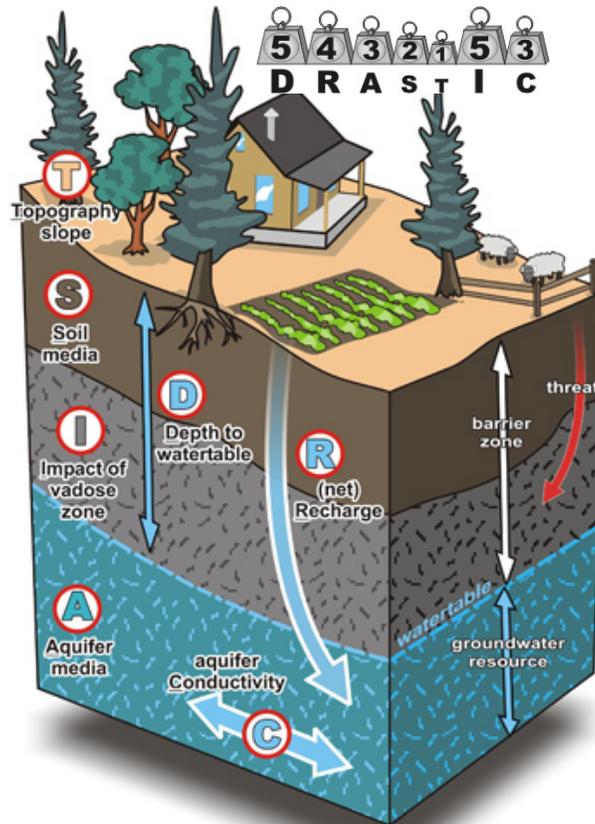


Figure 7-20 : Représentation schématique de la méthode DRASTIC et de la pondération des paramètres à la base de son évaluation (modifié de Franklin et Turner, 2009).

Chaque paramètre est défini par :

1. Sa cote¹³ qui correspond à un intervalle de valeurs (variables quantitatives) attribué à un type de milieu (variables qualitatives) et qui sont croissantes de 1 à 10 suivant l'impact de la valeur du paramètre sur l'estimation de l'indice de vulnérabilité.
2. Son poids qui varie de 1 à 5 et qui pondère l'importance relative d'un paramètre d'après l'importance du processus physique qu'il représente influençant le caractère vulnérable ou non d'un aquifère.

L'indice de vulnérabilité est par la suite déterminé par la somme du produit des cotes (indice R : *rating*) et du poids (indice W : *weight*) attribués aux différents paramètres (équation 1).

$$\text{Indice DRASTIC} = D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + S_R S_W + T_R T_W + I_R I_W + C_R C_W \quad \text{équation (1)}$$

Dans le cadre du projet PACES-CHCN, chaque paramètre de l'indice est déterminé sur toute la région sous la forme de donnée matricielle d'une résolution de 250 m, le calcul de l'indice est ensuite réalisé à l'aide de l'outil *Raster Calculator* disponible dans *ArcGIS* via l'extension *Spatial Analyst* par des opérations géomatiques basées sur l'équation (1).

¹³ L'ensemble des tableaux présentant les diverses cotes de chaque paramètre sont issus du *Guide de conception des installations de production d'eau potable - Volume 2, Québec, 268 p. (MDDEP, 2006).*

7.4.1.1 Intrants du modèle DRASTIC et pondération

Cette section présente l'ensemble des sept paramètres intrants du modèle DRASTIC pour lesquels les éléments suivants sont présentés :

- la ou les données nécessaires à l'évaluation du paramètre considéré ;
- les cotes proposées par la méthode DRASTIC;
- le résultat cartographique de la cotation à l'échelle régionale.

Paramètre D - Profondeur de la nappe (poids = 5)

Ce paramètre correspond à la profondeur du toit de la nappe d'eau souterraine à partir de la surface du sol. Son poids (5) est traduit l'importance du temps de transfert de polluants de la source de pollution en surface vers les eaux souterraines. En effet, plus la nappe est profonde, plus le temps parcouru par un polluant pour atteindre la surface de la nappe sera long. La cote pour l'indice de vulnérabilité est, de ce fait, inversement proportionnelle à la profondeur de la nappe.

Dans le cadre du projet PACES-CHCN, la profondeur de l'eau est déduite de la carte régionale de la piézométrie¹⁴ (chapitre 6). À partir de la carte matricielle de la profondeur de l'eau utilisée, les différents intervalles sont pondérés suivant les cotes proposées par la méthode DRASTIC et présentées au tableau 7-11. Le résultat de la reclassification suivant les cotes est présenté à la figure 7-21a.

Tableau 7-11 : Cote DRASTIC pour chaque classe de profondeur d'eau.

Profondeur de l'eau (m)	Cote
0 à 1,5	10
1,5 à 4,5	9
4,5 à 9	7
9 à 15	5
15 à 23	3
23 à 31	2
31 et plus	1

Paramètre R - Recharge (4)

Ce paramètre reflète le taux de recharge annuelle qui percole à travers la zone non saturée pour atteindre la nappe. Son poids (4) est le deuxième en importance puisque la recharge donne la quantité d'eau infiltrée et représente donc le principal vecteur pour le transport des contaminants à partir de la surface.

La valeur du paramètre R utilisée ici correspond à la recharge moyenne sur une période de cinq ans, soit de 2005 à 2009 inclusivement (chapitre 5). Par la suite, une cote provenant de la méthode DRASTIC est attribuée en fonction des différents intervalles de recharge présentés au tableau 7-12. La figure 7-21b illustre le résultat de la reclassification suivant les cotes présentées au tableau 7-12.

¹⁴ Profondeur de l'eau = DEM – Interpolation régionale de la piézométrie.

Tableau 7-12 : Cote DRASTIC pour chaque classe de recharge efficace.

Recharge efficace (cm/année)	Cote
0 à 5	1
5 à 10	3
10 à 18	6
18 à 25	8
25 et plus	9

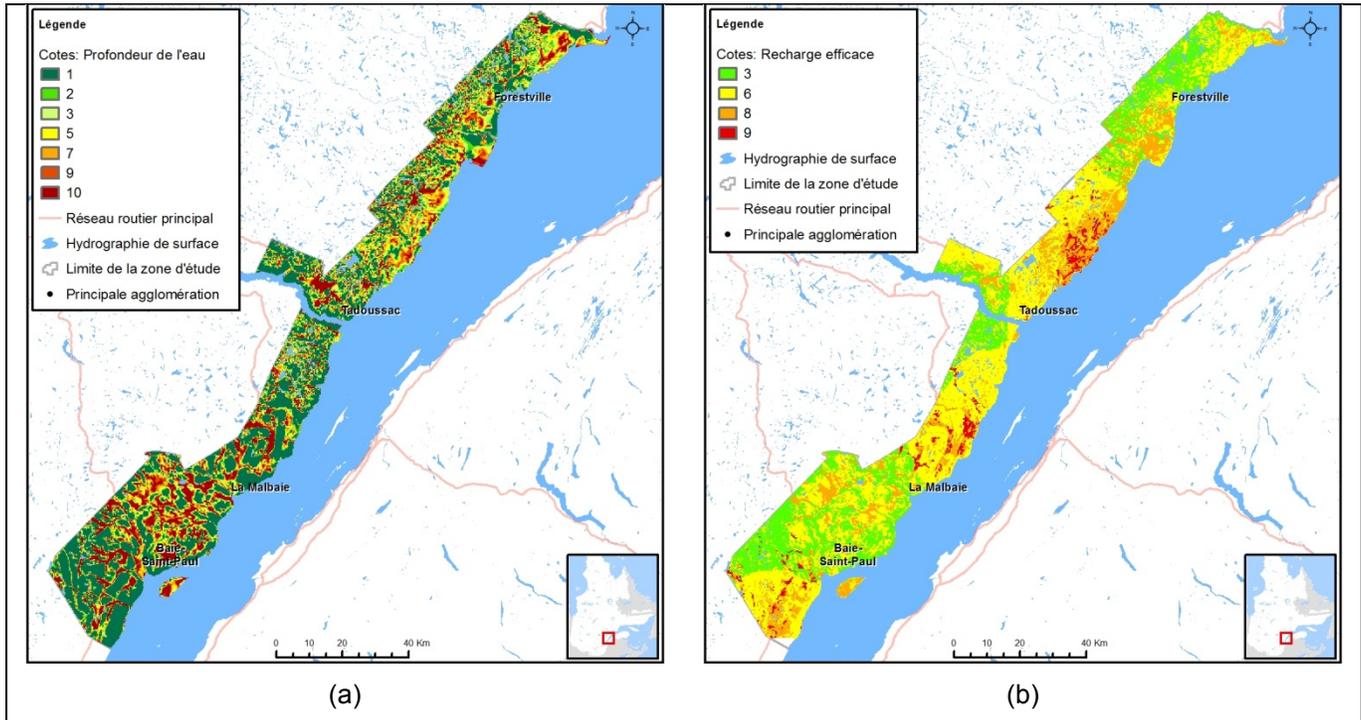


Figure 7-21 : Représentation matricielle des cotes DRASTIC pour chaque classe de profondeur d'eau (a) et pour chaque classe de recharge efficace (b).

Paramètre A – Milieu aquifère (3)

La circulation de l'eau souterraine est fortement influencée par la perméabilité, la composition et la porosité du milieu aquifère qui la contient. De façon générale, plus le milieu est poreux, plus les circulations d'eau sont rapides et plus la vulnérabilité sera élevée. Le milieu aquifère est un paramètre qualitatif et subjectif et son poids est de 3. Dans le cadre du projet PACES-CHCN, le paramètre A (milieu aquifère) représente le premier milieu aquifère intercepté à partir de la surface du terrain.

La carte #18 – *Limites des milieux aquifères régionaux* (annexe numérique AN1) présente les données matricielles du premier aquifère rencontré, réalisée à partir des informations sur le découpage hydrogéologique contenues dans la base de données (chapitre 6). Le tableau 7-13 présente les cotes attribuées selon la méthode DRASTIC et correspondant aux différents milieux aquifères. La figure 7-22a présente le résultat de la reclassification suivant les cotes du tableau 7-13. Les codes provenant de la simplification de la géologie en grande famille lithologique sont présentés aux chapitres 4 et 6.

Tableau 7-13 : Cote DRASTIC pour chaque milieu aquifère.

<i>Milieu aquifère</i>	<i>Codes provenant de la simplification de la géologie en grande famille lithologique</i>	<i>Cote</i>
Shale massif		2
Roches ignées/métamorphiques		3
Roches ignées/métamorphiques altérées	1, 2, 3, 4	4
Till		5
Lits de grès, calcaire et shale	5b	6
Grès massif		6
Calcaire massif		6
Sable et gravier	A, Ac, Ap, At, Ax, C, Ce, Cr, Ed, Go, Gx, GxT, Lb, LG, LGb, LGd, Mb, MGb, MGd	8
Basalte		9
Calcaire karstique	5a	10

Paramètre S – Type de sol (2)

De façon analogue à la perméabilité du milieu aquifère considéré, la texture et la structure du premier mètre de sol influencent la circulation et surtout l'infiltration de l'eau souterraine. De façon générale, plus le sol présente une granulométrie grossière, plus sa perméabilité est élevée et plus la vulnérabilité sera élevée.

La carte #12 – *Géologie du Quaternaire* (annexe numérique AN1) présente les différents types de sédiment (chapitre 4). Le tableau 7-14 présente la nature du sol, leur correspondance avec les unités provenant de la carte des dépôts de surface et les cotes d'après la classification proposée par la méthode DRASTIC. Le résultat de la reclassification suivant les cotes du tableau 7-14 est présenté à la figure 7-22b.

Tableau 7-14 : Cote DRASTIC pour chaque type de sol.

<i>Nature du sol</i>	<i>Codes provenant de la légende de la carte des dépôts de surface</i>	<i>Cote</i>
Sol mince ou roc	T, Tc, Tm, Tf, Tr, Trm, R, Rd	10
Gravier	Ac, Ca, Ce, Cl, Cr, G, Go, Gx, Gxi, GxT	10
Sable	A, Ap, At, Ax, C, Ed, El, Gs, L, Lb, Ld, LG, LGb, LGd, Mb, Md, MGb, MGd	9
Tourbe	O, Om, Ot	8
Argile fissuré		7
Loam sableux		6
Loam		5
Loam silteux		4
Loam argileux		3
Terre noire		2
Argile	Ae, Cg, La, LGa, M, Ma, Mi, MG, MGa, MGi	1

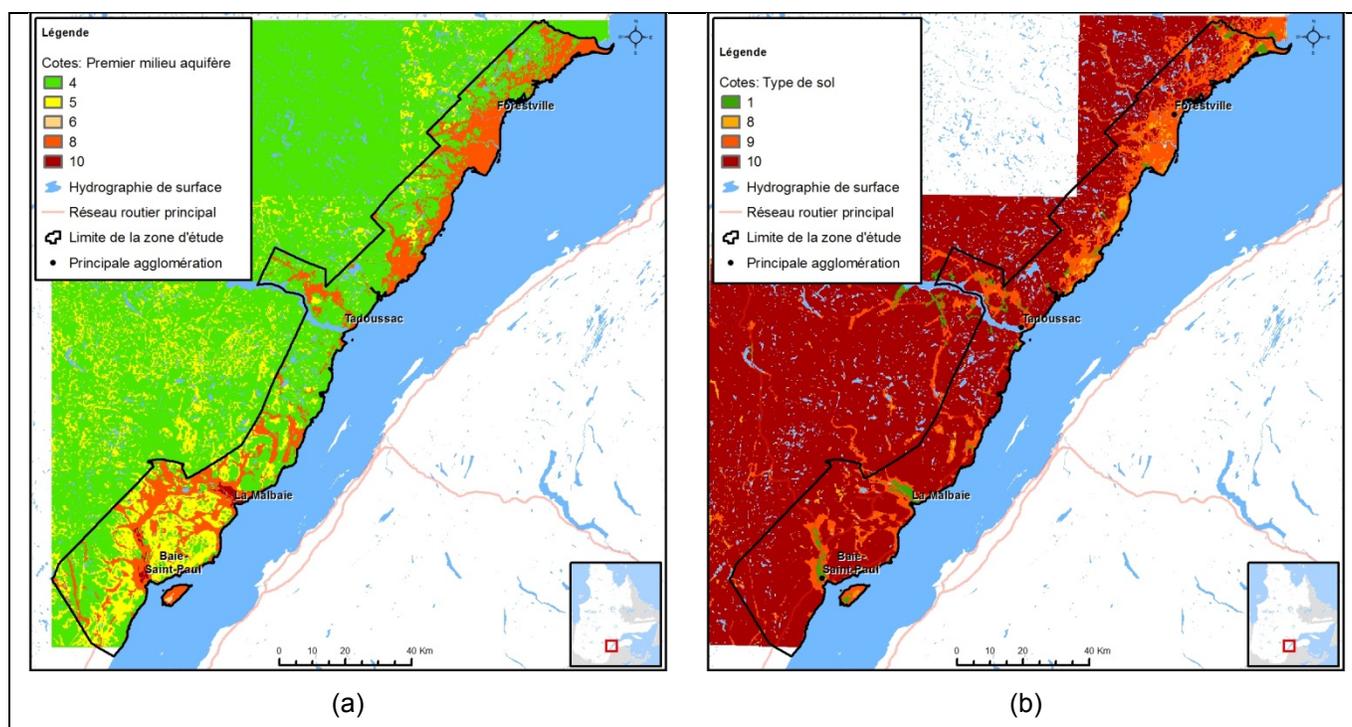


Figure 7-22 : Représentation matricielle des cotes DRASTIC pour a) le premier milieu aquifère intercepté à partir de la surface, et b) chaque type de sol.

