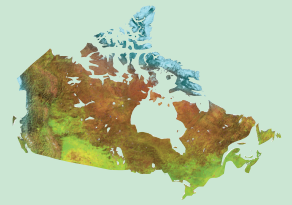




Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada



Commission géologique du Canada Bulletin 587



Inventaire canadien des ressources en eau souterraine : Caractérisation hydrogéologique régionale et intégrée du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec

M.M. Savard (coordonnatrice)

2013

Canada 



Commission géologique du Canada
Bulletin 587

**Inventaire canadien des ressources en eau souterraine :
Caractérisation hydrogéologique régionale et intégrée du
système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec**

M.M. Savard (coordonnatrice)

PARTIE I

Hydrogéologie régionale du système aquifère fracturé

M.M. Savard, M. Nastev, D. Paradis, R. Lefebvre, R. Martel,
V. Cloutier, V. Murat, É. Bourque, M. Ross, K. Lauzière,
M. Parent, A. Hamel, J.-M. Lemieux, R. Therrien, A. Bolduc,
M. Rocher, O. Salad Hersi, D. Kirkwood, S. Castonguay et
P. Gélinas

PARTIE II

**Étude quantitative des ressources
en eau souterraine**

M. Nastev, M.M. Savard, D. Paradis, R. Lefebvre et M. Ross

2013

©Sa Majesté la Reine du chef du Canada 2013

ISSN 0068-7626
N° de catalogue M42-587F-PDF
ISBN 978-0-660-20851-0
doi:10.4095/291348

Les bibliothèques de dépôt d'un bout à l'autre du pays ont accès à la présente publication par l'intermédiaire du site Web du Programme des services de dépôt (<http://dsp-psd.tpsgc.gc.ca>).

On peut télécharger cette publication gratuitement à partir de GEOSCAN (<http://geoscan.sst.rncan.gc.ca/>).

This publication is also available in English

Pour demander la permission de reproduire cette publication, en tout ou en partie, à des fins d'utilisation commerciale, de revente ou de rediffusion, s'adresser à l'agent d'information sur le droit d'auteur, pièce 650, 615, rue Booth, Ottawa (Ontario) K1A 0E9.
Courriel :
Droitd'auteurSST@RNCan.gc.ca

Notation bibliographique conseillée

Savard, M.M. (coord.), 2013. Inventaire canadien des ressources en eau souterraine : Caractérisation hydrogéologique régionale et intégrée du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec; Commission géologique du Canada, Bulletin 587, 106 p. doi:10.4095/291348

Illustration de la page couverture

Contexte hydrogéologique de la partie sud de la région d'étude. Village de Saint-Benoît (municipalité régionale de comté de Mirabel) au pied des collines d'Oka formées de roches intrusives crétacées et de roches métamorphiques précambriennes. En avant-plan, plaine agricole de Saint-Benoît formée par les argiles de la Mer de Champlain. Cette importante unité quaternaire confine le système aquifère de roches sédimentaires fracturées d'âge paléozoïque.
Photo : V. Cloutier. 2010-201

Lecture critique

Y. Michaud

A. Rivera

Auteurs

A. Bolduc (Andree.Bolduc@dfo-mpo.gc.ca)
É. Bourque (Edith.Bourque@bape.gouv.qc.ca)
S. Castonguay (Sebastien.Castonguay@RNCan-NRCan.gc.ca)
D. Kirkwood (Donna.Kirkwood@RNCan-NRCan.gc.ca)
K. Lauzière (Kathleen.Lauziere@RNCan-NRCan.gc.ca)
V. Murat (valerie.murat.cha@ssss.gouv.qc.ca)
M. Nastev (Miroslav.Nastev@RNCan-NRCan.gc.ca)
D. Paradis (Daniel.Paradis@RNCan-NRCan.gc.ca)
M. Parent (Michel.Parent@RNCan-NRCan.gc.ca)
M.M. Savard (MartineM.Savard@RNCan-NRCan.gc.ca)
Commission géologique du Canada
490, rue de la Couronne
Québec (Québec) G1K 9A9

V. Cloutier (vincent.cloutier@uqat.ca)
R. Lefebvre (rene.lefebvre@ete.inrs.ca)
R. Martel (richard.martel@ete.inrs.ca)
M. Rocher (muriel.rocher@irs.n.fr)
M. Ross (maross@uwaterloo.ca)
O. Salad Hersi (oshersi@squ.edu.om)
INRS-ETE, Université du Québec
490, rue de la Couronne
Québec (Québec) G1K 9A9

P. Gélinas (décédé)
A. Hamel (Andreanne.Hamel@genivar.com)
J.-M. Lemieux (jmlemieux@ggl.ulaval.ca)
R. Therrien (rtherrie@ggl.ulaval.ca)
Département de géologie et de génie géologique
Université Laval
1065, avenue de la Médecine
Québec (Québec) G1V 0A6

PRÉFACE

Afin de protéger la qualité de l'eau souterraine et d'en garantir une quantité durable, une gestion basée sur une information scientifique rigoureuse est nécessaire. Au Canada, près de 30 % de la population dépend de l'eau souterraine pour son approvisionnement. Cependant, l'étendue des ressources en eau souterraine du Canada est pratiquement inconnue.

Les résultats de deux ateliers nationaux organisés par Ressources naturelles Canada en 2000 et 2001, ainsi que de plusieurs consultations couvrant l'ensemble du pays, présentent la même conclusion générale : un inventaire des ressources en eau souterraine du Canada constitue maintenant une nécessité.

De par son expertise dans le domaine des sciences de la Terre, la Commission géologique du Canada est fortement impliquée dans la cartographie des aquifères régionaux. Le programme « Les eaux souterraines » du Secteur des sciences de la Terre de Ressources naturelles Canada comprend un projet d'inventaire détaillé des ressources en eau souterraine du Canada.

Les priorités de recherche inscrites au programme « Les eaux souterraines » ont été établies lors des ateliers nationaux et font partie du document *Cadre canadien de collaboration en matière d'eau souterraine*. Ces priorités comprennent la caractérisation quantitative détaillée de la dynamique d'aquifères régionaux (recharge, durabilité, vulnérabilité) et l'inventaire national des ressources en eau souterraine.

Le projet « Caractérisation hydrogéologique régionale et intégrée du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec » (dont le précurseur s'appelait AFSOQ, acronyme de « Aquifères fracturés du sud-ouest du Québec ») constitue un premier exemple de cet inventaire, basé sur une approche combinant la cartographie géologique, l'hydrogéologie régionale et la modélisation numérique des eaux souterraines.

Ce projet de caractérisation s'aligne directement avec le programme « Les eaux souterraines » du Secteur des sciences de la Terre. En plus, de par sa collaboration scientifique multi-institutionnelle et son partenariat financier multipartite, il s'inscrit parfaitement dans le contexte du Cadre canadien de collaboration en matière d'eau souterraine.

Alfonso Rivera
Chef hydrogéologue et gestionnaire du
programme « Les eaux souterraines »
Commission géologique du Canada
Secteur des sciences de la Terre
Ressources naturelles Canada

PREFACE

Ensuring the availability of sustainable quantities of groundwater and protecting the quality of the resource requires management based on a rigorous body of scientific information. In Canada, close to 30% of the population depends on groundwater for its water supply. However, the extent of the country's groundwater resources is virtually unknown.

The results of two national workshops organized by Natural Resources Canada in 2000 and 2001, as well as several consultations covering the entire country, point to the same general conclusion: an inventory of Canadian groundwater resources is now a necessity.

Through its expertise in the Earth sciences, the Geological Survey of Canada is heavily involved in mapping regional aquifers. The Groundwater Program of Natural Resources Canada's Earth Sciences Sector includes a detailed inventory of Canada's groundwater resources.

The research priorities of the Groundwater Program were established at the national workshops and form part of the document *Canadian framework for collaboration on groundwater*. These priorities include the detailed quantitative characterization of regional aquifer dynamics (recharge, sustainability, vulnerability) as well as the national inventory of groundwater resources mentioned above.

The project 'Integrated regional hydrogeological characterization of the fractured aquifer system of southwestern Quebec' (which had a precursor named AFSOQ, the French initialism for 'Fractured aquifers of southwestern Quebec') is an initial step toward creating a Canadian inventory built on an approach that combines geological mapping, regional hydrogeology, and numerical groundwater modelling.

This characterization project is directly aligned with the Groundwater Program of the Earth Sciences Sector. In addition, as a scientific collaboration involving several institutions and a multi-party financial partnership, the project falls perfectly within the scope of the Canadian Framework for Collaboration on Groundwater.

Alfonso Rivera
Chief Hydrogeologist and Groundwater Program Manager
Geological Survey of Canada
Earth Sciences Sector
Natural Resources Canada

CONTENTS

PRÉFACE.....	iii
PREFACE.....	iv
RÉSUMÉ/ABSTRACT.....	1
SOMMAIRE/ SUMMARY.....	2
INTRODUCTION.....	7
Un premier exemple de caractérisation régionale intégrée pour l’inventaire canadien des ressources en eau souterraine.....	7
Cadre de la caractérisation hydrogéologique régionale.....	7
Objectifs de l’étude.....	7
Présentation des résultats.....	8
Échelle des travaux et applicabilité des résultats.....	8
Remerciements.....	8
PARTIE I :	
HYDROGÉOLOGIE RÉGIONALE DU SYSTÈME AQUIFÈRE FRACTURÉ.....	9
SITUATION, HYDROLOGIE, TOPOGRAPHIE, CLIMAT ET TRAVAUX ANTÉRIEURS.....	9
APPROCHE ET MÉTHODOLOGIE.....	11
Levés de terrain.....	13
Travaux de laboratoire et traitement des données.....	14
GÉOLOGIE DU TERRITOIRE.....	15
HYDROSTRATIGRAPHIE DES SÉDIMENTS QUATERNAIRES.....	18
Les vallées enfouies.....	18
La plaine de till.....	22
L’esker de Sainte-Thérèse.....	26
La zone à chenaux secondaires et dépôts résiduels.....	26
Les petits aquifères locaux.....	26
DÉLIMITATION DU SYSTÈME AQUIFÈRE RÉGIONAL.....	26
L’aquifère rocheux régional.....	26
Les zones de recharge.....	28
Les conditions de confinement.....	28
CARACTÉRISTIQUES DU SYSTÈME AQUIFÈRE ROCHEUX.....	28
Propriétés hydrauliques de l’unité mixte (roches très fracturées et sable-gravier).....	28
Propriétés hydrauliques des roches fracturées.....	29
Essais d’injection à charge constante à l’aide d’obturateurs pneumatiques (essais Lugeon).....	29
Essais de capacité spécifique.....	31
Essais de pompage.....	31
Niveaux d’eau et écoulement de l’eau souterraine.....	33
Réseau de surveillance et variations temporelles des niveaux d’eau souterraine.....	33
Caractéristiques de l’aquifère régional.....	35

CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET QUALITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE	37
Approche méthodologique	37
Évaluation de la qualité de l'eau souterraine	37
Variabilité régionale de la qualité de l'eau souterraine et représentation graphique.....	37
Concentrations chimiques et critères de qualité.....	39
Types d'eau	41
Secteurs de qualité relative de l'eau souterraine	58
Classification par secteur.....	58
Description des secteurs de qualité relative de l'eau.....	58
Implications pour la consommation de l'eau	61
ÉVALUATION DE LA RECHARGE.....	61
Infiltration des précipitations.....	61
Résurgence — débit de base des rivières	62
Recharge du système aquifère régional et bilan hydrologique	62
VULNÉRABILITÉ DU SYSTÈME AQUIFÈRE RÉGIONAL À LA CONTAMINATION	66
Approche : méthode DRASTIC	66
Carte de vulnérabilité DRASTIC	67
Études connexes	76
Zones les plus vulnérables à la contamination.....	76
CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET RECOMMANDATIONS	76
Principales conclusions découlant de la caractérisation hydrogéologique	77
Caractérisation du système aquifère régional	77
La qualité de l'eau souterraine	77
Évaluation de la recharge	78
Vulnérabilité du système aquifère.....	78
Comment trouver de l'eau souterraine de qualité en quantité exploitable sur le territoire étudié?.....	78
Recommandations pour la gestion et la protection des eaux souterraines	79
Sur le plan régional	79
À l'échelle locale.....	79
Programme de protection	80
PARTIE II :	
ÉTUDE QUANTITATIVE DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE.....	81
OBJECTIFS	81
LE CONCEPT D'EXPLOITATION DURABLE	81
APPROCHE ET MÉTHODES	82
ÉVALUATION DE L'UTILISATION DE L'EAU SOUTERRAINE ET DE LA	
PRODUCTIVITÉ DES PUIITS	82
Utilisation de l'eau souterraine	82
Productivité apparente des puits.....	84
Sommaire sur l'utilisation anthropique de l'eau souterraine	84

MODÈLE NUMÉRIQUE RÉGIONAL.....	87
Construction du modèle numérique	87
Calage du modèle numérique.....	88
Modèle numérique tridimensionnel produit.....	92
DISPONIBILITÉ EN EAU SOUTERRAINE	92
Simulation de la recharge régionale	92
Bilan d'eau global pour le système aquifère régional.....	92
Volume emmagasiné	94
Sommaire sur la disponibilité en eau souterraine	95
ÉVALUATION DES DÉBITS DURABLES	95
Les effets à long terme d'un pompage uniforme accru.....	95
Les effets à long terme d'une diminution de la recharge	96
Les débits durables pour la région étudiée.....	97
LES ZONES DU TERRITOIRE LES PLUS FAVORABLES À L'EXPLOITATION	99
LIMITES DE L'ÉTUDE ET DÉVELOPPEMENTS FUTURS	99
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	101
Conclusions	101
Recommandations.....	102
RÉFÉRENCES.....	102

Figures

1. Limites de la zone étudiée.....	10
2. Distribution des principaux bassins versants et situation des stations de jaugeage des rivières.....	10
3. Schéma conceptuel de l'approche préconisée dans le présent travail de recherche	11
4. Géologie du substratum rocheux	16
5. Géologie du substratum rocheux : coupe 1.....	17
6. Géologie du substratum rocheux : coupes 2 et 3	17
7. Géologie du substratum rocheux : coupes 4 et 5	18
8. Altitude de la surface du socle rocheux	19
9. Distribution et épaisseur de quelques unités quaternaires	20
10. Géologie des formations superficielles : coupes A-A' et B-B'	21
11. Géologie des formations superficielles : coupe C-C'	21
12. Géologie des formations superficielles : coupes D-D' et E-E'	22
13. Géologie des formations superficielles	23
14. Géologie des formations superficielles : légende.....	24
15. Épaisseur des matériaux superficiels	25
16. Contextes hydrogéologiques.....	27
17. Modèle hydrostratigraphique pour le système aquifère du sud-ouest du Québec	28

18. Résultats des essais hydrauliques dans l'unité mixte.....	29
19. Distribution de la transmissivité par rapport à la profondeur des quatre principaux types de roches de la région.....	30
20. Sommaire des données de transmissivité obtenues à partir des essais d'injection à charge constante.....	31
21. Sommaire des données de conductivité hydraulique obtenues à partir d'essais de capacité spécifique.....	31
22. Logarithme de la conductivité hydraulique de l'aquifère rocheux.....	32
23. Altitude de la surface piézométrique de l'aquifère rocheux.....	34
24. Situation des puits d'observation des niveaux d'eau du réseau de surveillance du système aquifère fracturé.....	35
25. Fluctuations des niveaux d'eau pour deux puits d'observation, pour la période de 1978 à 1984.....	36
26. Distribution des sites d'échantillonnage.....	38
27. Distribution du pH.....	42
28. Concentration de sulfate, SO_4	43
29. Concentration de manganèse, Mn.....	44
30. Concentration de fer, Fe.....	45
31. Concentration de baryum, Ba.....	46
32. Concentration de sulfure, HS.....	47
33. Distribution de la dureté totale.....	48
34. Concentration de fluorure, F.....	49
35. Concentration de sodium, Na.....	50
36. Concentration de chlorure, Cl.....	51
37. Concentration de matières dissoutes totales, MDT.....	52
38. Concentration de nitrate, NO_3	53
39. Distribution du taux d'adsorption du sodium, TAS.....	54
40. Diagrammes radiaux et types d'eau.....	56
41. Secteurs de qualité relative de l'eau souterraine.....	57
42. Distribution des sites d'étude de la recharge.....	61
43. Gradients hydrauliques verticaux.....	63
44. Distribution de la recharge de l'aquifère rocheux (approche de Darcy).....	64
45. Principales zones de recharge de l'aquifère rocheux.....	65
46. Méthode DRASTIC : profondeur à la nappe.....	68
47. Méthode DRASTIC : recharge.....	69
48. Méthode DRASTIC : type d'aquifère.....	70
49. Méthode DRASTIC : type de sol.....	71
50. Méthode DRASTIC : topographie du sol.....	72
51. Méthode DRASTIC : influence de la zone vadose.....	73
52. Méthode DRASTIC : conductivité hydraulique.....	74