Paramètre T – Pente du sol (1)

La pente du sol est un élément contrôlant le ruissellement, ce qui influence la recharge de l'aquifère (chapitre 5). Le faible poids (1) du paramètre de la pente provient en partie de son utilisation antérieure dans le calcul de la recharge qui est elle-même un paramètre intrant de la méthode DRASTIC. La carte #4 – *Pente du sol* (annexe numérique AN1) présente le pourcentage d'inclinaison du terrain sur l'ensemble du territoire. La figure 7-23a illustre le résultat de la reclassification suivant les cotes indiquées dans le tableau 7-15.

Tableau 7-15 : Cote T de DRASTIC pour chaque classe de pente.

<i>Pente du terrain</i> (%)	<i>Cote</i>
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
18 et plus	1

Paramètre I – Impact de la zone vadose (5)

La zone vadose représente la zone non saturée située entre le sol et la nappe. Les caractéristiques de la zone vadose influencent la circulation et surtout l'infiltration de l'eau souterraine. De façon générale, plus la zone vadose est constituée d'un milieu perméable, plus la vulnérabilité sera élevée. La zone vadose étant représentative du premier environnement rencontré depuis la surface, les cartes géologiques (roc et dépôts de surface) ont été utilisées pour identifier cet environnement.

Les cartes #12 – *Géologie du Quaternaire* et #13 – *Géologie du roc* (annexe numérique AN1) correspondent aux milieux géologiques associées à la zone vadose. Le tableau 7-16 présente la nature de la zone vadose établie par la méthode DRASTIC ainsi que la correspondance des unités constituant cette zone avec les cotes

associées. Les unités de surface provenant des cartes #12 et #13 sont classifiées selon la nature de la zone vadose qui correspond à une cote I selon la méthode DRASTIC. La figure 7-23b présente la carte matricielle du résultat de cette reclassification suivant les cotes du tableau 7-16.

Tableau 7-16 : Cote DRASTIC selon la nature de la zone vadose.

<i>Nature de la zone vadose</i>	<i>Codes provenant de la légende de la carte des dépôts de surface ou de la légende de la carte géologique</i>	<i>Cote</i>
Couche imperméable		1
Silt/argile	Cg, LGa, Ma, MGa, MGi	3
Shale		3
Roches ignées/métamorphiques	1a, 1b, 1c, 1e, 1f, 2b, 2c, 3b, 3c, 4b, 4c, 4d, 4e, 4f	4
Calcaire		6
Grès	L'Isle-aux-Coudres	6
Lits de calcaire, grès et shale		6
Sable et gravier avec silt et argile	O, Tc, Tf, Tm, Tr, Trm	6
Sable et gravier	A, Ac, Ap, At, Ax, C, Ce, Cr, Ed, Go, Gx, GxT, Lb, LG, LGb, LGd, Mb, MGb, MGd	8
Basalte		9
Calcaire karstique	5a	10

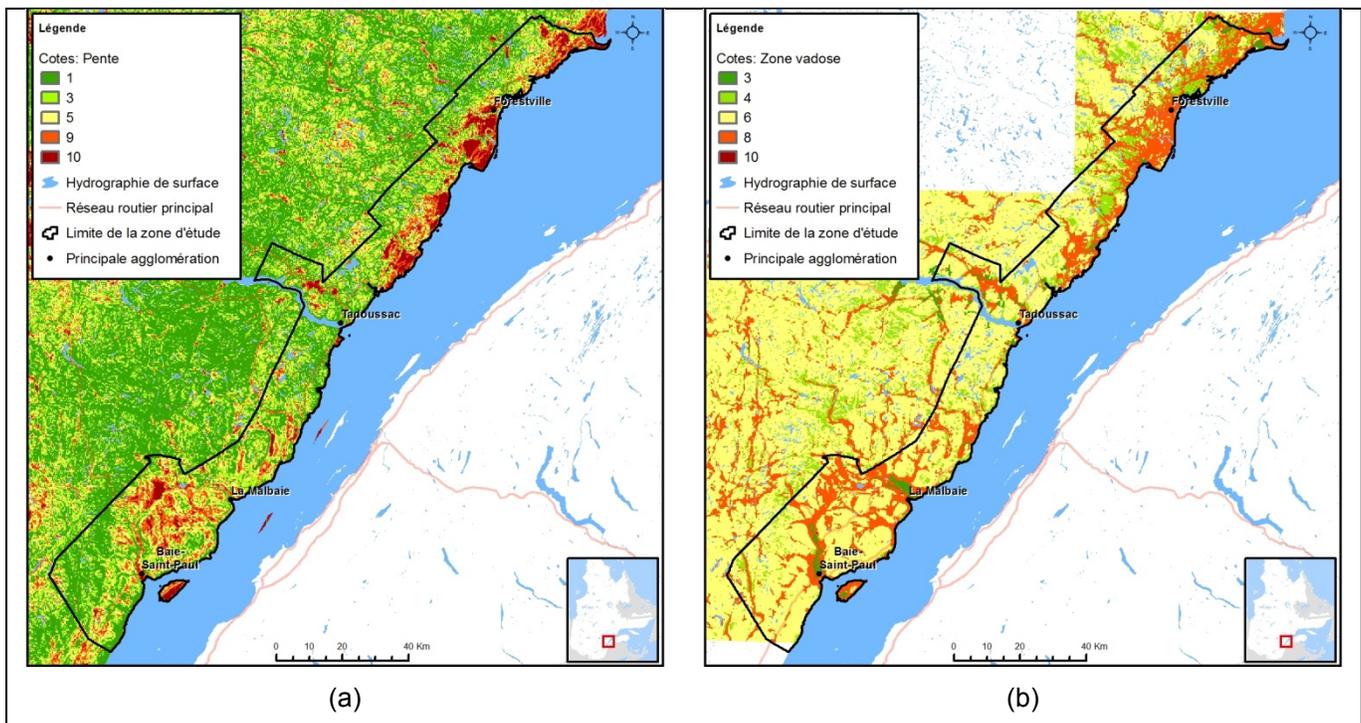


Figure 7-23 : Représentation matricielle des cotes DRASTIC pour a) la pente du sol et b) le milieu géologique correspondant à la zone vadose.

Paramètre C—Conductivité hydraulique (3)

La conductivité hydraulique (K) traduit la facilité avec laquelle l'écoulement souterrain peut se produire. Ce paramètre quantifie l'aptitude d'un milieu aquifère à laisser circuler l'eau qu'il contient. De façon générale, plus K

est élevée, plus un contaminant peut migrer facilement, et plus la vulnérabilité sera considérée élevée. Les données matricielles initiales utilisées dans le cadre du projet PACES-CHCN pour le paramètre (C) correspondent aux données matricielles du paramètre (A) auxquelles sont attribuées des valeurs différentes correspondant à la conductivité hydraulique.

Le tableau 7-17 présente les valeurs de la conductivité hydraulique associées à chacun des milieux aquifères identifiés. Cette quantification de la conductivité hydraulique s'inspire de l'analyse des propriétés hydrauliques réalisée dans le cadre du projet PACES-CHCN (chapitre 6). Les différentes valeurs de conductivité hydraulique sont ensuite cotées suivant les gammes d'après la méthode DRASTIC et sont présentées au tableau 7-17. La figure 7-24 illustre le résultat de la reclassification suivant les cotes du tableau 7-17.

Tableau 7-17 : Cote DRASTIC pour chaque classe de conductivité.

<i>Intervalles de conductivité hydraulique selon DRASTIC (m/j)</i>	<i>Milieu aquifère</i>	<i>Conductivité hydraulique moyenne (m/j)</i>	<i>Cote selon DRASTIC</i>
0,04-4	Roc fracturé (milieu semi-perméable)	0,086	1
4-12			2
12-29			4
29-41			6
41-82	Sable et gravier (milieu perméable)	54,43	8
82+			10

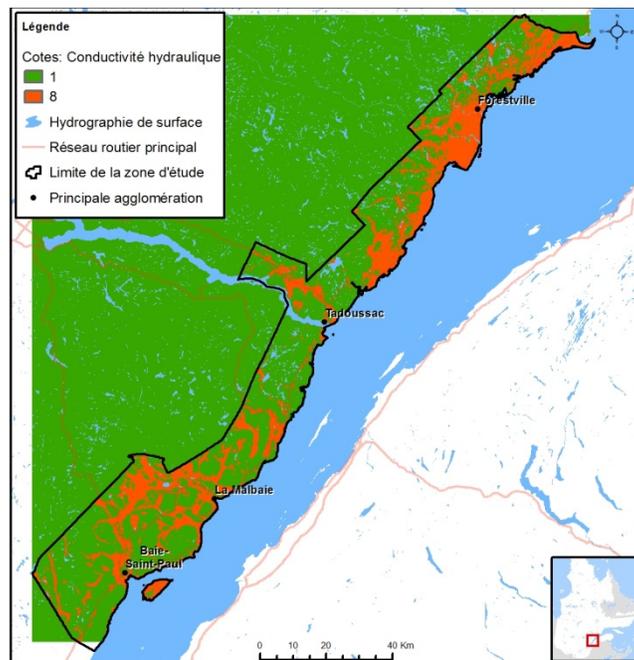


Figure 7-24 : Représentation matricielle des cotes DRASTIC pour la conductivité hydraulique.

7.4.1.2 Carte DRASTIC

Dans le cadre du projet PACES-CHCN, le calcul de l'indice DRASTIC a été réalisé à partir d'opérations géomatiques. Ainsi, les données matricielles présentées à la section précédente, et obtenues pour chaque paramètre qui compose l'indice DRASTIC, sont d'abord pondérées, puis additionnées à l'aide de l'outil *Raster Calculator* disponible dans *ArcGIS* via l'extension *Spatial Analyst*. Le résultat de ces opérations est une donnée matricielle possédant une résolution de 250 m et correspond à la carte #22 – *Vulnérabilité de l'aquifère situé le plus près de la surface* (annexe numérique AN1). Cette carte montre bien que les secteurs les plus vulnérables correspondent aux endroits où des dépôts d'origine fluvioglacière, glaciolacustre et glaciomarin sont cartographiés (voir carte #12 – *Géologie du Quaternaire*). Ceci résulte notamment du fait que lorsque ces dépôts sont présents en surface, même s'ils sont de faible épaisseur, ils correspondent au premier aquifère rencontré à partir de la surface du sol.

Selon le Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (RPEP) du MDDELCC, la vulnérabilité est :

- faible lorsque l'indice de vulnérabilité est inférieur ou égal à 100 ;
- moyenne lorsque l'indice de vulnérabilité est supérieur à 100 et inférieur ou égal à 180 ;
- élevée lorsque l'indice de vulnérabilité est supérieur à 180.

Par conséquent, le territoire dont la vulnérabilité est faible correspond principalement aux secteurs où le premier aquifère rencontré est constitué de roc fracturé ou de till mince en couverture sur la carte #12 – *Géologie du Quaternaire* (annexe 1).

Les secteurs où la vulnérabilité est moyenne correspondent aux suivants :

- dans les hautes terres du territoire CHCN, là où du till en couverture continue est cartographié (carte #12 – *Géologie du Quaternaire* ; annexe 1) ;
- dans le secteur de l'astrolème, notamment dans les vallées du Gouffre et de La Malbaie, et dans le secteur des collines ainsi que dans le secteur des basses terres de la Haute-Côte-Nord ;
- dans le secteur de l'Isle-aux-Coudres.

Les secteurs de grande superficie où la vulnérabilité est élevée se concentrent principalement dans les municipalités suivantes :

- au nord de Saint-Urbain ;
- au nord-est de La Malbaie ;
- à l'ouest de Sacré-Cœur ;
- au nord-est des Bergeronnes ;
- au sud de Portneuf-sur-Mer.

De façon générale, la cartographie de la vulnérabilité des aquifères du territoire CHCN est représentative du type de dépôt présent en surface, et elle semble fortement influencée par leur perméabilité. Améliorer l'estimation de la vulnérabilité dans une zone particulière nécessite, de ce fait, d'améliorer les connaissances sur la dynamique de transfert des eaux de la surface au sous-sol, ce qui nécessite des travaux de terrain spécifiques.

7.4.1.3 Limites d'utilisation de la carte

L'estimation des cotes pour chacun des paramètres de l'indice DRASTIC est effectuée à partir des données de cartographie existantes (carte des dépôts de surface, carte géologique, carte de la piézométrie régionale et carte d'estimation de la recharge). Par conséquent, les limites d'utilisation de ces cartes s'appliquent également à la carte de vulnérabilité selon DRASTIC.

DRASTIC local versus régional

La détermination de la vulnérabilité par l'indice DRASTIC est une méthode initialement développée pour l'estimation de la vulnérabilité d'une nappe d'eau captée au voisinage d'un ouvrage de captage. Cette méthode locale considère la position exacte de la nappe d'eau captée en termes de profondeur et de confinement. Or,

l'estimation de l'indice DRASTIC à l'échelle régionale, telle que définie dans le cadre du projet PACES-CHCN, est liée en grande partie aux données de surface, ainsi le calcul de l'indice de vulnérabilité DRASTIC à l'échelle régionale, ne tient pas compte des aquifères réellement exploités et n'intègre pas la notion de superposition des dépôts.

La figure 7-25 illustre un aspect des simplifications adoptées pour cette cartographie régionale. Sur cette figure, la partie gauche (a) présente la vulnérabilité estimée d'après la méthode élaborée dans le cadre du projet PACES-CHCN, et la partie droite (b) présente la méthode telle qu'elle est appliquée pour l'évaluation locale de la vulnérabilité d'un aquifère capté, généralement à des fins d'alimentation en eau potable. Dans ce projet, l'indice DRASTIC représente donc la vulnérabilité du premier milieu aquifère rencontré (dépôts granulaire ou roc) depuis la surface, mais n'est pas invariablement une indication de la vulnérabilité de l'eau souterraine des diverses nappes d'eau se trouvant sous une parcelle de territoire.