53. Vulnérabilité de l'aquifère rocheux à la contamination : méthode DRASTIC	75
54. Zones favorables à l'exploitation de l'eau souterraine	79
55. Utilisation de l'eau souterraine	83
56. Productivité apparente des puits domestiques complétés dans l'aquifère rocheux	85
57. Maillage d'éléments finis avec les conditions aux limites du modèle numérique	87
58. Piézométrie simulée de l'aquifère rocheux	89
59. Distribution spatiale du ratio des conductivités hydrauliques simulées de l'unité mixte et de la couche 2 de l'unité de roches fracturées	90
60. Charge hydraulique simulée en régime permanent pour la couche 2	91
61. Comparaison des charges hydrauliques mesurées et simulées pour la couche 2	91
62. Recharge simulée de l'aquifère rocheux	93
63. Bilan global de l'aquifère	94
64. Effets du pompage uniforme ajouté au pompage actuel sur la charge hydraulique du système aquifère fracturé	97
65. Distribution des différences de rabattement entre les simulations 1 et 3 du tableau 20	97
66. Effets du décroissement de la recharge sur le rabattement de la charge hydraulique du système aquifère rocheux	98
67. Distribution des rabattements simulés lors d'une recharge diminuée à 90 % de la recharge actuelle	98
68. Zones favorables à l'utilisation d'eau souterraine	100

Tableaux

1. Paramètres consignés lors des campagnes de cartographie des aquifères	12
2. Contenu de la base de données	12
3. Principaux levés hydrogéologiques effectués au cours des campagnes de terrain	13
4. Conductivité hydraulique des roches paléozoïques fracturées	30
5. Fluctuations des niveaux d'eau dans les puits d'observation traversant les roches fracturées	36
6. Critères de qualité microbiologiques et nombre de cas de dépassement	39
7. Critères de qualité physicochimiques et nombre de cas de dépassement résultant des analyses en laboratoire	40
8. Critères de qualité physicochimiques et nombre de cas de dépassement résultant des mesures in situ	41
9. Statistiques physicochimiques par unité hydrogéologique	55
10. Synthèse hydrogéochimique de chaque secteur	59
11. Recharge régionale basée sur l'approche de Darcy	66
12. Débits annuels des rivières, taux de résurgence et taux de ruissellement pour les stations de jaugeage	66
13. Répartition de l'utilisation anthropique de l'eau souterraine par type d'activité	84
14. Débit apparent des puits selon le type de roche	86
15. Situation et débit de pompage des puits municipaux	86

16. Paramètres hydrauliques des unités hydrostratigraphiques du modèle conceptuel	87
17. Paramètres statistiques des résidus pour les neuf simulations de base	88
18. Taux de résurgence estimés par séparation des hydrogrammes des rivières et par modélisation numérique.....	94
19. Bilan hydrologique estimé au site de la carrière de Saint-Eustache	94
20. Résultats de la simulation sans pompage et de la simulation finale pour les conditions d'écoulement actuelles	96
21. Résultats de la simulation finale et des simulations avec recharge réduite.....	98

Inventaire canadien des ressources en eau souterraine : Caractérisation hydrogéologique régionale et intégrée du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec

Résumé

Le système aquifère du sud-ouest du Québec dans la région des Basses-Laurentides se compose principalement de roches sédimentaires fracturées cambro-ordoviciennes, appartenant à la province géologique de la Plate-forme du Saint-Laurent. L'unité la plus transmissive de l'aquifère se situe au sommet de la séquence rocheuse. Elle contient des roches intensément fracturées et une couche de sédiments quaternaires d'origine fluvioglaciale. Le plancher de l'aquifère se situe à 100 m de profondeur, où les roches deviennent moins perméables, et son toit se compose de till et d'argile quaternaires.

En termes de qualité reliée à la santé, le bilan des dépassements des critères chimiques gouvernementaux indique que l'eau souterraine est de bonne qualité sur la majeure partie du territoire. À l'échelle régionale, l'eau souterraine est très peu contaminée par les activités humaines. Le territoire d'étude a été subdivisé en sept secteurs classés sur une échelle de qualité relative. Sur cette base, les secteurs où l'eau souterraine est de meilleure qualité sont ceux de Saint-Hermas et de rivière du Nord, ainsi que celui composé des sous-secteurs de Lachute/Saint-Janvier, de Sainte-Monique/Saint-Eustache et de la côte Saint-Vincent.

Les zones les plus vulnérables à la contamination depuis la surface du sol couvrent environ 35 % du territoire étudié. Le reste du territoire est naturellement protégé par les couches imperméables de till et d'argile.

L'utilisation anthropique de l'eau souterraine pour la période d'étude est de $14,8 \times 10^6$ m³/a, soit une lame d'eau équivalente de 11 mm/a sur l'ensemble du territoire. La majeure partie de l'eau souterraine est utilisée pour la consommation humaine d'eau potable (42 %) et l'exploitation des carrières (37 %), tandis que les activités agricoles consomment de manière modérée (17 %). On constate que l'irrigation des terrains de golf (environ 1 %) et l'embouteillage commercial (3 %) représentent une petite partie de l'utilisation actuelle. Le taux annuel d'extraction d'eau par la population est jugé durable puisque le rabattement qu'il entraîne est faible et ne dépasse pas la fluctuation moyenne naturelle des niveaux piézométriques. Dans certaines zones, les débits annuels pourraient être augmentés jusqu'à 26×10^6 m³/a de façon durable.

Abstract

The aquifer system in the Lower Laurentians region of southwestern Quebec is hosted primarily by Cambro-Ordovician fractured sedimentary rocks that are part of the geological province known as the St. Lawrence Platform. The most transmissive unit of the aquifer is found at the top of the rock sequence and consists of highly fractured rocks and a layer of glaciofluvial Quaternary sediments. The floor of the aquifer is located 100 m below the surface, where the rocks become less permeable, and the aquifer is capped by Quaternary deposits of till and clay.

In terms of quality as it relates to human health, an evaluation of exceedances of government criteria indicates that groundwater quality throughout most of the study area is good. At the regional level, groundwater is relatively uncontaminated by human activities. The study area was subdivided into seven sectors, which were classified on the basis of relative groundwater quality. The sectors with the highest groundwater quality are Saint-Hermas, Rivière du Nord, and a sector made up of the three subsectors of Lachute/Saint-Janvier, Sainte-Monique/Saint-Eustache, and Côte Saint-Vincent.

The areas most vulnerable to contamination from the surface occupy approximately 35% of the study area. The remaining 65% is naturally protected by impermeable till and clay layers.

The rate of anthropogenic use of groundwater during the study period was 14.8×10^6 m³/a, equivalent to a water depth of 11 mm/a throughout the area. The primary uses of groundwater are human consumption (42%), quarry operations (37%) and, to a lesser extent, agricultural consumption (17%). Golf course irrigation (~1%) and commercial water bottling (3%) account for a small percentage of current use. The annual rate of total extraction for human activities is considered to be sustainable because the resulting drawdown does not exceed the average natural fluctuation in piezometric levels. In some areas, annual extraction could be sustainably increased to as much as 26×10^6 m³/a.

SOMMAIRE

La caractérisation hydrogéologique régionale et intégrée du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec constitue le principal objet du partenariat de recherche impliquant Ressources naturelles Canada, Développement économique Canada, le ministère de l'Environnement du Québec, le Conseil régional de développement des Laurentides (CRDL), et les municipalités régionales de comté (MRC) d'Argenteuil, Mirabel, Deux-Montagnes et Thérèse-De Blainville. Les principaux objectifs visés par le partenariat étaient de décrire le système aquifère, de connaître la qualité des eaux souterraines, d'évaluer la quantité d'eau souterraine disponible sur le territoire, de faire l'inventaire de l'utilisation humaine, d'estimer le pompage uniforme permettant une exploitation durable de la ressource, et de faire des recommandations favorisant une gestion éclairée de la ressource.

Les travaux ont été exécutés par la Commission géologique du Canada en étroite collaboration avec le Centre Eau, Terre et Environnement de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS-ETE) et l'Université Laval, et avec l'appui d'Environnement Canada, du ministère de l'Environnement du Québec, de l'Université Queen's, du United States Geological Survey, et du ministère des Transports du Québec.

Dans sa première partie, le présent bulletin synthétise les résultats de tous les travaux de terrain effectués de 1999 à 2002, les compilations de données hydrogéologiques existantes et acquises au cours du projet, et l'analyse et l'interprétation de ces données, et il présente des recommandations sur la gestion et la protection des ressources en eau souterraine du territoire étudié. Dans sa seconde partie, il présente l'étude quantitative des ressources en eau souterraine. Enfin, les 48 illustrations thématiques de la région contenues dans ce bulletin synthétisent les principales connaissances d'échelle régionale générées pendant le projet. Les grandes lignes des deux parties du bulletin sont présentées dans ce sommaire.