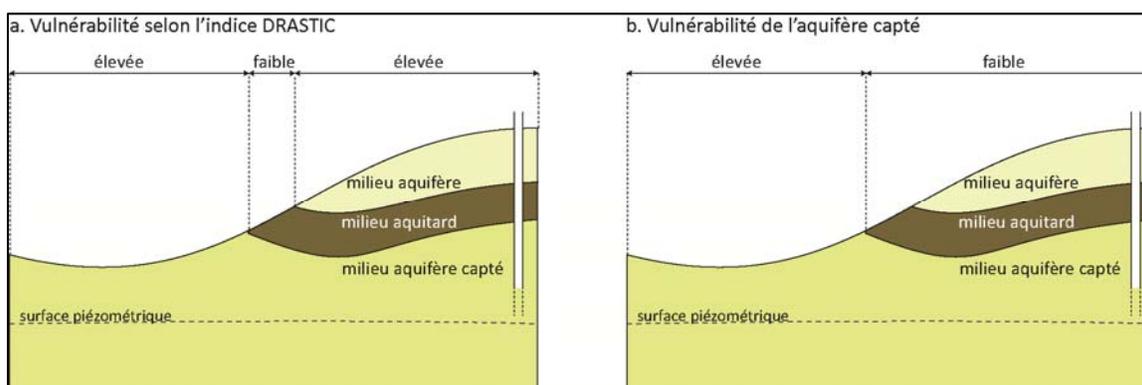


Figure 7-25 : Relativité de la vulnérabilité DRASTIC.

Interdépendance de certains intrants

Aussi, Mayzonnat et Larocque (2011) ont montré que la vulnérabilité DRASTIC combine plusieurs paramètres qui ne sont pas indépendants entre eux. En effet, quatre des sept paramètres (recharge –R, premier aquifère intercepté à partir de la surface – A, type de sol – S, zone vadose – I) sont issus de la même donnée de surface, à savoir la carte des dépôts de surface. La relation étroite de ces quatre paramètres avec les données des dépôts de surface introduit une redondance dans le paramétrage de l'indice DRASTIC, ce qui soulève un questionnement majeur sur l'influence relative de ces données sur le résultat obtenu.

Plusieurs autres méthodes d'estimation de la vulnérabilité peuvent être adoptées, notamment celles énumérées précédemment (section 7.4.1). Il serait fort intéressant de réaliser un projet comparatif de l'estimation de la vulnérabilité obtenue avec différentes méthodes. Cet exercice permettrait une analyse plus objective des résultats présentés sur la carte #22 – *Vulnérabilité de l'aquifère situé le plus près de la surface.*

Vulnérabilité versus risque

L'indice de vulnérabilité DRASTIC tient compte exclusivement des données du sol et du sous-sol. Par définition, il est alors naturel ou intrinsèque, c'est-à-dire indépendant de toute activité anthropique. La valeur de l'indice DRASTIC ne doit donc pas être commentée en termes de risques pour les eaux souterraines. Contrairement à la vulnérabilité, le risque est évolutif. L'indice DRASTIC n'est qu'un indicateur de la susceptibilité du milieu à la contamination. Pour évoquer la notion de risque, les activités anthropiques passées, présentes et futures doivent être considérées dans un second temps, car ils correspondent à l'aléa. Toutefois, dans l'état actuel des connaissances, les liens entre les aléas de présence d'un contaminant et la vulnérabilité demeurent difficiles à établir. En effet, les activités anthropiques constituent un aléa possible qui ne doit pas être confondu avec le risque et doit faire l'objet d'une évaluation précise qui lui est propre. La carte #23 - *Activités potentiellement*

polluantes pour l'eau souterraine, représente un premier facteur de cet aléa à l'échelle régionale, mais il ne donne pas une évaluation précise de l'aléa des activités anthropiques à l'égard de la contamination de la nappe d'eau souterraine. Pour une caractérisation adéquate de l'aléa l'inventaire des sources et des types de pollution doit être réalisé de façon rigoureuse. Cette étape cruciale implique un travail systématique visant à caractériser chaque activité ayant cours sur le territoire en termes de potentiel de contamination de la ressource en eau souterraine.

7.4.2 **Protection de la ressource en eau**

Les eaux souterraines constituent un réservoir important d'eau potable. En milieu urbain ou industriel, celles-ci peuvent devenir rapidement fragiles à la surexploitation ou à la contamination. Depuis peu, les hydrogéologues, les acteurs du milieu et le gouvernement du Québec mettent ainsi en place des outils et un cadre législatif pour une protection et une exploitation rationnelles de la ressource.

7.4.2.1 Aires d'alimentation et de protection des captages

Tel qu'illustré en figure 7-26, l'aire d'alimentation correspond à la surface sur laquelle toute l'eau qui s'infiltrera sera captée un jour ou l'autre par l'ouvrage de captage (voir Rasmussen et al., 2006). Les aires de protection constituent une partie de cette aire d'alimentation qu'il est indispensable de protéger convenablement, on distingue :

- l'aire de protection immédiate qui correspond un cercle de 30 m de rayon autour de l'ouvrage;
- le périmètre de protection bactériologique correspondant à un temps de résidence de 200 jours;
- le périmètre de protection virologique correspondant à un temps de résidence de 550 jours.

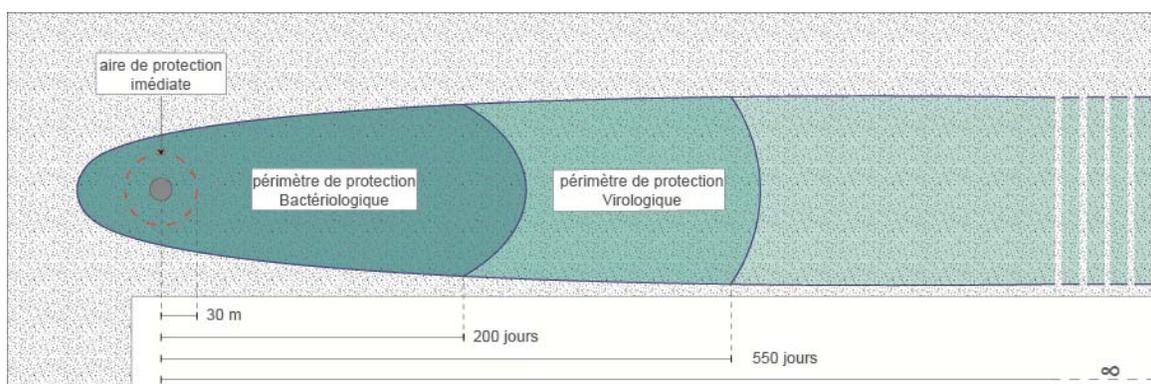


Figure 7-26 : Exemple d'aires d'alimentation et de protections des ouvrages de captage.

Au Québec, il est exigé par le Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (RPEP) d'estimer l'aire d'alimentation de tout ouvrage de captage servant à l'alimentation en eau potable de 21 personnes et plus.

Le tableau 7-18 présente le nombre d'ouvrages de captage municipaux et le nombre de sites où l'aire d'alimentation du captage a été déterminée, selon les données obtenues dans le cadre de PACES-CHCN. Au total, 29 figures représentant l'aire d'alimentation d'un ou de plusieurs puits sont extraites des rapports de consultants récupérés auprès des municipalités. Certains puits ont plus d'une aire d'alimentation estimée. En effet, en changeant certains paramètres dont le débit de pompage, l'aire d'alimentation d'un puits peut être modifiée. La liste présentée au tableau 7-18 n'est pas exhaustive : un recensement plus complet des aires d'alimentation et de protection des puits de captage est fortement recommandé.

Tableau 7-18 : Nombre de puits de captage et d'aires d'alimentation déterminées.

MRC	Municipalité	Nbre d'ouvrages de captage	Nbre d'aires d'alimentation
CHARLEVOIX	Baie-Saint-Paul	3	2
	Les Éboulements	3	ND
	L'Isle-aux-Coudres		
	Petite-Rivière-Saint-François	2	ND
	Saint-Hilarion	1	2
	Saint-Urbain	3	ND
	Sous-total		12
CHARLEVOIX-EST	Baie-Sainte-Catherine	1	1
	Clermont	4	2
	La Malbaie	8	8
	Notre-Dame-des-Monts	1	ND
	Saint-Aimé-des-Lacs	1	ND
	Saint-Irénée		
	Saint-Siméon	3	ND
Sous-total		18	11
La HAUTE-CÔTE-NORD	Colombier	4	ND
	Forestville	1	ND
	Sacré-Coeur	2	4
	Les Bergeronnes		
	Les Escoumins		
	Longue-Rive	3	5
	Portneuf-sur-Mer	4	5
	Tadoussac	1	ND
Sous-total		15	14
TOTAL		45	29

ND : Non disponible parmi les rapports d'étude hydrogéologique municipaux récupérés.

7.4.2.2 Plan directeur de l'eau

En 2002, le gouvernement du Québec a établi la politique nationale de l'eau. Le but de cette politique étant la gestion de l'eau par bassin versant et la participation de la population à cette gestion. Les organisme de bassin versant (OBV) ont été mis en place par la suite pour «élaborer et mettre à jour un plan directeur de l'eau, et en promouvoir et suivre la mise en œuvre, en s'assurant d'une représentation équilibrée des utilisateurs et des divers milieux intéressés, dont le milieu gouvernemental, autochtone, municipal, économique, environnemental, agricole et communautaire, dans la composition de cet organisme» (Art. 14 (3) 1).

La gestion intégrée de l'eau 15

Cette politique s'inscrit dans une vision de gestion intégrée de l'eau. Elle représente ainsi un mode de gestion qui tient compte de l'ensemble des usages qui ont un impact sur la ressource eau. Cette approche permet d'obtenir une vision globale et de connaître les effets cumulatifs des activités sur la ressource eau et sur les autres usages de l'eau. En effet, lorsque considérées isolément les utilisations et les activités qui touchent l'eau peuvent sembler avoir un effet négligeable sur la ressource, mais lorsqu'on les considère globalement, l'impact peut être majeur.

¹⁵ Extrait de : <http://www.charlevoixmontmorency.ca/apropos#3,2015>

Les PDE

Les PDE (Gumbazo, 2011) s'inscrivent clairement comme un **outil majeur** dans la protection des eaux de surface et souterraines. Ce document de planification se compose :

- d'une analyse du territoire du bassin considéré (enjeux, qualité, quantité, sécurité, etc.);
- d'un diagnostic qui expose la causalité et les effets de problèmes rencontrés;
- d'un plan d'action qui permet de planifier les actions entreprises par les acteurs de l'eau afin d'atteindre les objectifs d'une saine gestion de la ressource en eau.

Une grande partie des objectifs et problèmes exposés dans les diagnostic des PDE concernent directement les eaux souterraines, notamment :

1. la réduction des risques de contamination en provenance des systèmes collectifs ou individuels de traitement des eaux usées ou liés aux usages agricoles;
2. le développement des connaissances sur la qualité des eaux souterraines;
3. la sensibilisation des propriétaires de puits à l'importance de vérifier la qualité de leur eau potable;
4. la réduction des usages inappropriés (gaspillage) de l'eau potable.

Selon les régions, les PDE sont déposés auprès du MDDELCC ou en cours d'élaboration. Dans le cadre du projet PACES-CHCN :

- Le 21 janvier 2015, l'OBV-Charlevoix-Montmorency a reçu l'attestation qui confirme l'approbation ministérielle de leur PDE, celui-ci est disponible en intégralité via leur site internet : <http://www.charlevoixmontmorency.ca>.
- Le PDE de la rivière Les Escoumins et le PDE de la Zone de Gestion Intégrée en Eau de la Haute-Côte-Nord sont accessibles en version préliminaire via leur site internet : <http://www.obvhautebotenord.org>.

8 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le projet PACES-CHCN a été réalisé de 2012 à 2015 selon trois phases, soit 1) la compilation des données existantes, 2) l'acquisition de données additionnelles par des levés de terrain et 3) l'intégration et l'analyse de toutes ces données. L'ensemble des résultats du PACES-CHCN sont présentés dans les chapitres précédents et rencontrent les principaux objectifs visés par ce projet :

- 1) dresser un portrait de la ressource en eaux souterraines sur le territoire;
- 2) établir l'état de cette ressource, sa recharge et sa vulnérabilité;
- 3) développer des partenariats entre les acteurs de l'eau et les gestionnaires du territoire afin de favoriser une saine gestion de la ressource;
- 4) répondre aux préoccupations du milieu en ce qui concerne la ressource en eau souterraine.

Un comité de gestion regroupant des représentants du monde municipal, du milieu de la recherche et d'organismes gouvernementaux a été créé pour définir les orientations de recherche et cibler les objectifs des partenaires régionaux à l'égard du PACES-CHCN.

Le projet PACES-CHCN a permis d'acquérir de nombreuses données à caractère hydrogéologique qui sont archivées et centralisées dans une base de données à référence spatiale. L'analyse de ces données a permis la création de 29 cartes thématiques en format d'impression A0 décrites et présentées avec l'ensemble des résultats dans le présent rapport scientifique. Un atlas hydrogéologique des régions de CHCN a également été élaboré. Ces livrables sont disponibles en format numérique à partir de différentes sources :

- L'ensemble des livrables et résultats du projet PACES-CHCN sont disponibles sur le site web du PACES-CHCN : paces.uqac.ca.
- Un grand nombre de données ponctuelles contenues dans la base de données à référence spatiale, et certaines cartes sont disponibles à partir du navigateur cartographique ministériel (www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/souterraines/diffusion-carto-hydrogeologique.htm).
- Le rapport scientifique et l'atlas sont disponibles sur le site du Réseau québécois sur les eaux souterraines : <http://rqes-gries.ca/fr/archives-et-documents/rapports-memoires-et-cartes.html>.

Les conclusions du projet PACES-CHCN sont d'abord présentées et elles sont suivies des faits saillants de chacun des chapitres précédents. Enfin, viennent les recommandations qui se distinguent suivant trois catégories :

- présentation des limites et recommandations pour l'utilisation des livrables du projet PACES-CHCN, notamment les cartes;
- recommandations pour l'amélioration des connaissances hydrogéologiques pour le territoire CHCN;
- recommandations pour une meilleure gestion régionale de la ressource en eau souterraine.