Partie I : Hydrogéologie régionale du système aquifère fracturé

Cette partie du bulletin renferme une synthèse des données géologiques, hydrostratigraphiques, hydrauliques, piézométriques, hydrogéochimiques, et hydrologiques décrivant le système aquifère des Basses-Laurentides dans la région d'étude.

Travaux hydrogéologiques

Les interprétations scientifiques présentées se basent sur les éléments suivants : 505 points de mesure des niveaux d'eau dans la région, le suivi des niveaux d'eau du réseau de surveillance dans 36 puits d'observation, 35 essais de pompage, 328 essais d'injection à charge constante, 132 essais de capacité spécifique, l'analyse de 146 échantillons d'eau souterraine, ainsi que les résultats de plusieurs méthodes d'estimation de la recharge des nappes et l'évaluation de la vulnérabilité à l'aide de la méthode DRASTIC.

SUMMARY

The main objective of the research partnership between Natural Resources Canada, Canada Economic Development, the Quebec Department of the Environment, the Conseil régional de développement des Laurentides (CRDL), and the regional county municipalities of Argenteuil, Mirabel, Deux-Montagnes and Thérèse-De Blainville was to produce an integrated regional hydrogeological characterization of the fractured aquifer system of southwestern Quebec. To this end, the partners set out to describe the aquifer system, verify groundwater quality, assess the quantities of groundwater available throughout the study area, inventory human uses, estimate a uniform pumping rate that will allow for the sustainable use of the resource, and make recommendations that will ensure its responsible management.

The work was carried out by the Geological Survey of Canada in close co-operation with the Centre Eau, Terre et Environnement of the Institut national de la recherche scientifique (INRS-ETE) and Laval University, with support from Environment Canada, the Quebec Department of the Environment, Queen's University, the United States Geological Survey, and the Quebec Department of Transport.

Part I of this bulletin presents a summary which includes all fieldwork results from 1999 to 2002, compilations of hydrogeological data acquired during the course of the project and pre-existing data, and the analysis and interpretation of these data. In addition, Part I also contains recommendations concerning the management and protection of groundwater resources in the study area. Part II of the bulletin presents the quantitative results of the study of groundwater resources. Forty-eight thematic illustrations summarize the regional-scale results of the project. An outline of parts I and II is presented below.

Part I – Regional hydrogeology of the fractured aquifer system

Part I of this bulletin includes a summary of geological, hydrostratigraphic, hydraulic, piezometric, hydrogeochemical, and hydrological data that describe the aquifer system of the Lower Laurentians in the study area.

Hydrogeological work

The scientific interpretations presented are based on 505 water-level measurement points throughout the region, water-level monitoring in a network of 36 observation wells, 35 pumping tests, 328 constant-head injection tests, 132 specific-capacity tests, analyses of 146 groundwater samples, the results of several methods of estimating recharge, and an assessment of groundwater vulnerability using the DRASTIC method.

L'écoulement de l'eau souterraine

Les levés piézométriques indiquent que l'écoulement de l'eau souterraine se fait généralement du nord vers le sud à une vitesse moyenne approximative de 150 m/a. L'écoulement est divergent à partir des hauteurs, qui constituent les zones de recharge préférentielle de l'eau souterraine car elles ne sont pas recouvertes d'argile. La carte des niveaux d'eau permet aussi d'observer que l'effet du pompage des plus importants ouvrages de captage ne perturbe généralement pas de façon importante les lignes d'écoulement régional. Les plus longues périodes d'enregistrement des niveaux d'eau souterraine du réseau de surveillance indiquent que ces niveaux d'eau sont relativement stables à long terme.

La qualité de l'eau souterraine de la région des Basses-Laurentides

À l'échelle régionale, l'eau souterraine du territoire d'étude est de qualité variable, mais elle est très peu contaminée par les activités humaines. Le territoire d'étude a été subdivisé en sept secteurs classés sur une échelle de qualité relative. Les secteurs où l'eau souterraine est de meilleure qualité sont les secteurs 1 (Saint-Hermas), 2 (rivière du Nord) et 3 (formé des sous-secteurs 3a, Lachute/Saint-Janvier, 3b, Sainte-Monique/Saint-Eustache, et 3c, côte Saint-Vincent). Les secteurs 4 (collines d'Oka) et 5 (Grenville/Chatham) ont une eau de qualité moyenne, alors que les secteurs 6 (constitué des sous-secteurs 6a, Sainte-Anne-des-Plaines, et 6b, Sainte-Thérèse) et 7 (Saint-Benoît/Saint-Joseph-du-Lac) ont une eau de qualité inférieure. Le bilan des dépassements des critères de qualité reliés à la santé indique que l'eau souterraine est de bonne qualité sur la majeure partie du territoire.

La recharge et la vulnérabilité du système aquifère fracturé

Le taux de recharge de la nappe aquifère régionale est estimé à 45 mm/a. Ce taux peut varier localement entre 0 et 327 mm/a selon la nature des matériaux et la topographie de la surface du sol. Selon le lieu, de 993 à 1204 mm de précipitation touche le sol en moyenne chaque année. De ce total, 39 % s'évapore, 56 % s'écoule par les rivières et environ 5 % participe à l'écoulement souterrain. Les principales zones de recharge préférentielle de l'aquifère régional couvrent environ 35 % du territoire étudié. Ces zones de recharge sont à protéger afin de prévenir toute forme de contamination des eaux souterraines. Elles se répartissent sporadiquement sur le territoire étudié, les plus étendues étant celles de Grenville/Saint-Philippe, de Carillon/Saint-André-Est, des collines d'Oka, et du triangle Deux-Montagnes/Saint-Augustin/Rosemère. La vulnérabilité à la contamination du système aquifère régional a été évaluée à partir de la méthode DRASTIC. Les zones vulnérables chevauchent les zones de recharge préférentielle et sont donc dispersées partout sur le territoire, sauf dans sa partie nord-est, appartenant principalement à la MRC de Thérèse-De Blainville.

Groundwater flow

Piezometric surveys indicate that overall groundwater flow moves from north to south at an average rate of approximately 150 m/a. Flow diverges from topographic highs, which form the preferential groundwater recharge areas because they are not clay-covered. The map of water levels also shows that, in general, regional flow lines are not significantly affected by pumping of the largest wells. The longest-duration groundwater-level records obtained from the monitoring network indicate that levels are relatively stable over the long term.

Groundwater quality in the Lower Laurentians

At the regional level, the quality of groundwater in the study area is variable, but the groundwater is relatively uncontaminated by human activities. The study area was subdivided into seven sectors, which were classified on the basis of relative groundwater quality. The sectors with the highest groundwater quality are sector 1 (Saint-Hermas), sector 2 (Rivière du Nord), and sector 3 (which is made up of subsectors 3a, Lachute/Saint-Janvier, 3b, Sainte-Monique/Saint-Eustache, and 3c, Côte Saint-Vincent). Groundwater quality is average in sectors 4 (Oka Hills) and 5 (Grenville/Chatham), and poor in sector 6 (which consists of subsectors 6a, Sainte-Anne-des-Plaines, and 6b, Sainte-Thérèse) and sector 7 (Saint-Benoît/Saint-Joseph-du-Lac). In terms of exceedances of health-related criteria, groundwater quality throughout most of the study area is good.

Recharge and vulnerability of the fractured aquifer system

The rate of recharge of the regional aquifer is estimated at 45 mm/a. This rate can vary locally from 0 to 327 mm/a, depending on the nature of the surface materials and topography. The various areas receive an annual average of 993 to 1204 mm of precipitation, of which 39% evaporates, 56% runs off into rivers, and approximately 5% enters the groundwater system. The main preferential groundwater recharge areas of the regional aquifer cover approximately 35% of the study area. These recharge areas, which are distributed sporadically throughout the study area, must be protected to prevent groundwater contamination. The largest such areas are those of Grenville/Saint-Philippe, Carillon/Saint-André-Est, the Oka Hills, and the Deux-Montagnes/Saint-Augustin/Rosemère triangle. The vulnerability of the regional aquifer system to contamination was evaluated using the DRASTIC method. Vulnerable areas overlap the preferential recharge areas and hence are found throughout the study area, with the exception of the northeast section, most of which is located in the regional county municipality of Thérèse-De Blainville.

L'exploitabilité du système aquifère fracturé

Au niveau régional, la principale ressource exploitable en eau souterraine se trouve dans les roches sédimentaires fracturées, particulièrement à l'interface du roc et des sédiments sus-jacents et jusqu'à une profondeur d'environ 100 m dans la séquence rocheuse. Au-delà de cette profondeur, les propriétés hydrauliques de l'aquifère sont beaucoup moins favorables à l'exploitation de l'eau souterraine. Deux secteurs dont les meilleures cibles pour l'exploration à la recherche de nouvelles sources d'approvisionnement en eau souterraine. Ces deux secteurs, Saint-Hermas (secteur 1 de qualité relative de l'eau souterraine) et rivière du Nord (secteur 2), montrent une grande perméabilité et une très bonne qualité de l'eau souterraine.