8.1 Conclusions et faits saillants du projet PACES-CHCN

Avant le projet PACES-CHCN, les connaissances sur les eaux souterraines sur le territoire d'étude étaient inégales, dispersées et, surtout, n'étaient pas du domaine public. Ce dernier point résulte du fait que la majeure partie des connaissances hydrogéologiques proviennent d'études hydrogéologiques visant surtout l'alimentation en eau potable des municipalités et qui appartiennent à chacune des municipalités. Le projet PACES-CHCN est un des treize projets PACES réalisés à ce jour et qui contribuent de façon très importante à l'augmentation des connaissances sur les eaux souterraines du territoire québécois, autant par la cartographie des milieux aquifères, par l'établissement du portrait des principaux paramètres caractérisant l'eau souterraine que par l'évaluation de l'état de cette ressource en eau.

Ce processus d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines s'est effectué sur une période de trois ans au cours desquelles une imposante base de données à référence spatiale a été élaborée, qui inclut autant les connaissances déjà existantes que celles acquises au cours du projet PACES-CHCN. L'analyse de ces

données a permis de créer près de trente cartes thématiques présentant des informations géographique, géologique ou hydrogéologique, dans un format homogène et continu sur l'ensemble du territoire CHCN.

Bien que les résultats du projet PACES-CHCN soient significatifs, l'acquisition de connaissances constitue un processus évolutif tel que mentionné au chapitre 6. En effet, le projet a permis d'élaborer de façon distincte la cartographie des entités hydrogéologiques et le portrait des paramètres caractéristiques des eaux souterraines. Suite au projet PACES-CHCN, il serait très intéressant de poursuivre les travaux d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines. Ces nouveaux travaux pourraient d'une part permettre d'attribuer à chaque entité hydrogéologique les paramètres caractérisant les eaux souterraines (propriétés hydrauliques, hydrogéochimie, piézométrie, recharge, vulnérabilité, etc.) qui lui sont propres. D'autre part, la cartographie des entités hydrogéologiques pourrait être améliorée de façon ciblée en commençant par les entités hydrogéologiques exploitées ou les plus vulnérables ou encore celles sur lesquelles les pressions sur la ressource sont importantes, etc.

Les sections suivantes reprennent les faits saillants concernant la base de données à référence spatiale, laquelle inclut les données existantes et celles acquises en cours de projet, suivi des conclusions spécifiques au portrait du territoire, au portrait géologique, au bilan hydrologique, au portrait hydrogéologique et au portrait de la ressource en eau souterraine.

8.1.1 Base de données spatiales

Une particularité de la base de données spatiales PACES-CHCN est qu'elle contient autant les données sources, c'est-à-dire les données qui ont servi à l'analyse et la création des cartes, que l'ensemble des résultats d'analyse et cartographiques. Cette base de données spatiales contient des données sur près de 30 000 stations réparties sur tout le territoire.

Les données sources sont réparties dans 23 203 stations dont :

- 18 087 correspondent à des affleurements dont 13 545 ont été numérisés à partir de cartes géologiques disponibles dans le SIGÉOM;
- 3 660 sont des stations existantes provenant principalement du SIH, du MTQ, du SIGÉOM et des rapports de consultant obtenus des municipalités;
- 1 364 données acquises par les travaux de terrain effectués dans le cadre du PACES-CHCN qui correspondent à :
 - 934 stations provenant du projet de cartographie des dépôts de surface;
 - 133 stations correspondant à des affleurements visités lors de levés de la fracturation, principalement dans le secteur de l'astrolème de Charlevoix;
 - 112 stations correspondant à des puits individuels ou des sources échantillonnées dans le cadre de la campagne d'hydrogéochimie;
 - 13 stations correspondant aux sondages réalisés par rotoperçusion et au piézocône, deux d'entre eux ayant été convertis en piézomètres qui ont été utilisés pour la campagne d'hydrogéochimie;
 - 172 stations correspondent à des levés géophysiques effectués surtout par induction électromagnétique dans le domaine du temps ou, dans une moindre mesure, par résistivité électrique ou par sismique.
- 92 sont extraites de la base de données PACES-SLSJ et se localisent à proximité du territoire à l'étude :
 - 55 stations correspondent à des données existantes provenant du SIH, MTQ ou de rapports de consultant;
 - 29 stations proviennent du projet de cartographie des dépôts de surface réalisé sur le territoire du Saguenay-Lac-Saint-Jean;
 - 8 stations résultent du projet PACES-SLSJ.

La base de données spatiales PACES-CHCN contient également 5 455 points correspondant à des forages virtuels représentant la stratigraphie interprétée à partir des coupes stratigraphiques.

Les informations reliées à ces stations sont organisées en quatre-vingt-six tables thématiques constituant la base de données.

- la classe d'objets centrale intitulée *Station* dans laquelle toutes les stations ponctuelles existantes et acquises au cours du PACES-CHCN sont localisées;
- les 7 tables caractérisant l'information hydrogéologique;
- les 5 tables caractérisant le milieu aquifère ou l'eau souterraine;
- les 4 tables contenant de l'information spécialisée en hydrogéologie;
- les 6 tables du protocole « Fiabilité et validation des forages »;
- les 20 tables ou classes d'objets supplémentaires qui contiennent de l'information intermédiaire mais nécessaire à la réalisation des livrables (ex : forages virtuels) ou de nouveaux résultats calculés (ex : propriétés hydrauliques calculées pour les puits du SIH);
- les 3 tables identifiant les stations utilisées pour la création et la validation des livrables finaux;
- les 40 classes d'objets ou matrices correspondant aux livrables cartographiques finaux.

8.1.2 Description du territoire

Le territoire de Charlevoix et de la Haute-Côte-Nord appartient aux régions administratives de la Capitale-Nationale et de la Côte-Nord. La partie municipalisée du territoire à l'étude couvre une superficie d'environ 4 500 km² et longe la rive nord du fleuve Saint-Laurent dont l'extrémité sud-ouest correspond à la municipalité de Petite-Rivière-Saint-François et la limite nord-est à celle de Colombier. Il comprend un territoire autochtone et trois MRC, Charlevoix, Charlevoix-Est et La Haute-Côte-Nord, qui regroupent au total vingt-et-une municipalités. La population totale est de 40 930 habitants selon les données du recensement de la population du Canada en 2011. Des vingt-et-une municipalités, dix-sept captent l'eau souterraine pour alimenter en eau potable leur population et 87% de la population totale régionale est alimentée en eau potable à partir de cette ressource.

De façon générale, le relief de la région CHCN se caractérise par un fort gradient topographique pour lequel les altitudes les plus élevées situées au nord-ouest du territoire municipalisé atteignent plus de 1 000 m et diminuent progressivement vers le sud-est jusqu'au niveau du fleuve Saint-Laurent. L'hydrographie de CHCN se caractérise par un réseau dense constitué d'une multitude de lacs et de rivières distribués à l'intérieur de près de 120 bassins versants de niveau 1. La majorité des bassins versants de niveau 1 ont une frontière commune avec le fleuve Saint-Laurent, ainsi presque toute l'eau de surface de la région afflue au fleuve. La superficie de ces bassins va de moins de un à plusieurs centaines de km² :

- 71 bassins compris entre 0 et 10 km² ;
- 30 bassins compris entre 10 et 100 km² ;
- 13 bassins compris entre 100 et 1 000 km².

Plusieurs activités constituent des fleurons économiques pour le territoire CHCN. Les principales activités industrielles sont les industries du bois, notamment des entreprises de pâtes et papiers et de nombreuses scieries. L'exploitation de tourbières sur la Haute-Côte-Nord est importante. La région de Charlevoix a une agriculture développée et diversifiée où se retrouvent des élevages porcins et de plusieurs autres types qui contribuent à mettre en valeur l'industrie agro-alimentaire avec des produits du terroir. L'industrie agro-alimentaire de la Haute-Côte-Nord est orientée vers les produits de la mer et la culture des petits fruits. Le tourisme et la villégiature attirent chaque année de nombreux visiteurs profitant des magnifiques paysages, parcs et installations récréatives.

8.1.3 Portrait géologique

Sur le territoire de CHCN, la géologie du socle rocheux appartient à trois provinces géologiques. Les roches cristallines de la Province de Grenville correspondent à un complexe gneissique caractéristique de la Haute-Côte-Nord comprenant des migmatites, des granites et des lambeaux de roches supracrustales, et à des unités plutoniques de la suite anorthosite-mangérite-charnockite dominant le secteur de Charlevoix. Ces roches sont

localement recouvertes par des lambeaux de roches sédimentaires ordoviciennes appartenant à la Plate-Forme du Saint-Laurent. Ce sont surtout des calcaires et des roches sédimentaires d'origine détritique (grès, shale, etc.). Ces lambeaux sont observés dans le secteur de l'astroblème de Charlevoix, dans la dépression annulaire et en bordure du Fleuve Saint-Laurent. Les roches sédimentaires de l'Isle-aux-Coudres, majoritairement des grès et des séquences de flysch, appartiennent à la Province des Appalaches. La faille de Logan sépare les roches de la Plate-Forme du Saint-Laurent de celles des Appalaches.

Le secteur de Charlevoix est marqué par de nombreuses structures fragiles, notamment la faille du Saint-Laurent orientée NE-SW et les failles marquant les limites des domaines de l'astroblème de Charlevoix. La faille de Logan correspond à la limite des roches grenvilliennes et de la Plate-Forme du Saint-Laurent d'un côté, avec celles des Appalaches de l'autre côté.

L'analyse des données géologiques existantes a permis de bonifier les connaissances géologiques du territoire CHCN par :

- une analyse de linéaments topographiques pour laquelle 122 linéaments majeurs et 823 mineurs ont été interprétés;
- une révision de la carte géologique où la position des failles ductiles grenvilliennes a été interprétée et les limites des roches ordoviciennes ont été précisées à partir de l'information stratigraphique provenant des données disponibles et de l'interprétation des coupes stratigraphiques construites dans le cadre du projet PACES-CHCN.

Des travaux de terrain dédiés au levé de la fracturation ont également été effectués dans le secteur de l'astroblème de Charlevoix. Ces travaux ont conduit à l'attribution d'une cote d'appréciation qualitative de l'intensité de la fracturation pour chaque station visitée et à l'observation de phénomènes reliés à l'impact météoritique tels des cônes d'impact, des pseudotachylites et des brèches polygéniques.

La réalisation du projet PACES-CHCN a permis la cartographie des dépôts de surface sur l'ensemble du territoire CHCN réalisée par une équipe du CERM en collaboration avec le MERN et l'Université Laval. Des études locales étaient disponibles mais aucune cartographie des dépôts de surface n'avait été réalisée pour l'ensemble du territoire. Douze feuillets à l'échelle 1 : 50 000 ont été cartographiés couvrant une superficie totale de 6 960 km². Au cours des étés 2012 et 2013, 963 stations ont été visitées. La carte des dépôts de surface illustre que le till et le socle rocheux affleurant dominant les hautes terres du territoire CHCN. Des vallées sillonnent les hautes terres et sont généralement comblées par des sédiments d'origine fluvioglaciaire. Les basses terres de la Haute-Côte-Nord sont caractérisées par des sédiments glaciomarins, marins, alluviaux et organiques. Dans le secteur de Charlevoix, dans les vallées du Gouffre et de La Malbaie, les sédiments glaciomarins et marins dominent.

La stratigraphie régionale des dépôts meubles résulte de la combinaison des informations cartographiques et ponctuelles disponibles dans la base de données. Parmi les données ponctuelles, 172 correspondent à des levés géophysiques réalisés sur l'ensemble du territoire et 13 à des sondages par rotoperçusion et au piézocône réalisés sur la Haute-Côte-Nord. Ces informations stratigraphiques ont été utilisées pour construire 147 coupes stratigraphiques régionales sur l'ensemble du territoire. La stratigraphie régionale se divise en trois contextes principaux :

- till sur roc dans les hautes terres;
- sable sur argile sur roc caractéristiques des basses terres de la Haute-Côte-Nord;
- séquences stratigraphiques complexes dans les vallées de l'astroblème de Charlevoix.

Plus de 5 000 forages virtuels ont été générés automatiquement le long des 147 coupes stratigraphiques, ce qui permet d'estimer l'épaisseur des dépôts meubles et, par conséquent, la topographie du roc. Pour faciliter la création de ces modèles, une méthode géomatique a été développée à l'aide des fonctionnalités d'ArcGIS et cette méthode inclue une boîte à outil. L'épaisseur des dépôts est de l'ordre du mètre dans les hautes terres et atteint des épaisseurs maximales supérieures à 100 mètres, voire même supérieures à 200 mètres, dans les vallées du Gouffre et de La Malbaie, ainsi que dans les basses terres de la Haute-Côte-Nord. La topographie du

socle rocheux est caractérisée sur l'ensemble du territoire par les hautes terres et les basses terres ainsi que par l'astroblème de Charlevoix.

8.1.4 Bilan hydrologique

Le bilan hydrologique s'exprime sous la forme d'une équation où quatre termes se distinguent :

$$\text{précipitations} = \text{évapotranspiration} + \text{ruissellement} + \text{recharge}$$

Si cette équation est simple, l'estimation des volumes d'eau annuels pour chacun des termes est complexe et nécessite des simplifications importantes de la réalité. Dans le cadre du projet PACES-CHCN, le bilan hydrologique est exprimé en hauteur d'eau par année (mm/année) et estimé pour une maille de 250 m. Il a été réalisé pour cinq années, soit 2005 à 2009. Le résultat correspond à la valeur moyenne estimée pour les années 2005 à 2009 inclusivement. Plusieurs données utilisées dans le calcul du bilan hydrologique correspondent à des volumes d'eau journaliers (mm/jour). Un code a été développé dans le langage *Python* afin d'automatiser le traitement de cette grande quantité de données et de calculer des volumes d'eau pour chacune des cinq années pour l'ensemble du territoire CHCN.

Les volumes d'eau de précipitations correspondent aux apports verticaux modélisés par le CEHQ pour une maille de 10 km de côté. Sur l'ensemble du territoire, les apports verticaux sont très faibles en hiver et maximum en période de fonte des neiges au printemps. Pour l'année 2009, les apports verticaux sur les mailles du modèle varient entre 796 et 1 100 mm.

L'évapotranspiration réelle est estimée à partir des valeurs d'évapotranspiration potentielle estimée sur une base journalière à partir d'une équation qui nécessite les températures minimale et maximale fournies par le CEHQ. Pour l'année 2009, l'évapotranspiration réelle varie entre 381 et 561 mm selon la maille du modèle.

Le ruissellement est estimé sur une base journalière à partir des valeurs d'apports verticaux fournis par le CEHQ pour une maille de 10 km. Une méthode adaptée des *Curve number* a été utilisée et les valeurs de ruissellement estimé pour l'année 2009 varient entre 3 et 490 mm selon la maille.

La recharge annuelle sur le territoire est obtenue par l'équation du bilan hydrologique. Cette méthode d'estimation de la recharge annuelle a été appliquée dans le cadre d'un projet de recherche de maîtrise réalisé par Madame Maryline Huet pour le projet PACES-CHCN. D'autres méthodes d'estimation de la recharge sont proposées dans ce mémoire.

8.1.5 État des connaissances hydrogéologiques

L'établissement du portrait hydrogéologique régional du territoire de CHCN a permis de dresser un premier état de l'environnement hydrogéologique. Ce portrait présente d'une part une visualisation du découpage hydrogéologique du territoire du CHCN mettant en valeur les limites cartographiques de milieux, et d'autre part les propriétés hydrauliques régionales, les caractéristiques hydrogéochimiques, et la dynamique régional des eaux souterraines en termes d'écoulement, de recharge et de résurgence.

Sur le territoire de Charlevoix-Haute-Côte-Nord, la cartographie a permis de délimiter 13 entités hydrogéologiques régionales correspondant à 13 domaines aquifères qui se subdivisent en 85 entités hydrogéologiques locales, soit :

- 27 aquifères perméables;
- 40 aquifères semi-perméables;
- 18 aquitards.

Suivant les séquences d'empilement d'aquifères perméables et semi-perméables, et d'aquitards observés sur l'ensemble du territoire CHCN, sept contextes hydrogéologiques sont identifiés :

- A – aquifère (1), semi-perméable, en milieu fracturé;
- B – aquifères (2), semi-perméable, en milieu fracturé et mixte;

- C – aquifères (2) superposés, en milieux poreux et fracturés;
- D – aquifère (1) captif, perméable en milieu poreux;
- E – aquifères (2) superposés, libre et captif, perméables en milieu poreux;
- F – aquifères (2) superposés, libre et captif, en milieu poreux et fracturé;
- G – aquifère (1) captif, semi-perméable, en milieu fracturé.

Les contextes hydrogéologiques A, C et E représentent les contextes les plus étendus sur le territoire, les contextes hydrogéologiques A est principalement présent dans les hautes terres du territoire de CHCN, le contexte hydrogéologique C dans les vallées qui sillonnent les hautes terres du territoire de CHCN et dans la zone des collines de l'astrobème de Charlevoix, tandis que le contexte E caractérise une importante superficie des basses terres de la Haute-Côte-Nord.

Peu de données sont disponibles pour caractériser individuellement chacune de ces 85 entités hydrogéologiques locales. Toutefois, une étude statistique a permis d'évaluer les propriétés hydrauliques moyennes pour les environnements hydrogéologiques perméables (dépôts meubles) et semi-perméables (roches cristallines ou sédimentaires fracturées). Les dépôts perméables présentent des valeurs élevées de conductivité hydraulique dont la moyenne est $6,3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ et ils sont d'intérêt pour l'exploitation de l'eau souterraine. Les milieux semi-perméables présentent des valeurs intermédiaires de conductivité hydraulique moyennes, de l'ordre de $1,0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, ils sont également d'intérêt pour l'exploitation de l'eau souterraine.

L'hydrogéochimie de l'eau souterraine évolue suivant plusieurs processus dont les principaux sont la recharge des eaux souterraines, les interactions entre les milieux aquifères et l'eau souterraine, les échanges ioniques, les intrusions salées et les connexions hydrauliques entre le socle et les dépôts granulaires. Ces processus demeurent abscons, toutefois la caractérisation hydrogéochimique effectuée dans le cadre d'une maîtrise (Ghesquière et al., 2015) distingue quatre groupes d'eau souterraine sur le territoire suivant leur signature chimique. Le groupe 1 représente les eaux les moins évoluées ou dont la signature hydrogéochimique est représentative d'eau de recharge. Les eaux souterraines des groupes 2 et 3 ont des signatures hydrogéochimiques représentatives d'eau plus évoluée que le groupe 1 provenant probablement d'un mélange entre des eaux provenant d'aquifères granulaires et de roc fracturé. Les eaux souterraines du groupe 4 sont généralement salées et représentent les eaux les plus évoluées.

La profondeur estimée de l'eau souterraine varie entre 0 et 450 m pour une moyenne régionale de 38 m. Toutefois, les valeurs de profondeur de plus de 100 m sont considérées des anomalies non réalistes résultant de l'approche indirecte d'estimation de ce paramètre. Malgré leur caractère approximatif, les estimations de la piézométrie permettent d'illustrer la direction de l'écoulement et la très grande variabilité spatiale de la piézométrie, laquelle résulte du relief prononcé du secteur de Charlevoix. Les valeurs les plus élevées sont observées sur les hauts reliefs des Laurentides, principalement sur le territoire de Charlevoix qui présente la plus forte variabilité de profondeurs estimées. En comparaison le territoire de la Haute-Côte-Nord présente des variations de plus faible amplitude entre 0 et 50 m.

Régionalement, l'écoulement de l'eau souterraine s'effectue du nord-ouest vers le sud-est, plus généralement des hauts reliefs vers le fleuve Saint-Laurent. Localement, l'écoulement est orienté vers l'hydrographie principale telle que les rivières Saguenay, du Gouffre et Malbaie, et le fleuve Saint-Laurent, qui constituent les principales zones de décharge des eaux souterraines.

Les zones les plus favorables à la recharge se localisent sur les basses terres sur la Haute-Côte-Nord et dans les vallées de Charlevoix. Le territoire présente également plusieurs zones favorables aux résurgences sous forme de sources ou de zones de suintement.

8.1.6 Ressource en eaux

Pour compléter l'état des connaissances sur les eaux souterraines du territoire CHCN, un portrait de la ressource en eau est requis, car cette dernière présente une grande valeur collective pour l'alimentation en eau potable. Dans le cadre du projet PACES-CHCN, un portrait des prélèvements municipaux est présenté d'après l'origine de

l'eau prélevée par les municipalités à des fins d'alimentation en eau potable et suivant le contexte hydrogéologique capté lorsque l'eau souterraine est exploitée. Ensuite, le portrait se caractérise principalement par les quantités d'eau utilisées annuellement sur le territoire, par la qualité de l'eau potable selon les normes en vigueur, par la vulnérabilité de la ressource en eau souterraine, ainsi que par la protection de l'eau captée pour l'alimentation en eau potable.

Des vingt-et-une municipalités du territoire CHCN, cinq alimentent leur population en eau potable à partir d'eau de surface tandis que les dix-sept autres alimentent leur population à partir d'eau souterraine. Une particularité du territoire CHCN consiste au fait que certaines résurgences naturelles d'eau souterraine ont un débit assez important pour qu'elles soient utilisées par quatre municipalités pour assurer l'alimentation en eau potable.

Parmi les dix-sept municipalités qui sont alimentées en eau potable en totalité ou en partie à partir d'eau souterraine dix captent cette eau dans des milieux perméables (granulaires), cinq dans des milieux semi-perméables (roc fracturés) et deux exploitent ces deux milieux. Les milieux semi-perméables exploités se localisent tous sur le territoire des MRC de Charlevoix et de Charlevoix-Est, ces milieux correspondent aux contextes hydrogéologiques A, B, C et F. Les milieux perméables sont principalement exploités dans la MRC de La Haute-Côte-Nord mais également sur le territoire de Charlevoix; ils correspondent aux contextes hydrogéologiques C, E et F.

La quantité totale d'eau de surface et souterraine consommée est estimée à 19 679 318 m³/an dont les 2/3 correspondent à de l'eau de surface et le 1/3 à de l'eau souterraine. 93,5% de l'eau de surface est distribuée par des installations privées dont près de 90% est consommée sur le territoire de la MRC Charlevoix-Est. Le reste de la consommation en eau de surface, 6,5%, est distribuée par les réseaux municipaux. Du total de l'eau souterraine prélevée sur le territoire CHCN, 52% est destinée à un usage domestique, 25% à un usage industriel-commercial-industriel et 8% à un usage agricole. Le 15% restant est attribué à des pertes par des fuites dans les réseaux de distribution, mais ce pourcentage est fort probablement sous-estimé par rapport à la réalité.

Lorsque la quantité d'eau permet l'exploitation de l'aquifère, la qualité doit répondre aux normes en vigueur. Ainsi, la qualité de l'eau souterraine pour les paramètres mesurés *in situ* ou analysés en laboratoire est établie en fonction des concentrations maximales acceptables (CMA) du Règlement sur la qualité de l'eau potable du Québec et des objectifs esthétiques (OE) de Santé Canada. Les CMA sont attribuées à des paramètres qui peuvent avoir des incidences sur la santé à la différence des OE qui peuvent présenter des inconvénients d'odeurs ou de goûts désagréable, tacher les vêtements et les électroménagers ou attaquer la plomberie par exemples. Sur 126 échantillons, 14 présentent des dépassements des CMA pour les fluorures et/ou l'uranium. Les dépassements en fluorures peuvent atteindre jusqu'à trois fois la CMA tandis que les dépassements en uranium dépassent de 5 à 10% la CMA. Également des 126 échantillons, 56 présentent des dépassements des OE pour trois paramètres mesurés *in situ*, soit les matières dissoutes totales, le pH et la température, et pour sept paramètres analysés en laboratoire, soit l'aluminium, la dureté estimée, le fer, le manganèse, les chlorures, le sodium et les sulfures. Certains paramètres pour lesquels des CMA ou des OE sont normés n'ont pas été analysés par le projet PACES-CHCN, notamment les paramètres bactériologiques.

Pour mieux protéger la ressource contre les contaminations potentielles, la vulnérabilité de l'eau souterraine doit être évaluée. La vulnérabilité de l'eau souterraine contenue dans le milieu aquifère situé le plus près de la surface a été évaluée en appliquant la méthode DRASTIC à des mailles de 250 m pour l'ensemble du territoire. Plusieurs opérations géomatiques sont requises et pour standardiser la méthode, une boîte à outil a été créée dans ArcGIS. La carte de vulnérabilité (#22 – *Vulnérabilité de l'aquifère situé le plus près de la surface selon la méthode DRASTIC*; annexe numérique AN1) illustre que les secteurs où l'indice de vulnérabilité est le plus faible (inférieur à 100) sont les hautes terres du territoire CHCN où le till mince ou le socle rocheux est affleurant sur la carte #12 – *Géologie du Quaternaire* (annexe numérique AN1). L'indice de vulnérabilité est moyen (entre 100 et 180) sur l'Isle-aux-Coudres ainsi que dans les vallées du Gouffre et de La Malbaie, et dans la zone de collines de l'astroblème de Charlevoix. Certains secteurs présentent un indice de vulnérabilité élevé (supérieur à 180), ce sont des secteurs où les dépôts de surface sont d'origine fluvioglaciaire, glaciolacustre ou glaciomarin sur la carte

#12 – *Géologie du Quaternaire*, notamment un secteur au nord de la municipalité de Saint-Urbain, une zone au nord-est de La Malbaie, un secteur à l'ouest de la municipalité de Sacré-Coeur, une étendue au nord-est de la municipalité des Bergeronnes et une superficie au sud de Portneuf-sur-Mer.

Pour protéger la ressource en eau souterraine exploitée, les captages sont protégés selon le cadre législatif en vigueur. Pour chaque captage alimentant 20 personnes et plus, les périmètres de protection immédiate et rapprochée (bactériologique et virologique) sont déterminés et ces terrains doivent être protégés contre les dangers de contamination. Lorsqu'un ouvrage capte plus de 75 m³ d'eau par jour son aire d'alimentation est estimée. Dans le cadre du projet PACES-CHCN un levé des captages a permis d'en identifier 45. Ce levé n'est pas exhaustif et il n'est pas indiqué si des ouvrages captent plus de 75 m³ d'eau par jour. Les rapports de consultant obtenus des municipalités indiquent que l'aire d'alimentation est déterminée pour 29 captages. Poursuivant une perspective de protection de la ressource, les organismes de bassins versants (OBV) présentes sur le territoire, soit l'OBV Charlevoix-Montmorency et l'OBV Haute-Côte-Nord, ont consulté les acteurs de l'eau du territoire, ce qui a conduit à un plan directeur de l'eau élaboré par chacun de ces deux organismes. Ces plans directeurs de l'eau constituent des outils majeurs pour la gestion intégrée de la ressource en eau.

8.2 Limites et recommandations pour l'utilisation des livrables du PACES-CHCN

Le projet PACES-CHCN consiste en l'acquisition de connaissances hydrogéologiques à l'échelle régionale. Ces connaissances se présentent notamment sous forme de données ponctuelles incluses dans la base de données à référence spatiale ou encore sous forme de cartes thématiques à l'échelle 1 : 225 000. Cette section discute des utilisations et des limites de la base de données à référence spatiale, de certaines cartes thématiques et des coupes stratigraphiques.

8.2.1 Base de données spatiales

La base de données spatiales PACES-CHCN est une photographie dans le temps qui illustre l'état des informations disponibles sur les eaux souterraines du territoire CHCN en 2015. De nouveaux forages, de nouveaux puits ou encore de nouveaux levés géophysiques seront certainement réalisés au cours des années à venir et ont même peut-être déjà été réalisés depuis la récupération des données auprès des ministères, organismes et municipalités. Ces nouvelles données ne se retrouvent donc pas dans la base de données. De plus, certaines données sur le territoire sont manquantes dans la base de données spatiales simplement parce qu'elles n'ont pu être récupérées. C'est le cas notamment des données appartenant à Hydro-Québec, telles les données de sondage géotechnique réalisés pour les postes et les lignes de transport d'électricité.

L'information disponible dans la base de données est de précision variable et l'utilisateur doit se référer à l'organisme qui a fourni les données originales pour en connaître la qualité.

Pour faire une utilisation adéquate des informations incluses dans la base de données spatiales, l'utilisateur doit savoir à quelles informations réfèrent chaque tableau et chacun des champs caractérisant ces tableaux. De ce fait, l'ensemble des métadonnées associées à la base de données doivent être consultées avant l'utilisation. Ces métadonnées sont présentées dans un classeur *Excel* où chaque feuille correspond à un tableau de données. Les noms des champs sont donnés dans la première colonne et la description de chaque champ dans la deuxième colonne.

8.2.2 Avertissement et mise en garde applicable à toutes les cartes

Les données d'entrée utilisées pour la création des cartes sont mentionnées sur chacune d'elle à l'intérieur d'un encadré intitulé « Métadonnées ». Pour comprendre de quelles données ou de quelles méthodes résultent les cartes et les coupes stratigraphiques, l'utilisateur doit consulter ces métadonnées ou les protocoles.