Recommandations

L'équipe de recherche recommande plusieurs actions afin d'assurer la protection et l'utilisation de la ressource en eau souterraine de façon durable. Une première série de recommandations s'adresse à l'échelle régionale :

- considérer la protection des ressources en eaux souterraines dans les schémas d'aménagement des MRC. On suggère d'intégrer les connaissances sur les eaux souterraines comme considération supplémentaire régissant la gestion du territoire;
- prendre des mesures qui protègent la qualité de l'eau souterraine et la santé publique, telles que la surveillance de l'eau des puits du réseau régional ou la révision de l'addition de fluorure dans certains cas;
- assurer la mise à jour de la base de données du projet;
- acquérir l'expertise requise en hydrogéologie pour exploiter les informations disponibles sur les ressources en eau souterraine dans la région;
- mettre en place un comité de gestion des eaux souterraines et établir un plan de gestion des eaux souterraines intégré au schéma d'aménagement des MRC.

À l'échelle locale, nous faisons les recommandations suivantes :

- tirer profit de l'information disponible à l'échelle régionale pour tous travaux d'échelle locale;
- protéger la qualité de l'approvisionnement des puits municipaux en effectuant la délimitation des aires d'alimentation des puits et en mettant en place un programme de protection;
- prendre des mesures pour éviter la dégradation de la qualité de l'eau souterraine dans les secteurs où l'eau peut avoir une qualité inférieure, en effectuant la surveillance de la qualité de l'eau des puits de pompage et d'observation afin d'intervenir à temps dans le cas d'une dégradation.

Exploitability of the fractured aquifer system

At the regional level, most of the usable groundwater is located in the fractured sedimentary rock, particularly at the rock/sediment interface, to a depth of approximately 100 m in the rock sequence. Beyond that depth, the hydraulic properties of the aquifer are much less favourable to groundwater extraction. Two sectors, which account for approximately 15% of the study area, offer the greatest potential in terms of exploration for new sources of groundwater supply. These two sectors, Saint-Hermas (defined as sector 1 on the basis of relative groundwater quality) and Rivière du Nord (sector 2), are characterized by high permeability and very high groundwater quality.

Recommendations

The research team recommends that several steps be taken to protect the groundwater resource and ensure its sustainable use. The following series of recommendations is applicable at the regional level:

- take groundwater protection into account in land-use planning in the regional county municipalities and include information on groundwater resources as an additional consideration in land-use management;
- take measures to protect groundwater quality and public health; for example, monitor water from the wells of the regional system, or review fluoride additions in certain cases;
- keep the project database up to date;
- acquire the hydrogeological expertise needed to make use of the available information on groundwater resources in the region;
- form a groundwater management committee and establish a groundwater management plan that will be integrated into each regional county municipality's land-use management plan.

The following recommendations apply at the local level:

- for all local projects, draw on the information available at the regional level;
- protect the quality of municipal well supplies by defining well supply areas and implementing a protection program;
- in sectors where groundwater may already be of inferior quality, take measures to prevent a deterioration in the quality by monitoring water quality at pumping and observation wells, in order to be able to take timely action in the event of degradation.

Partie II : Étude quantitative des ressources en eau souterraine

Cette seconde partie du bulletin présente l'étude quantitative de la ressource en eau souterraine et vise à fournir les connaissances nécessaires pour choisir les options de gestion afin d'exploiter l'eau souterraine en tenant compte de sa dynamique et de sa qualité. Cette étude est basée principalement sur la modélisation numérique hydrogéologique du système aquifère régional. On y présente un résumé des données essentielles à la modélisation, et les bases de la modélisation numérique en régime permanent servant à prédire le comportement de l'aquifère à l'échelle régionale. Les simulations numériques visent à estimer, non pas les débits d'exploitation, mais plutôt les niveaux d'eau limites à ne pas transgresser lors d'une extraction accrue de l'eau souterraine. On présente aussi les simulations numériques d'une baisse de la précipitation annuelle qui pourrait entraîner une diminution de la recharge de l'aquifère.

L'utilisation humaine de l'eau souterraine sur le territoire d'étude

L'utilisation actuelle de l'eau souterraine par la population consume 18 % de la recharge annuelle des nappes, ou l'équivalent de 11 mm de précipitation répartie sur tout le territoire. La consommation humaine représente 41,5 % de l'utilisation totale, soit 26,5 % pour les aqueducs et 15,0 % pour les puits domestiques, tandis que les carrières pompent un volume équivalant à 37,4 % de toute l'eau souterraine utilisée sur le territoire. On constate aussi que les activités agricoles reliées à l'élevage du bétail et à l'irrigation des cultures utilisent 17,1 % du volume d'eau souterraine pompé annuellement, alors que l'embouteillage commercial en représente 3,4 %, et l'irrigation des terrains de golf, 0,6 %.

Modélisation du taux de recharge

Le modèle numérique permet d'estimer le taux de recharge totale de l'aquifère régional à $84,7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$. Ce taux équivaut à 6,6 % de la précipitation moyenne annuelle pour la région et correspond à une lame d'eau uniforme de 69 mm. Cette valeur est de 53 % plus élevée que celle de 45 mm/a obtenue par l'approche de Darcy dans la première partie du bulletin.

Zones favorables pour l'exploitation de l'eau souterraine

Les résultats des simulations numériques des rabattements provoqués par un pompage uniforme, intégrés aux connaissances de la qualité relative des eaux souterraines, permettent d'identifier trois zones plus favorables pour l'exploitation accrue de l'eau souterraine : 1) le long de la rivière Rouge, et la vallée de Saint-Hermas; 2) la vallée de la rivière du Nord; et 3) le long des rivières du Chêne et du Chicot, de la partie amont de la rivière Mascouche, et de la partie aval de la rivière

Part II – Quantitative analysis of groundwater resources

Part II presents a quantitative analysis of the groundwater resource and aims to provide the information needed to select groundwater management options that take into account the dynamics and quality of groundwater. This analysis is based primarily on numerical modelling of the hydrogeology of the regional aquifer system. It includes a summary of the data required for modelling, as well as the bases of the steady-state numerical modelling used to predict the behaviour of the aquifer at the regional level. The purpose of the numerical simulations is not to estimate the operating flows, but rather to estimate the minimum water level limits to be respected during increased groundwater extraction. Numerical simulations are also presented for decreased annual precipitation that could result in reduced aquifer recharge.

Human use of groundwater in the study area

Current use of groundwater resources is equivalent to 18% of annual aquifer recharge, or an 11 mm deep layer of precipitation throughout the area. Human consumption accounts for 41.5% of total groundwater use in the study area — 26.5% for piped water systems and 15% for domestic wells — while quarries account for 37.4% of total use. Agricultural activities associated with livestock production and crop irrigation use 17.1% of the total volume of groundwater pumped annually, and commercial bottling and golf course irrigation account for 3.4% and 0.6%, respectively.

Modelling the recharge rate

Based on numerical modelling, the recharge rate for the regional aquifer as a whole is estimated at $84.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$. This rate corresponds to 6.6% of the average annual precipitation for the region and is equivalent to a uniform water depth of 69 mm. This figure is 53% higher than the 45 mm/a obtained by the Darcy approach in Part I.

Areas favourable to groundwater extraction

By combining information obtained through numerical simulation of drawdowns generated by uniform pumping with data on relative groundwater quality, three areas can be identified that are particularly favourable for increased groundwater use. These areas are 1) along the Rouge River, and the Saint-Hermas valley, 2) the Rivière du Nord valley, and 3) along the Rivière du Chêne and Rivière du Chicot, the upstream part of the Mascouche River, and the downstream part

du Nord, ainsi que la région entre les collines d'Oka et de Saint-André. (Noter que le nom « collines de Saint-André » est un nom informel et non un toponyme officiel.)

Débats durables

Les simulations numériques ont permis d'estimer à 0,6 m le rabattement médian provoqué par le taux de pompage actuel de $18 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$. Ce rabattement étant plus faible que la fluctuation médiane des niveaux piézométriques (1,6 m), le pompage actuel est donc jugé durable. Il est estimé que pour l'aquifère régional, il serait possible d'augmenter le débit de façon durable à environ $26 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$. Ce débit causerait des rabattements médians de 1,6 m. Notons que l'approche préconisée est d'échelle régionale et qu'elle se base strictement sur le bilan de masse global de l'aquifère; ainsi, à l'échelle locale, des rabattements plus importants (de l'ordre de dizaines de mètres) pourraient être entraînés.

Recommandations

Les résultats des simulations ont été obtenus pour des scénarios régionaux hypothétiques. Pour une situation réelle, comme par exemple la planification du développement relié à de nouvelles installations de pompage, l'application du modèle numérique aiderait à choisir la meilleure option pour la région. Il est à noter que le modèle numérique a été calé selon les conditions actuelles de recharge et d'écoulement. Un nouveau calage serait requis pour effectuer toute simulation si les conditions de départ changeaient.

La fonction de cause à effet entre le pompage et l'abaissement moyen de la nappe aquifère déterminé pour le territoire étudié dépend des conditions et propriétés connues à l'échelle régionale; elle n'est pas valide à l'échelle locale. Ainsi, dans tous les cas de gestion d'importantes nouvelles exploitations de l'eau souterraine, il est recommandé de relier le taux de pompage prévu aux rabattements anticipés à l'échelle d'intérêt spécifique à la nouvelle installation, et d'estimer les impacts potentiels du pompage (rabattements, qualité de l'eau, effets sur la résurgence vers les cours d'eau voisins, etc.).

Une série de cartes thématiques compilées à l'échelle de 1/200 000 (39), des coupes verticales montrant la géologie des roches paléozoïques (5), des coupes montrant la géologie des dépôts superficiels (5), et un bloc tridimensionnel de la géologie du Quaternaire avec trois planches visuelles, de même qu'une synthèse graphique et spatiale de l'utilisation de l'eau sur le territoire étudié, viennent appuyer les études des parties I et II. Cette série de cartes et de figures rend l'ensemble des connaissances sur le système aquifère facilement accessible. Ces illustrations aideront la prise de décision relativement aux ressources en eau souterraine, entre autres en permettant d'orienter des études locales essentielles à la planification de nouvelles installations.

of the Rivière du Nord, and in the area between the Oka and Saint-André hills. (Note that 'Saint-André hills' is an informal name and not an official geographic name.)

Sustainable yields

On the basis of the numerical simulations, the median drawdown generated at the current pumping rate of $18 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ is estimated at 0.6 m. Since this drawdown is less than the median fluctuation in piezometric levels (1.6 m), the current pumping rate is considered sustainable. In terms of the regional aquifer, it is estimated that the yield could be sustainably increased to approximately $26 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$. Such a yield would produce median drawdowns of 1.6 m. This is a regional-scale approach and is based strictly on the overall aquifer mass balance; hence, at the local scale, more significant drawdowns (of the order of tens of metres) could result.

Recommendations

The simulation results were obtained for hypothetical regional scenarios. For a real situation, such as development planning for new pumping facilities, application of the numerical model would facilitate the selection of the best option for the region. It should be noted that the numerical model was calibrated using current recharge and groundwater flow conditions. If the initial conditions were to change, subsequent simulations would require a new calibration.

The cause-effect relationship between pumping and average drawdown determined for the study area is a function of the conditions and properties that have been identified at the regional level and is not valid at the local scale. Therefore, in terms of the management of any major new groundwater extraction project, it is recommended that projected pumping rates be linked to anticipated drawdowns at a scale specific to the new installation, and that the potential impacts of pumping (drawdown, water quality, effects on discharge to nearby streams, etc.) be estimated.

The analyses presented in parts I and II are supported by 39 thematic maps compiled at a scale of 1:200 000, five vertical sections showing the geology of the Paleozoic rocks, five sections showing the geology of the surficial deposits, and a three-dimensional block diagram of the Quaternary geology with three illustrative plates, as well as a graphic, spatial synthesis of water use in the study area. This set of maps and figures offers ready access to the body of knowledge on the aquifer system — knowledge that will support decision-making related to groundwater resources in a variety of ways, for example by providing guidance for local studies essential to the planning of new facilities.

INTRODUCTION

Un premier exemple de caractérisation régionale intégrée pour l'inventaire canadien des ressources en eau souterraine

Lors de deux ateliers préparatoires tenus à Québec en 2000 (National Workshop on Groundwater) et à Calgary en 2001 (National Workshop on Groundwater II), la Commission géologique du Canada (Ressources naturelles Canada) et plusieurs autres organismes, en concertation avec les provinces canadiennes, ont souligné le manque de connaissances sur les ressources en eau souterraine canadiennes et identifié des besoins prioritaires afin d'assurer la sauvegarde de l'intégrité de ces ressources, ainsi que leur gestion durable. Dans l'esprit du Cadre canadien de collaboration en matière d'eau souterraine qui en a découlé (Rivera et al., 2003), le programme « Les eaux souterraines » du Secteur des sciences de la Terre de Ressources naturelles Canada vise à produire un inventaire canadien des ressources sur une base cartographique régionale. À long terme, l'inventaire doit prioritairement délimiter les systèmes aquifères régionaux, identifier leurs zones vulnérables de manière à protéger la qualité des ressources, et les quantifier de manière à favoriser leur développement durable.

Au Québec notamment, les aquifères en roches sédimentaires fracturées représentent un type largement distribué dont la caractérisation à l'échelle régionale constitue un enjeu de taille. En particulier, les preneurs de décision dans la région des Basses-Laurentides font face à des débats sur les usages de la ressource. Près de 50 % de la population utilise l'eau souterraine comme source d'eau potable, et des embouteilleurs, agriculteurs, éleveurs et industriels se côtoient sur le territoire. Les enjeux clés pour ce cas précis s'inscrivent dans la lignée des défis auxquels fera face la société canadienne au cours du XXI^{ème} siècle. Est-ce que l'aménagement actuel du territoire favorise la protection de la ressource? Quelle est la qualité de l'eau souterraine dans cette région? Existe-t-il des risques de contamination de l'eau dus aux activités humaines? En quelle quantité la ressource existe-t-elle? Peut-on en accroître l'extraction sur le territoire sans menacer sa pérennité et sa qualité?

Ces besoins de connaissances en termes de problématiques scientifiques et socioéconomiques ont conduit au projet « Caractérisation hydrogéologique régionale et intégrée du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec », dont l'exécution s'est étalée sur quatre années (1999-2003). Il s'agit de la première étude complétée dans le cadre du nouvel inventaire canadien des ressources en eau souterraine. Ce premier exemple utilise une approche multidisciplinaire combinant la cartographie géologique et l'hydrogéologie régionale, et il présente une connaissance intégrée du système aquifère : depuis le cadre hydrostratigraphique régional, en passant par la caractérisation des propriétés hydrogéologiques, jusqu'à la quantification de la ressource. L'ensemble des travaux scientifiques vise

essentiellement à produire une vision hydrogéologique pratique pour servir la prise de décision menant à l'utilisation durable de la ressource dans le sud-ouest du Québec.

Cadre de la caractérisation hydrogéologique régionale

La caractérisation hydrogéologique régionale du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec constitue le principal objet du partenariat de recherche impliquant Ressources naturelles Canada, Développement économique Canada et l'Association des professionnels en développement économique des Laurentides (APDEL) comme représentante du ministère de l'Environnement du Québec, du Conseil régional de développement des Laurentides (CRDL) et des municipalités régionales de comté (MRC) d'Argenteuil, Mirabel, Deux-Montagnes et Thérèse-De Blainville. L'étude s'est déroulée dans un contexte élargi de concertation multidisciplinaire, multi-institutionnelle et intergouvernementale.

Conformément aux modalités prévues par l'entente de partenariat, les travaux ont été exécutés par la Commission géologique du Canada dans le cadre du Programme national de cartographie géoscientifique (CARTNAT) pour la cartographie géologique, et dans le cadre du programme « Les eaux souterraines » pour la caractérisation hydrogéologique. Les travaux ont été accomplis en étroite collaboration avec le Centre Eau, Terre et Environnement de l'Institut national de la recherche scientifique (ou INRS-ETE; centre de l'INRS résultant de la fusion des centres Eau et Géoressources à l'automne 2001) et l'Université Laval. Au cours du déroulement du projet de caractérisation, les collaborations se sont étendues et ont impliqué des intervenants d'Environnement Canada, du ministère de l'Environnement du Québec, de l'Université Queen's, du United States Geological Survey, et du ministère des Transports du Québec. Plus de 55 scientifiques ont ainsi participé au projet, grâce à des collaborations formelles autorisées par Environnement Canada, le ministère de l'Environnement du Québec, l'Université Queen's, le United States Geological Survey, et le ministère des Transports du Québec.

De par sa principale visée scientifique, soit la caractérisation du système aquifère fracturé typique de la Plate-forme du Saint-Laurent, l'étude s'inscrit dans la vaste initiative d'étude des aquifères régionaux canadiens du programme « Les eaux souterraines » du Secteur des sciences de la Terre de Ressources naturelles Canada.