Sur chacune des cartes un encadré intitulé « Avertissement et mise en garde » et indique les limites d'utilisation des cartes par le texte suivant :

« Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1/225 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découlant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour réaliser la carte, malgré les efforts déployés lors de la collecte, de la sélection et de la validation des données. Par conséquent, cette carte ne peut remplacer les études requises pour définir les conditions réelles à l'échelle locale et n'offre aucune garantie quant à l'exactitude ou à l'intégralité des données et des conditions présentées. Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'attache ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité ou quant à l'adaptation à une fin particulière de toute œuvre dérivée de cette carte, et ils n'assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles œuvres dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentées par la carte ou des données y étant rattachées. »

8.2.3 Coupes stratigraphiques

Les 147 coupes stratigraphiques sont construites à partir de données représentatives à des échelles différentes, notamment la carte #12 – Géologie du Quaternaire qui a été faite à une échelle 1 : 50 000 et les stratigraphies des forages pour lesquelles l'information est disponible au centimètre près. Puisque les objectifs des coupes stratigraphiques sont de délimiter les entités hydrogéologiques régionales et de déterminer l'épaisseur des dépôts sur l'ensemble du territoire CHCN, les données sources cartographiques et de forages ont été simplifiées pour ne présenter que deux types de roc (cristallin et calcaire) et 5 types de dépôts meubles (till, gravier, sable, argile et organique). Ces simplifications permettent d'identifier les principaux contextes stratigraphiques régionaux.

La précision de l'information contenue dans les coupes stratigraphiques dépend de la qualité et de la quantité de l'information stratigraphique disponible. Par conséquent, les coupes stratigraphiques ne remplacent pas les études locales. Aussi, au fur et à mesure que de nouvelles connaissances stratigraphiques seront disponibles, les coupes stratigraphiques pourront être modifiées.

8.2.4 Cartes #15 – Épaisseur des dépôts meubles et #16 – Topographie du roc

L'épaisseur des dépôts meubles est modélisée en partie (astroblème de Charlevoix et basses terres de la Haute-Côte-Nord) par l'interpolation de l'épaisseur des dépôts issue principalement des forages virtuels, lesquels sont extraits de chacune des coupes stratigraphiques suivant un pas régulier de 500 m. Par conséquent, l'épaisseur des dépôts résulte d'une estimation qui dépend de l'interprétation et de la précision de l'information stratigraphique de chacune des coupes stratigraphiques. Les cartes de la topographie du roc dépendent de la précision de l'estimation de l'épaisseur des dépôts et donc de la précision des mêmes données sources; ces cartes rencontrent donc les mêmes limites d'utilisation.

La faible quantité d'information sur l'épaisseur des dépôts, principalement dans les zones où ils sont les plus épais, augmente le niveau d'incertitude du modèle de topographie du roc. L'acquisition de nouvelles données est nécessaire dans ces secteurs pour pouvoir améliorer la précision du modèle. De plus, la création de nouvelles coupes stratigraphiques dans des endroits stratégiques comme les vallées ou dans les zones présentant peu d'informations permettrait de raffiner le maillage des forages virtuels et ainsi augmenter la précision du modèle d'épaisseur des dépôts.

Un autre élément qui permettrait d'améliorer les modèles serait de numériser les principales lignes de fractures (*breaklines*) associées au roc et de les ajouter comme données sources dans l'interpolation. La sélection des données pour diminuer l'effet de grappes des données sources permettraient certainement d'améliorer le modèle dans les zones de forte densité d'information. Les différences risquent cependant d'être peu significatives à une échelle régionale.

Le fait de fixer l'épaisseur des dépôts à la profondeur des forages n'atteignant pas le roc sous-estime l'épaisseur des dépôts à la verticale de ces stations. Les stations où le forage n'atteint pas le roc pourraient être ajoutées comme données sources à l'interpolation de telle sorte que la profondeur du forage corresponde à une épaisseur

minimale de dépôts. Ainsi, à proximité de ces stations, l'interpolateur pourra estimer une valeur d'épaisseur supérieure à la profondeur de la station.

8.2.5 Cartes #17 – Contextes hydrogéologiques et #18 – Limites des aquifères régionaux

La cartographie constitue une image à un temps donné de l'état des connaissances hydrogéologiques. La précision des limites des aquifères est estimée de l'ordre du km. De plus, l'ensemble de la méthodologie de découpage des entités hydrogéologiques se base sur une délimitation de l'environnement suivant une caractérisation du milieu en termes de potentiel aquifère, de type de perméabilité, de type de porosité et de degré de confinement de la nappe. Ainsi, la faible quantité de données disponibles sur les propriétés hydrauliques et hydrogéochimiques n'a pas permis de prendre en compte ces paramètres, même si la méthode de délimitation utilisée aurait permis de le faire.

Les limites de contextes hydrogéologiques et d'aquifères sont établies à l'échelle régionale. Elles sont de bons indicateurs mais ne peuvent remplacer des études locales spécifiques effectuées par un hydrogéologue et comprenant possiblement des forages, des interprétations stratigraphiques ou des essais de pompage.

8.2.6 Carte #19 – Piézométrie

La piézométrie régionale est estimée à partir des valeurs de cotes issues de l'élévation du réseau hydrographique. Les mesures d'élévation de l'hydrographie de la base de données topographiques du Québec (BDTQ; présentées sous la forme de données linéaires ou surfaciques) sont converties en données ponctuelles à l'aide du logiciel *ArcMap* d'*ArcGIS*, et leur élévation est extraite du modèle numérique d'altitude (MNA). La piézométrie régionale a été obtenue en interpolant l'élévation de l'hydrographie surfacique. L'utilisation unique des points d'élévation hydrographique induit indéniablement un biais dans l'estimation de la surface piézométrique régionale. Dans ce contexte, l'élévation de l'eau souterraine est considérée comme identique à l'élévation des eaux de surface. Cette méthode est donc discutable d'un point de vue quantitatif (profondeur ou élévation de la nappe).

Pour valider les résultats obtenus avec cette méthode, les points de cote piézométrique issus d'ouvrages réels sur le terrain ont été utilisés afin de comparer les valeurs de piézométrie ponctuelle contenues dans la base de données avec les valeurs interpolées à partir de l'hydrographie. La mise en graphique des valeurs réelles en fonction des valeurs interpolées correspondantes indique un coefficient de détermination (R^2) de 0,89 pour les 1 303 points de validation illustrant le bon degré de corrélation de cette interpolation.

8.2.7 Carte #21 – Paramètres hydrogéologiques

Parmi les données disponibles, certaines ont été jugées non représentatives, notamment les données obtenues suite à l'analyse d'essais de pompage simultanés et en interférence, et d'essais de pompage suivant la réhabilitation d'un puits, le développement ou le redéveloppement d'un puits. Les deux derniers cas donnent de l'information sur la capacité spécifique qui caractérise davantage l'ouvrage de captage que le milieu hydrogéologique. De plus, les données pour lesquelles il n'y a pas d'information sur le type de milieu hydrogéologique capté (perméable ou semi-perméable) ont également été retirées.

Aussi, pour plusieurs des puits d'observation, la base de données spatiales contient plus d'une valeur pour une même propriété hydraulique. Afin d'associer une seule valeur par paramètre pour un puits donné, sachant que ces valeurs se situent dans le même ordre de grandeur, la moyenne arithmétique de chaque paramètre a été estimée et utilisée.

De ce fait, les valeurs extrêmes (minimum et maximum) compilées pour une propriété peuvent représenter la précision des interprétations et non la valeur du paramètre considéré. Régionalement, il est donc conseillé d'analyser en priorité les valeurs moyennes et médianes de chaque paramètre. Pour les mêmes raisons, la caractérisation hydrogéologique quantitative des paramètres hydrauliques des aquifères ne présente pas d'analyse de la variation spatiale de ces paramètres, mais plutôt un portrait statistique des valeurs moyennes pour un environnement donné.

8.2.8 Carte #22 – Vulnérabilité des aquifères selon la méthode DRASTIC

L'indice de vulnérabilité calculé selon la méthode DRASTIC s'applique au premier milieu aquifère rencontré à partir de la surface des terrains. Un milieu aquifère correspond à un milieu dont les propriétés sont favorables à l'écoulement de l'eau souterraine, que ce milieu contienne de l'eau ou non. Dans certaines situations, il arrive que la vulnérabilité soit estimée pour un milieu aquifère moins important et moins vulnérable, alors qu'un milieu aquifère à plus fort potentiel et plus vulnérable est situé juste en dessous; c'est le cas notamment d'un dépôt de till qui recouvre un roc calcaire. La vulnérabilité à elle seule ne comporte pas de notion de risque pour laquelle il est nécessaire d'identifier un aléa, soit une activité anthropique ou une condition naturelle qui pourrait altérer la qualité de l'eau souterraine.

L'indice de vulnérabilité selon la méthode DRASTIC résulte de la combinaison de plusieurs données cartographiques disponibles, dont la profondeur du toit de la nappe qui a le poids le plus élevé (5), la recharge qui a un poids de 4 et l'impact de la zone vadose qui a un poids de 5. Ces trois paramètres influencent de façon significative la valeur de l'indice de vulnérabilité. Deux de ces paramètres dépendent de la profondeur du toit de la nappe extraite de la carte piézométrique obtenue par interpolation et dont le résultat indique des profondeurs importantes aux variations brusques de topographie (rupture de pente), souvent à proximité des cours d'eau. Ceci reflète un manque de cohérence avec le postulat qui indique que chaque cours d'eau correspond à un affleurement de la nappe.

Plusieurs intrants de la méthode DRASTIC utilisent ou sont issus d'une donnée commune, notamment la carte #12 – *Géologie du Quaternaire*. En effet, cette carte est utilisée pour 1) estimer le ruissellement dans le calcul de la recharge, 2) identifier le premier aquifère rencontré, 3) identifier le type de sol qui est issu d'une reclassification de cette carte et 4) caractériser le milieu correspondant à la zone vadose. Par conséquent, la carte #12 – *Géologie du Quaternaire* contrôle l'indice de vulnérabilité qui pourrait presque correspondre à une reclassification de cette carte.

Plusieurs autres méthodes d'estimation de la vulnérabilité peuvent être adoptées. Il serait fort intéressant de réaliser un projet comparatif de l'estimation de la vulnérabilité obtenue avec différentes méthodes. Cet exercice permettrait une analyse plus objective des résultats présentés sur la carte #22 – *Vulnérabilité de l'aquifère situé le plus près de la surface*.

8.2.9 Carte #23 – Activités potentiellement polluantes

La densité des activités potentiellement polluantes a été obtenue à partir d'une classification des activités telles qu'elles apparaissent dans les Codes d'utilisation des biens-fonds (CUBF). Bien qu'un effort remarquable ait été réalisé pour classer l'impact potentiel sur l'eau souterraine des activités apparaissant dans les CUBF, toutes les activités n'apparaissent pas dans ces codes. Aussi, la nature des activités peut contribuer à évaluer les impacts potentiels sur l'eau souterraine; de plus beaucoup d'autres sources de pollution ne sont pas considérées parmi ces activités. C'est pourquoi l'impact potentiel sur l'eau souterraine doit être évalué à partir de visites sur les sites afin de considérer toutes les sources de contamination potentielle.

Bien que les activités anthropiques puissent représenter un aléa qui pourrait altérer la qualité de l'eau souterraine, elles doivent être mises en relation avec la vulnérabilité pour identifier ou estimer un risque potentiel. Ainsi, une activité peut avoir un impact potentiel élevé sur l'eau souterraine, mais présenter un faible risque si elle ne se situe pas dans une zone vulnérable.

8.2.10 Cartes #24 – Qualité (critères eau potable) et #25 – Qualité (objectifs esthétiques)

Les paramètres caractérisant la qualité de l'eau dans le cadre du projet PACES-CHCN sont essentiellement de caractères physique et chimique. Toutefois, les paramètres analysés sont incomplets pour qualifier la potabilité de l'eau. En effet, parmi les paramètres chimiques les cyanures et le mercure n'ont pas été analysés et aucun paramètre microbiologique n'a été analysé. Ainsi, même si certains puits ne présentent pas de dépassement pour les paramètres analysés, ils pourraient en présenter pour les paramètres qui n'ont pas été analysés.

Aussi, la qualité de l'eau est variable dans le temps. Par conséquent, un suivi de la qualité de l'eau est recommandé pour l'eau souterraine captée par les puits individuels.

8.2.11 Carte #26 – Utilisation de l'eau

L'estimation de l'utilisation de l'eau, tant de surface que souterraine, a été obtenue à partir de données disponibles tels les volumes d'eau prélevée annuellement par les réseaux municipaux et les grands préleveurs (plus de 75 m³/jour). Les valeurs estimées reposent aussi sur un certain nombre d'hypothèses, notamment :

- la consommation domestique journalière par individu estimée à 250 l/jour;
- la consommation journalière par tête pour différents élevages, laquelle provient de chartes du MAPAQ;
- le pourcentage de pertes d'eau dans les réseaux de distribution estimé à 20%, ce pourcentage correspondant à l'objectif visé par la Stratégie québécoise d'économie d'eau potable du MAMROT; cette valeur de 20% représente donc fort probablement une sous-estimation du pourcentage réel de perte.

Pour obtenir une estimation plus précise des quantités d'eau utilisées, des sondages et des études devraient être menées. L'ajout de compteurs d'eau localisés de façon stratégique sur le réseau et à la tête des puits municipaux ou collectifs permettrait également de préciser les volumes d'eau consommée au quotidien ou sur une base annuelle.

8.2.12 Carte #28 – Zones de recharge préférentielles et de résurgence

Les zones où la recharge annuelle estimée est supérieure à 250 mm sont considérées des zones de forte recharge. Cette valeur est arbitraire et elle représente environ 25% des précipitations annuelles. Les zones de recharge préférentielle quant à elles correspondent aux zones où le ratio de la recharge sur les précipitations est supérieur à 40%.

Les zones de suintement ou d'affleurement potentiel de la nappe ont été déterminées par la soustraction de la piézométrie aux valeurs de topographie de surface. Ces zones correspondent aux secteurs où localement la piézométrie interprétée se situe au-dessus de la surface du sol. Par conséquent, les limitations applicables à la carte piézométrique s'appliquent également à la détermination de ces zones.

8.3 Recommandations pour l'amélioration des connaissances hydrogéologiques pour le territoire CHCN

Les résultats du PACES-CHCN constituent les connaissances hydrogéologiques du territoire municipalisé des MRC de Charlevoix, de Charlevoix-Est et de La Haute-Côte-Nord. Ces connaissances résultent d'informations locales obtenues à des stations disséminées sur le territoire; leur intégration régionale repose sur des estimations et des interprétations permettant des interpolations entre les stations d'observations. La qualité des connaissances hydrogéologiques à l'échelle régionale dépend donc en grande partie de la qualité et de la quantité de données disponibles à l'échelle locale.