Objectifs de l'étude

L'objectif principal du présent bulletin est de décrire un exemple d'étude hydrogéologique régionale collé à la réalité canadienne actuelle en ce qui a trait à l'utilisation durable de la ressource en eau souterraine. À cette fin, le bulletin doit fournir les connaissances requises à la planification de l'utilisation de l'eau et de l'aménagement du territoire, une

planification intégrant une vision régionale pour un territoire dont l'eau souterraine constitue une importante source d'eau potable pour une large population. Il s'agit donc de présenter un travail scientifique à la fois rigoureux et adapté soigneusement aux besoins d'une population désireuse d'exploiter de façon durable la ressource en eau souterraine.

Le projet « Caractérisation hydrogéologique régionale et intégrée du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec » vise ainsi à délimiter l'aquifère régional, à caractériser ses propriétés hydrogéologiques, à caractériser la qualité des eaux souterraines, à évaluer la dynamique de l'écoulement de l'eau souterraine (recharge, flux, résurgence), à évaluer la vulnérabilité à la contamination ainsi que le potentiel aquifère, et à évaluer le débit durable des installations d'exploitation. Ces nouvelles connaissances du contexte hydrogéologique favoriseront une planification de l'aménagement du territoire prenant en compte les connaissances scientifiques touchant non seulement la qualité de la ressource, mais également sa quantité dans l'optique d'une utilisation durable.

Les produits scientifiques nécessaires à l'atteinte des objectifs et présentés ici comprennent 1) des cartes hydrogéologiques (piézométrique, délimitation des aquifères, qualité des eaux, vulnérabilité, potentiel aquifère) couvrant la Plate-forme du Saint-Laurent sur le territoire des quatre MRC impliquées, et 2) des recommandations pour la gestion rationnelle et la protection de l'eau souterraine.

Il est à noter que des outils aidant la prise de décision tels que des rapports narratifs, un réseau de surveillance des niveaux d'eau et une base de données interactive ont été précédemment remis aux autorités régionales de manière à favoriser la gestion éclairée de la ressource en eau (Lauzière et al., 2002; Nastev et al., 2002; Paradis et al., 2002; Savard et al., 2002a, b).

Présentation des résultats

La première partie de ce bulletin, « Hydrogéologie régionale du système aquifère fracturé », résume une vaste série de connaissances scientifiques générée de 1999 à 2002. On y présente la caractérisation du système aquifère régional, l'étude hydrogéochimique, une évaluation de la recharge annuelle en eau souterraine, une évaluation régionale de la vulnérabilité de l'aquifère à la contamination, une description de la base de données du projet, et des recommandations sur la gestion durable de la ressource régionale. La seconde partie de ce bulletin traite de l'étude quantitative de la ressource en eau souterraine. Ainsi, pour mieux connaître l'aspect particulier du développement durable et de la modélisation quantitative, le lecteur peut consulter la seconde partie. En effet, les parties du bulletin portant sur l'hydrogéologie régionale et l'étude quantitative sont structurées de manière à être complémentaires, pour éviter de répéter l'information scientifique, et elles sont à toute fin pratique indissociables.

De manière à rendre l'ensemble des connaissances utile à la prise de décisions et pour permettre d'orienter des études locales essentielles à la planification de nouvelles installations, ce bulletin comprend 48 cartes et figures thématiques.

Cinq sites d'étude détaillée ont été sélectionnés : la carrière de Chatham (MRC d'Argenteuil), la carrière St-Eustache (située à Saint-Eustache, MRC de Deux-Montagnes), Saint-Benoît, Saint-Janvier (tous les deux dans la MRC de Mirabel), et Sainte-Anne-des-Plaines (MRC de Thérèse-De Blainville). La sélection des sites s'est basée sur les besoins des MRC impliquées, l'information hydrogéologique disponible dans les régions d'intérêt et la distribution des unités géologiques. L'étude à chacun des sites a été complétée par l'élaboration de modèles numériques afin de définir les aires d'alimentation des différents ouvrages et de comprendre la dynamique de l'écoulement à l'échelle des exploitations locales. Le lecteur peut consulter Savard et al. (2004) pour obtenir un compte rendu de ces études.

Échelle des travaux et applicabilité des résultats

Les résultats obtenus pendant le projet et résumés ici s'appliquent strictement à l'échelle régionale dans le but de rencontrer le premier objectif du *Cadre canadien de collaboration en matière d'eau souterraine* (Rivera et al., 2003), soit l'inventaire canadien des ressources en eau souterraine. Toutes les cartes thématiques présentées dans ce bulletin ont donc été compilées à l'échelle de 1/200 000.

Ainsi, une connaissance solide du contexte régional vise à répondre à un premier volet des besoins de la population canadienne. Les responsables des activités à risque pourront prendre plus aisément en considération la protection de la ressource. Pour les instances décisionnelles qui auront à se prononcer sur des projets qui leur seront soumis, il sera plus aisé d'élaborer une vision d'ensemble et d'appréhender les conflits d'usages de la ressource. Les décisions s'appuieront sur les connaissances fournies par des études intégrées telles que la présente caractérisation hydrogéologique régionale, de manière à minimiser les coûts de réalisation des travaux spécifiques. En effet, la caractérisation du contexte hydrogéologique à l'échelle régionale ne pourra répondre à toutes les questions touchant l'aménagement du territoire. La recherche en eau afin d'alimenter une collectivité, la détermination des aires de protection d'un ouvrage de captage d'eau souterraine pour la consommation humaine, ou l'implantation de nouvelles installations à risque représentent des exemples de cas nécessitant la réalisation d'études hydrogéologiques complémentaires à une échelle locale.

Remerciements

Le projet de caractérisation hydrogéologique a été appuyé financièrement par la Commission géologique du Canada (Ressources naturelles Canada), Développement

économique Canada, le Conseil Régional de Développement des Laurentides (CRDL), le ministère de l'Environnement du Québec, les municipalités régionales de comté (MRC) d'Argenteuil, de Deux-Montagnes, de Mirabel et de Thérèse-De Blainville, et l'Association des professionnels en développement économique des Laurentides (APDEL). Une partie de la campagne de forage a reçu l'appui du ministère des Transports du Québec. Les scientifiques du projet remercient sincèrement l'APDEL pour la prise en charge des transferts budgétaires, particulièrement M. Jean-Luc Riopel pour sa participation active à la gestion; Mme Carole Hart, de Développement économique Canada, pour avoir grandement contribué à rendre possible la bonne marche du partenariat entre Ressources naturelles Canada et Développement économique Canada; et MM. Guy Raynault, anciennement au CRDL, et Marc Carrière, de la MRC d'Argenteuil, pour leur appui constant sous forme de conseils judicieux.

L'équipe scientifique tient à remercier le ministère de l'Environnement du Québec, un membre important dans ce large partenariat intergouvernemental. Sa contribution

a permis de compléter l'étude hydrogéochimique et de produire un guide méthodologique sur la caractérisation des aquifères en roches sédimentaires fracturées. L'équipe tient à souligner la contribution importante des scientifiques du projet « Les ponts géologiques de l'est du Canada », dirigé par Denis Lavoie et appuyé par le programme CARTNAT de Ressources naturelles Canada, pour le raffinement du cadre géologique régional. L'équipe remercie aussi Yves Michaud pour la lecture critique de ce bulletin, et Alfonso Rivera pour ses conseils judicieux au cours de l'exécution du projet et pour sa lecture critique du présent ouvrage. De plus, l'équipe scientifique tient à remercier les institutions de recherche scientifique ayant participé au projet pour leur appui administratif : la Commission géologique du Canada, le Centre Eau, Terre et Environnement de l'Institut national de la recherche scientifique, l'Université Laval, le ministère de l'Environnement du Québec, Environnement Canada, le ministère des Transports du Québec, le United States Geological Survey, et l'Université Queen's.