Cette section propose 7 recommandations et propositions d'actions pour l'acquisition de nouvelles données dans le but d'améliorer les connaissances visant à protéger et à valoriser la ressource «Eau souterraine».

8.3.1 Estimations et suivi de la qualité des eaux souterraines

La chimie et, par extension, la qualité des eaux souterraines sont des enjeux majeurs du XXI^{ème} siècle, puisqu'elles conditionnent la potabilité et de ce fait l'appellation des eaux souterraines par le terme de Ressource. Les campagnes de levés géochimiques du projet PACES-CHCN ont ainsi révélées que l'eau d'un certain nombre de puits individuels présente des dépassements de normes de potabilité. Or, aucun suivi n'est présentement effectué sur la géochimie de l'eau et sa variation dans le temps. Aussi les mécanismes d'acquisition des caractéristiques chimiques ou de minérales des eaux souterraines de cette région sont encore inconnus.

De plus, les travaux du PACES-CHCN portent essentiellement sur les caractéristiques chimiques des eaux souterraines, mais leur potabilité dépend également de leurs compositions bactériologique et virologique. Actuellement ce type de suivi est facilité sporadiquement par des organismes de bassin versant sur une base de volontariat mais il devrait être développé de façon plus systématique. L'amélioration des connaissances sur la chimie et la qualité des eaux souterraines est donc une problématique majeure d'intérêt scientifique mais également un devoir socio-politique lié à la Santé publique.

Recommandation 1: Mise en place de programmes de suivi de la chimie de l'eau souterraine des puits individuels.

Recommandation 2: Appui aux campagnes d'échantillonnage et d'analyse bactériologique de l'eau des puits souterraines menées par les OBV.

8.3.2 Estimation et suivi de la quantité des eaux souterraines

Les eaux souterraines font partie d'un grand cycle hydrologique naturel facilement impacté par des activités anthropiques. L'estimation de la quantité d'eau souterraine en circulation ou en stockage dans les réservoirs souterrains ne peut donc s'effectuer que par l'acquisition de données de façon continue et pérenne notamment sur les aspects suivants :

1. météorologie et hydrométrie;
2. stratigraphies;
3. piézométrie;
4. extraction et utilisation de l'eau souterraine.

8.3.2.1 Réseau de suivi météorologique et des changements climatiques

Les quantités d'eau de précipitations et leurs variations au cours du temps représentent le premier facteur d'importance dans l'estimation des volumes d'eau souterraine. Elles conditionnent l'intégralité du cycle de l'eau : plus il pleut, plus les niveaux et les volumes d'eau souterraine sont élevés. Ainsi le Service de l'information du milieu atmosphérique (SIMAT) à la Direction du suivi de l'état de l'environnement (DSÉE) du MDDELCC possède un grand nombre de stations constituant un réseau de suivi climatique dont les données sont traitées par le centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). Toutefois, les conditions météorologiques sont d'une grande variabilité spatiale et ce réseau devrait être densifié pour permettre une estimation continue et plus exacte de ces variations.

Quant aux changements climatiques, leurs effets sur les quantités d'eaux souterraines peuvent être détectés par un réseau de piézomètres judicieusement localisés sur le territoire et soumis à des mesures de niveau d'eau. Un seul piézomètre de ce type est implanté actuellement sur le territoire du PACES-CHCN dans le cadre du plan d'action sur les changements climatiques du MDDELCC.

Recommandation 3: Optimisation et densification des réseaux de suivi météorologique et des changements climatiques.

8.3.2.2 Acquisition de données stratigraphiques

On ne peut quantifier un volume d'eau souterraine sans connaître les volumes du sol et du sous-sol. Or, l'état des connaissances stratigraphiques pour les régions CHCN est encore limité. Les mécanismes qui ont produit la mise en place des dépôts meubles quaternaires sont très complexes; ces dépôts nécessiteraient des études plus poussées et un grand nombre de forages pour être caractérisés.

Une campagne provinciale de forages stratigraphiques serait très intéressante mais financièrement discutable. De façon plus pragmatique, il serait préférable d'envisager un système de recensement ou de déclaration des forages réalisés dans un contexte privé comme il se fait déjà pour les forages réalisés dans le cadre municipal.

Recommandation 4: Déclaration obligatoire auprès des organismes gouvernementaux des forages réalisés autant dans le cadre privé que gouvernemental et municipal.

8.3.2.3 Acquisition de données piézométriques

Comme il est souvent mentionné, les eaux souterraines sont soumises à un écoulement dynamique et continu, elles ne sont pas statiques. La connaissance du niveau des nappes, quotidienne ou hebdomadaire, permettrait à long terme d'évaluer plus précisément les volumes d'eau disponibles mais également les modifications saisonnières des écoulements souterrains. Un tel système de surveillance du niveau des eaux souterraines permettrait également aux municipalités exploitantes de prévoir ou d'anticiper d'éventuelles baisses d'approvisionnement en eau potable.

Recommandation 5: Mise en place d'un réseau de suivi du niveau piézométrique des eaux souterraines.

8.3.2.4 Acquisition de données sur l'utilisation des eaux souterraines

L'objectif d'une gestion durable de la ressource en eaux souterraines ne peut être atteint sans une évaluation de l'impact de l'exploitation des eaux souterraines. Cette évaluation doit prendre en compte l'intégralité des quantités d'eau prélevée ou ajoutée. Dans la pratique, l'estimation exacte de ces quantités n'est possible qu'à l'aide de compteurs d'eau placés à la sortie des puits privés et avant chaque consommateur raccordé à un réseau municipal. Dans le cadre d'un réseau municipal, ce type d'installation a le double avantage de fournir une mesure précise des consommations mais également, par soustraction des volumes prélevés, d'évaluer et possiblement de minimiser les pertes le long du réseau d'adduction.

Recommandation 6: Mise en place d'un système permettant d'estimer les quantités d'eau prélevée.

8.3.2.5 Centralisation et valorisation des données hydrogéologiques

Une donnée seule n'exprime que peu de chose. Un ensemble de données fournit une information. Et ce n'est que la compilation et l'interprétation de plusieurs informations qui construit une connaissance. L'ensemble des trois années d'études dans le cadre du projet PACES-CHCN a permis cette compilation et cette interprétation des données existantes sur les eaux souterraines, pour obtenir cette description de l'état général des connaissances hydrogéologiques sur ce territoire en 2015.

Mais l'acquisition de données sur les eaux souterraines ne s'arrête pas en 2015. D'une part, beaucoup de rapports existants et contenant des données pertinentes sur les eaux souterraines n'ont pas encore été compilés. Ces rapports sont réalisés par des firmes d'experts-conseils pour des travaux d'investigation hydrogéologique ou géotechnique, mais également par des entreprises privées, publiques ou parapubliques. D'autre part, la collecte de données relatives aux eaux souterraines doit continuer dans le futur, notamment par les associations, les municipalités, les entreprises et par les organismes gouvernementaux.

Le défi futur réside donc dans la mise en place de mécanismes permettant d'assurer le suivi et le maintien des données hydrogéologiques dans une base de données. Il est en effet important d'améliorer ces connaissances de façon continue, sinon la pertinence des connaissances déjà acquises va s'effriter avec le temps.

Recommandation 7: Mise en place de mécanismes permettant d'assurer le maintien et la mise à jour en continu des données hydrogéologiques dans une base de données.

Recommandation 8: Mise en place de dispositions permettant d'assurer l'interprétation des données hydrogéologiques pour un maintien et une amélioration des connaissances régionales sur les eaux souterraines.

8.4 Recommandations pour une meilleure gestion régionale de la ressource en eau souterraine

L'amélioration des connaissances sur les eaux souterraines permettra une valorisation et une meilleure protection de la ressource en eau. Cette valorisation et cette protection doivent toutefois s'inscrire dans une perspective de communication et de développement durable de la ressource, ce qui nécessite une gouvernance et une gestion cohérente et concertée. Afin de structurer une gouvernance efficiente il est important de définir les différents intervenants dans la gestion des eaux souterraines.

8.4.1 Les producteurs de données

La production de données sur les eaux souterraines est réalisée quotidiennement tant dans le secteur public que privé. Annuellement Un grand nombre d'études sont ainsi réalisées chaque année par des consultants ou des organismes publiques pour répondre aux besoins scientifiques, réglementaires ou environnementaux. Ces producteurs de données incluent les suivants :

- entreprises de forages ;
- consultants, notamment en hydrogéologie, géologie, environnement et en, géotechnique;
- municipalités ;
- universités ;
- OBNL.

Cette liste est non-exhaustive et peut être complétée suivant les organismes d'intérêt existants dans chaque région.

8.4.2 Les gestionnaires de données

Cette gestion des données est réalisée depuis trois ans par le CERM de l'UQAC dans le cadre du projet PACES-CHCN. Le mandat du CERM en ce sens prend fin le 31 mars 2015. Il est donc important de se pencher sur une suite à donner au projet PACES en ce qui concerne le stockage et la gestion des données récemment acquises. Ce sont les objectifs visés par la recommandation 7 et la recommandation 8. .

8.4.3 Les diffuseurs de la donnée

Une saine gestion et valorisation de la ressource en eau passe également par un système de communication publique des connaissances, pour former, informer et sensibiliser le public et les utilisateurs des données hydrogéologiques. Les organismes de bassin versant (OBV) présents sur le territoire CHCN jouent actuellement un rôle majeur dans la sensibilisation des intervenants et la diffusion des informations sur l'eau. Ces organismes n'ont cependant pas présentement les ressources humaines avec la compétence en hydrogéologie requise pour une prise en compte efficace des eaux souterraines dans l'utilisation du territoire.

8.4.4 La gouvernance

L'eau souterraine est, selon la Loi sur l'eau de 2009¹⁶ un bien collectif et d'intérêt public. De ce fait la gouvernance de la gestion de l'eau souterraine devrait être réalisée régionalement par une entité qui inclurait les organismes politiques en place incluant les municipalités et les MRC.

8.4.5 La concertation

Dans une perspective de développement régional, il est important de souligner l'intérêt de la concertation pour une gouvernance éclairée d'une ressource aussi importante que les eaux souterraines. Cette concertation devrait regrouper l'ensemble des intervenants mentionnés ci-dessus ainsi que les ministères concernés afin de

¹⁶ Loi affirmant le caractère collectif des [Loi affirmant le caractère collectif des ressources en eau et visant à renforcer leur protection](http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/protection/index.htm)
<<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/protection/index.htm>>

définir les cadres réglementaires et les grandes orientations régionales pour une meilleure gestion de la ressource.

La gestion de la ressource en eau souterraine revient présentement aux municipalités et donc indirectement aux MRC. De plus les OBV ont des mandats de concertation et de sensibilisation, et sont axés en priorité sur les eaux de surface. Ces organismes ne disposent pas actuellement des ressources permettant une concertation efficace et le développement des connaissances sur les eaux souterraines.

Le schéma de la figure 8-1 illustre une structure de gestion de l'eau souterraine applicable régionalement. Le territoire CHCN devrait avoir à sa disposition les ressources humaines et matérielles pour supporter les MRC et les OBV dans la gestion des données et l'orientation d'interventions portant sur les eaux souterraines. Une telle structure de gestion permettrait une bonne gouvernance des eaux souterraines à l'échelle régionale.

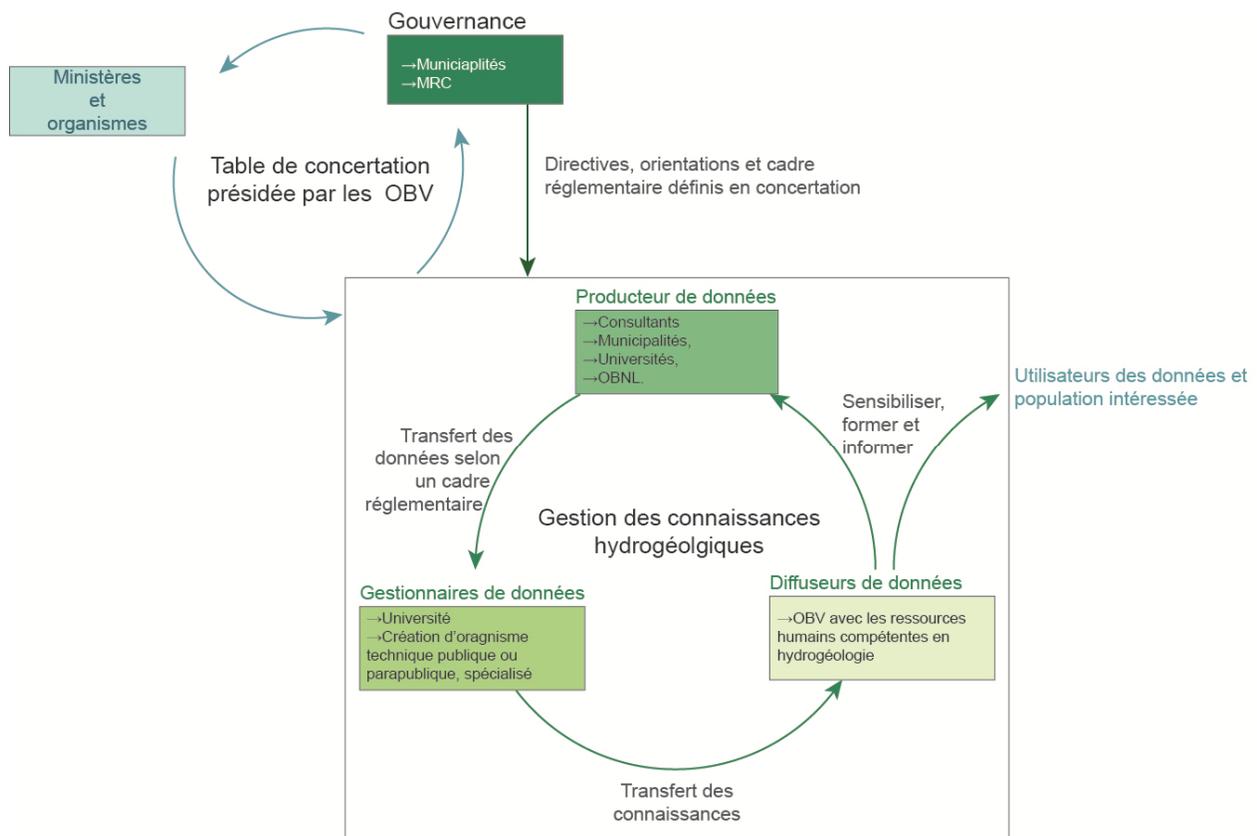


Figure 8-1 : Proposition de structure de gestion régionale de la ressource en eau souterraine.

RÉFÉRENCES

- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J., Petty, R. et Hackett, G., 1987. DRASTIC : A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Setting. National Water Well Association, Dublin Ohio / EPA Ada, Oklahoma, USA. EPA-600/2-87-035.
- Banton, O. et Bangoy, L.M., 1999. Hydrogéologie : multiscience environnementale des eaux souterraines. Presses de l'Université du Québec, 460 p.
- Belt E., Riva J. et Bussièrès L., 1979. Revision and correlation of late Middle Ordovician stratigraphy northeast of Quebec City. Canadian Journal of Earth Sciences, 16 : 1467-1483.
- Bisson J. et Roberge F., 1983. Préviation des apports naturels : Expérience d'Hydro-Québec, workshop on flow predictions. Toronto: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Bourdet D., Ayoub J.A. et Pirard Y.M., 1989. Use of Pressure Derivative in Well Test Interpretation. SPE Form Eval. doi: 10.2118/12777-PA
- Brisebois D. et Brun J., 1994. La Plate-Forme du Saint-Laurent et les Appalaches. Dans Géologie du Québec. Coordonné par Michel Hocq, pp. 95-120.
- Buchner E., Schmieder M., Schwarz W.H., Trieflof M. et Hopp J., 2012. An early/middle Devonian (40)Ar/(39)Ar age for the Charlevoix impact structure (Quebec, Canada) – An approach closer to reality. Meteoritics and planetary science, V.47, Special issue Si SUPPLEMENT 1, p.A85.
- Bussièrès L., Merthens C.J., Belt E.S. et Riva J., 1977. Late Middle Ordovician shelf, slope and flysch facies between Baie St.Paul and La Malbaie, Quebec : Dans 69th annual meeting New England Intercollegiate Geological Conference, Québec, field trip B-9, p. 1-26.
- CERM-PACES, 2013. Résultats du programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines de la région Saguenay – Lac-Saint-Jean. Centre d'études sur les ressources minérales, Université du Québec à Chicoutimi.
- Constable S.C, Parker R.L. et Constable C.G., 1987. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. Geophysics, vol. 52, pp. 289-300.
- Cousineau P., Poirier B., Brouard E., El Amrani M., Roy D.W., Walter J., Lambert M. et Lajeunesse P., 2014. Rapport final sur les travaux de cartographie des formations superficielles réalisés dans les territoires municipalisés de la Haute-Côte-Nord et de Charlevoix (Québec) entre 2012 et 2014.
- Cronshey R., 1986. Urban hydrology for small watersheds. US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division. Technical Release 55, 101 p.
- Cyr-Parent I., 2014. Comparaison et validation de méthodes d'estimation des volumes d'eau consommés annuellement pour trois catégories d'usage, résidentiel, agricole et industriel-commercial-institutionnel : l'exemple de la municipalité de Saint-Hilarion à Charlevoix. Rapport de stage dans le cadre du cours *Stage de géographie et d'aménagement durable*, Université du Québec à Chicoutimi, 38 p.
- Dionne J.-C. et Occhietti S., 1996. Aperçu du Quaternaire à l'embouchure du Saguenay, Québec. Géographie physique et Quaternaire, 50 : 5-34.
- Dugrain V., 2011. Utilisation d'ArcGIS pour l'interpolation du socle rocheux – Mise en place d'une méthodologie et application à la région du Saguenay – Lac Saint-Jean (Québec, Canada). Rapport de TFE, Cycle Ingénieur de l'École nationale des sciences géographiques, France, 22 p.
- Durov S. A., 1948. Natural waters and graphic representation of their composition. Dans Dokl Akad Nauk SSSR, 59 : 87-90.
- Fillastre, U. 2010. Utilisation d'ArcGIS pour la représentation multidimensionnelle des structures hydrogéologiques. Rapport de projet pluridisciplinaire, École nationale des sciences géographiques, France. 42 p.
- Fitterman, D.V. et Labson, V.F., 2005. Electromagnetic Induction Methods for Environmental Problems. Dans Near-surface geophysics, *édité par* D.K. Butler, Society of Exploration Geophysicists, chapitre 10, pp. 301-355.
- Foulon T., 2014. Quels facteurs géologiques contrôlent les paramètres hydrauliques des aquifères? Exemple de la région de Charlevoix / Haute-Côte-Nord. Projet de fin d'études, Université du Québec à Chicoutimi, 39 pages.

- Freeze R.A. et Cherry J.A., 1979. *Groundwater*: Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 604 p.
- Ghesquière O., Walter J., Chesnaux R. et Rouleau A., 2015. Scenarios of groundwater chemical evolution in a region of the Canadian Shield based on multivariate statistical analysis. Article soumis à *Journal of Hydrology : Regional Studies*.
- Gouvernement du Québec, 2011. Stratégie québécoise d'économie d'eau potable. [\[http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/grands_dossiers/strategie_eau/strategie_eau_potable.pdf\]](http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/grands_dossiers/strategie_eau/strategie_eau_potable.pdf) 38 p.
- Govare E., 1994. Géomorphologie et paléoenvironnement de la région de Charlevoix, Québec, Canada, Université de Montréal. Thèse: 429 p.
- Gangbazo, G. (2011). Guide pour l'élaboration d'un plan directeur de l'eau : un manuel pour assister les organismes de bassin versant du Québec dans la planification de la gestion intégrée des ressources en eau. Québec, Québec : ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/guide-elaboration-pde.pdf>
- Hardy L., 1970. Géomorphologie glaciaire et post-glaciaire de St-Siméon à Saint-François d'Assises (Comtés de Charlevoix Est et de Chicoutimi). Québec, Université Laval. Maîtrise ès Arts en géographie, 122 p.
- Hawkins R.H., Jiang R., Woodward D.E., Hjelmfelt A.T. et Van Mullem J.A., 2002. Runoff Curve Number Method: Examination of the Initial Abstraction Ratio. Proceedings of the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Las Vegas, Nevada (U.S. Geological Survey).
- Hocq M. 1994. La province de Grenville. *Dans Géologie du Québec. Coordonné par Michel Hocq*, pp. 75-94.
- Huet M. 2015. Comparaison de méthodes d'estimation de la recharge des aquifères : exemple de la région Charlevoix – Haute-Côte-Nord. Université du Québec à Chicoutimi. Mémoire : 93 p.
- Lajeunesse P., St-Onge G., Duchesne M. et Occhietti S., 2008. Late-Wisconsinan grounding lines of the Laurentide Ice Sheet margin in north-western Gulf of St.-Lawrence. *Dans Quebec 2008: 400 Years of Discoveries*. Joint Meeting of the Geological Association of Canada, Mineralogical Association of Canada, Society of Economic Geologists and the *Society Geology Applied to Mineral Deposits*, May 26-28, 2008, Québec City, QC.
- Lajeunesse P., Rousseau C., St-Onge G. et Occhietti S., 2011. Younger Dryas end moraines and ice-contact fans in the northwestern Gulf of St. Lawrence / Moraines et cônes de contact glaciaire du Dryas récent dans le nord-ouest du Golfe du Saint-Laurent. *GeoHydro 2011*, Québec, Québec, Canada.
- Lemieux Y., Tremblay A. et Lavoie D., 2000. Stratigraphy and structure of the St. Lawrence Lowland in the Charlevoix area, Quebec : relationships to impact cratering. *Geological Survey of Canada, Current Research 2000-D2*, 7 p.
- Lemieux Y., Tremblay A. et Lavoie D., 2003. Structural analysis of supracrustal faults in the Charlevoix area, Quebec : relation to impact cratering and the St-Laurent fault system. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 40 : 221-235.
- MacCormack K. E., Brodeur J.J. et Eyles C.H., 2011. Assessing the Impact of Data Quantity, Distribution, and Algorithm Selection on the Accuracy of 3D Subsurface Models. *GeoHydro 2011, Congrès conjoint de l'Association canadienne pour l'étude du Quaternaire (CANQUA) et de la Section canadienne de l'Association internationale des hydrogéologues*, Québec, 28-31 août 2011, 6p.
- Mayzonnat, G. et Larocque, M. 2011. Étude de la vulnérabilité de l'eau souterraine sur la zone Bécancour (Centre-du-Québec). *GeoHydro 2011, Congrès conjoint de l'Association canadienne pour l'étude du Quaternaire (CANQUA) et de la Section canadienne de l'Association internationale des hydrogéologues*, Québec, 28-31 août 2011.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 2012. Cartographie détaillée des milieux humides des basses terres du Saint-Laurent et de la plaine du Lac Saint-Jean – Structure physique des données. Projet de collaboration MDDEP et Canards Illimités (en cours de réalisation), 13 p.
- Ministère des Ressources naturelles, 2013. Système d'informations géologiques.
- Mockus V., 1949. Estimation of total (and peak rates of) surface runoff for individual storms. Exhibit A in Appendix B, Interim Survey Report (Neosho) River Watershed USDA.
- Mockus V., 1964. Personnel communication, Letter to Orrin Ferris dated March 5, 1964.
- Monfet J., 1979. Évaluation du coefficient de ruissellement à l'aide de la méthode SCS modifiée. Gouvernement du Québec, ministère des Richesses naturelles : Service de l'hydrométrie. 35 p.

- Morin G. 1987. Géologie des régions de Sacré-Cœur et de Grandes-Bergeronnes, Haute-Côte-Nord. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Direction générale de l'Exploration géologique et minérale, ET 85-11, 25 p.
- Murat, V. 2000. Étude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution: application aux aquifères granulaires du piedmont laurentien. Mémoire, INRS – Géoressources. 127 p.
- Parent M., Paradis S.J. et Boivin R., 2010. Formations superficielles, Légende et notes descriptives – 1/50 000 à 1/225 000, version 10. CGC-Québec.
- Pelton, J.R., 2005. Near-Surface Seismology : Surface-Based Methods. Dans *Near-surface geophysics*, édité par D.K. Butler, Society of Exploration Geophysicists, chapitre 8, pp. 219-263.
- Petit V., Hanot F., Pointet T. (2003) – Référentiel hydrogéologique BD RHF®. Guide méthodologique de découpage des entités. BRGM/RP-52261-FR, 101 p., 17 fig., 3 ann.
- Poirier C., Fortier Fillion T.-C., Turcotte R. et Lacombe P. 2012. 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, 112 p.
- Rasmussen H., Rouleau A. et Chevalier S. (éditeurs), 2006 (2^e éd.). *Outils de détermination d'aires d'alimentation et de protection de captage d'eau souterraine*; Centre d'études sur les ressources minérales, UQAC, et Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, mars 2006, 385 pages. <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/souterraines/alim-protex/index.htm>
- Rivers T., Martignole J., Gower C.F. et Davidson A., 1989. New Tectonic Divisions of the Grenville Province, Southeast Canadian Shield. *Tectonics*, 8 : 63-84.
- Robertson P.b., 1968. Nouvel impact météoritique fossile? La structure semi-circulaire de Charlevoix. *Journal canadien des sciences de la Terre*, 5 : 1305-1317.
- Rondot J., 1968. Nouvel impact météoritique fossile? La structure semi-circulaire de Charlevoix. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 5 : 1 305-1 317.
- Rondot, J. 1969. Géologie de la région de la rivière Malbaie. Ministère de l'Énergie et des Ressources, RP-576, 31 p.
- Rondot, J. 1972. La transgression ordovicienne dans le Comté de Charlevoix, Québec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 9 : 1187-1203.
- Rondot J. 1979. Région de Saint-Siméon. Ministère des Richesses naturelles, Guide touristique GT-6, 24 p.
- Rondot J. 1986. Géologie de la région de Forestville – Les Escoumins. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Direction générale de l'Exploration géologique et minérale, ET 85-05, 46 p.
- Rondot J. 1989a. Géologie de Charlevoix. Série de manuscrits bruts. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, rapport MB 89-21, 606 p.
- Rondot J. 1989b. Pseudotachylite and mylonite. *Meteoritics*, 24 : 320-321.
- Roy, D.W. 1979. Origin and evolution of the Charlevoix cryptoexplosion structure, Princeton University. Thèse, 190 p.
- Roy, D.W., Schmitt, L., Woussen, G., et Du Berger, R., (1993). Lineaments from airborne SAR images and the 1988 Saguenay earthquake, Québec, Canada. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 59: 1299-1305.
- Saint-Julien P. et Hubert C., 1975. Evolution of the taconian orogen in the Quebec Appalachians. *American Journal of Science*, 275: 337-362.
- Séguin J.J., Mardhel V., avec la collaboration de Schomburgk S. (2012). Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA, version beta. Présentation du référentiel, principes de construction et mise en oeuvre. Rapport final. BRGM/RP-61034-FR. 154 p., 57 ill., 2 ann., 1 DVD.
- Simard P., Chesnaux R., Rouleau A., Daigneault R., Cousineau P.A., Roy D.W., Lambert M., Poirier B., et Poignant-Molina L., 2015. Imaging Quaternary glacial deposits and basement topography using the transient electromagnetic method for modeling aquifer environments. *Soumis au Journal of Applied Geophysics*, APPGEO3370.
- Theis C.V., 1935. The relation between the lowering of the Piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Trans Am Geophys Union* 16:519–524.

- Tremblay A., Roden-Tice M.K., Brandt J.A. et Megan T.W., 2003. Mesozoic fault reactivation along the St. Lawrence rift system, eastern Canada: Thermochronologic evidence from apatite fission-track dating, *Geological Society of America*, 125: 794-810.
- Tremblay A. et Lemieux Y., 2001. Supracrustal faults of the St. Lawrence rift system between Cap-Tourmente and Baie-Saint-Paul, Quebec; Geological Survey of Canada, Current Research 2001-D15, 8 p.
- UNESCO-OMM (1992). Glossaire international d'hydrologie, en quatre langues (Anglais, Espagnol, Français, Russe), Seconde édition, UNESCO-OMM, Paris/Genève, pour les versions anglaise, espagnole, française et russe.
- Vries J.J. et Simmer I., 2002. Groundwater recharge : an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*, 10 : 5-17.
- Woodward D.E., Hawkins R.H., Jiang R., Hjelmfelt Jr. A.T., Mullem J.A. et Van&Quan Q.D., 2003. Runoff Curve Number Method: Examination of the Initial Abstraction Ratio. Dans Proceedings of the World Water and Environmental Resources Congress and Related Symposis, American Society of Civil Engineers Publications, Philadelphia, PA., vol. 10, No. 40685. 308 p.
- Zhang L., Dawes W.R. et Walker G.R., 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 37 : 701-708.
- Zonge K., Wynn J. et Urquhart S., 2005. Resistivity, induced polarization, and complex resistivity. Dans Near-surface geophysics, *édité par* D.K. Butler, Society of Exploration Geophysicists, chapitre 9, pp. 265-300.