PARTIE I

Hydrogéologie régionale du système aquifère fracturé

SITUATION, HYDROLOGIE, TOPOGRAPHIE, CLIMAT ET TRAVAUX ANTÉRIEURS

La zone à l'étude est située dans le sud-ouest du Québec, au nord-ouest de Montréal. Elle possède une superficie d'approximativement 1500 km², répartie sur le territoire des municipalités régionales de comté (MRC) d'Argenteuil, Deux-Montagnes, Mirabel et Thérèse-De Blainville (fig. 1). Ses limites sont la rivière du Nord et le Bouclier canadien au nord et au nord-ouest, la rivière des Outaouais, le lac des Deux Montagnes et la rivière des Mille Îles au sud, et le bassin versant de la rivière Mascouche à l'est. Plusieurs bassins versants sont partiellement ou entièrement compris dans la zone d'étude (fig. 2). Une grande partie de la superficie de cette zone (31 %) est drainée par le bassin versant de la rivière du Nord et de son tributaire principal, la rivière Rouge. Les autres rivières majeures, les rivières du Chêne (18 %), du Chicot (7 %) et aux Chiens (9 %), se jettent directement dans la rivière des Mille Îles. Du bassin versant de la rivière Mascouche, seule la partie amont appartient à la zone étudiée, dont elle draine 14 % de la superficie. L'eau de surface du reste du territoire (21 %) se draine à l'aide de petits cours d'eau ou directement par la rivière des Outaouais, le lac des Deux Montagnes et la rivière des Mille Îles.

La région étudiée est généralement plane ou faiblement ondulée, les seules zones à relief étant les collines d'Oka et de Saint-André dans le sud. (Noter que le nom « collines de Saint-André » est un nom informel et non un toponyme officiel.) Les altitudes observées varient depuis 20 m près de la rivière des Mille Îles jusqu'à 249 m au plus haut point des collines d'Oka. Les points hauts sont typiquement dominés par des affleurements rocheux parfois recouverts d'une mince couche de till. Dans les parties basses, d'épaisses couches d'argile recouvrent des dépressions rocheuses remplies par des dépôts glaciaires d'épaisseur variable.

Les données recueillies de 1970 à 2000 par 15 stations météorologiques situées à l'intérieur du territoire étudié indiquent que la température moyenne mensuelle varie de -11,4 °C en janvier à 20,9 °C en juillet. Pour la même période, la précipitation annuelle est de 1046,8 mm en moyenne, avec un minimum de 928,6 mm et un maximum de 1128,6 mm. L'écart type est de 101,1 mm. La neige représente quelque 22 % de la précipitation moyenne annuelle (232 mm). Les taux mensuels moyens de précipitation sont relativement uniformes pendant l'année; le plus élevé, 100,9 mm, est mesuré en septembre, tandis que le plus bas, 63,0 mm, est observé en février.

Des études hydrogéologiques antérieures ont partiellement inventorié les aquifères situés au nord du Saint-Laurent (Simard, 1978; Simard et Des Rosiers,

1980); de plus, dans le but de mettre au point une méthodologie de gestion, une approche théorique intégrant les données existantes et faisant l'état des connaissances a été appliquée au nord de Montréal. Dans ce cadre, des outils tels que les logiciels Evarisk et ParaPol ont été appliqués afin de mettre en valeur les ressources en eau souterraine (AGÉOS et INRS-Eau, 1998, rapport final d'activités portant sur le développement d'outils pour la gestion intégrée des usages de la ressource-eau souterraine et leur application à la région hydrogéologique Nord de Montréal). D'autres études plus ponctuelles ont aussi présenté les propriétés hydrauliques de certains puits en production (p. ex. rapport de la Compagnie internationale des eaux portant sur la recherche en eaux souterraines, préparé pour la ville de Saint-Eustache, 1979; rapport de l'AGÉOS et INRS-Eau

de 1996 sur l'optimisation des conditions quantitatives de pompage au site de NORA-Lachute; rapport final sur le réseau de puits de surveillance de la qualité des eaux souterraines à l'aéroport international de Montréal-Mirabel, préparé par TECSULT, 1999). Toutefois, il n'existe à présent aucune étude présentant une vision globale et régionale de la disponibilité de la ressource et intégrant une représentation des unités géologiques contenant l'eau souterraine. Par conséquent, la base de données accessible, les cartes hydrogéologiques et le réseau de surveillance régional qui sont requis pour gérer de façon durable les eaux souterraines du sud-ouest du Québec ne sont pas disponibles. Ce sont entre autres ces éléments que l'étude de l'hydrogéologie régionale du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec vise à rendre disponibles.

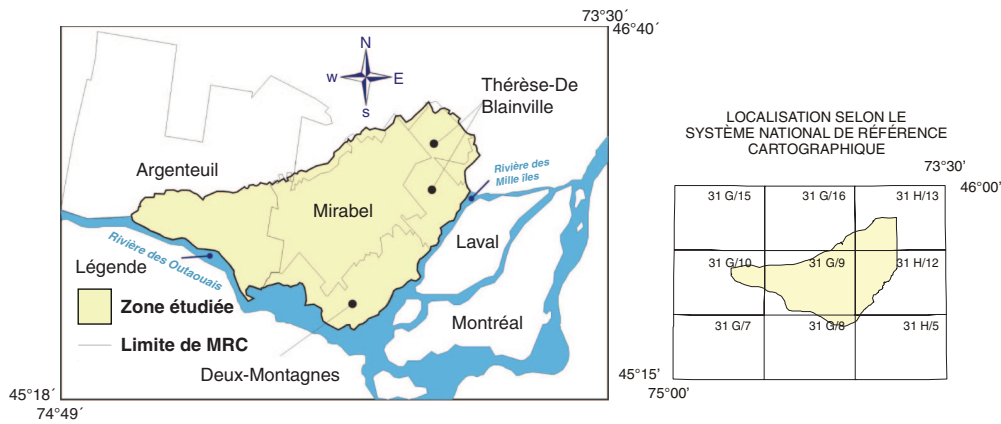


Figure 1. Limites de la zone étudiée. Cette dernière couvre la partie de la province géologique de la Plate-forme du Saint-Laurent qui recoupe le territoire des quatre municipalités régionales de comté (MRC) participantes : Argenteuil, Mirabel, Thérèse-De Blainville et Deux-Montagnes.

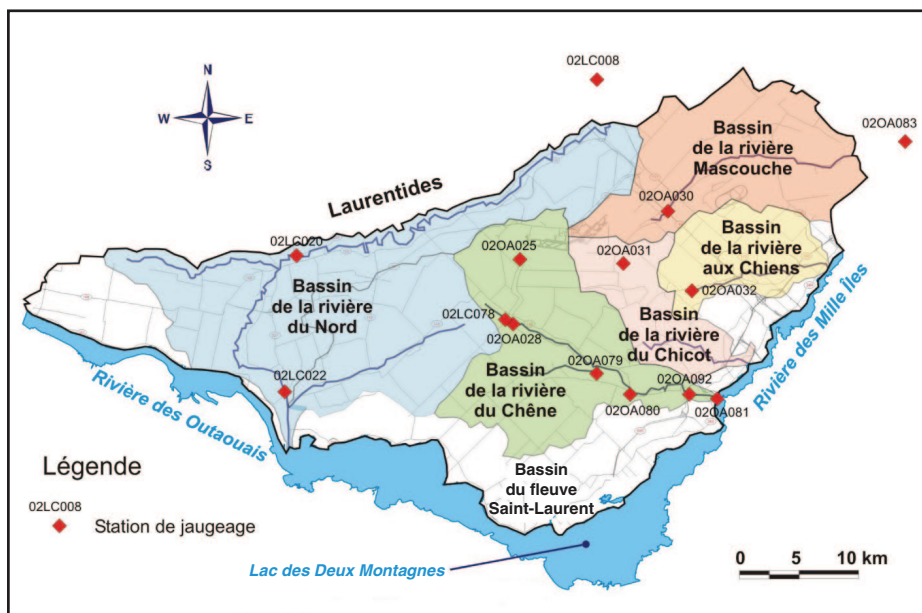


Figure 2. Distribution des principaux bassins versants et situation des stations de jaugeage des rivières.

APPROCHE ET MÉTHODOLOGIE

Une solide combinaison de la géologie et de la caractérisation hydrogéologique représente l'aspect central de l'approche préconisée pour la représentation régionale des aquifères en roches sédimentaires fracturées. Cette approche implique une synthèse des connaissances géologiques sur les unités rocheuses et les sédiments quaternaires qui les recouvrent dans le territoire à l'étude. Le cadre géologique et l'architecture stratigraphique qui en résultent doivent être adéquats pour permettre de prédire la distribution des propriétés hydrauliques de façon fiable (fig. 3).

La compilation des données existantes constitue logiquement la première étape des travaux de cartographie hydrogéologique, puisqu'elle permet de tirer profit des efforts antérieurs en orientant la séquence des travaux à effectuer pour produire une synthèse régionale. Les levés de terrain s'adressant à la caractérisation des propriétés hydrauliques appartiennent aux étapes subséquentes qui doivent s'appuyer sur la synthèse géologique.

Bien que l'information géologique sur laquelle ils reposent soit souvent disponible à plus petite échelle, les compilations et levés hydrogéologiques se font de façon optimale à l'échelle de 1/100 000. En effet, cette échelle permet de produire l'information requise pour une région donnée tout en alliant des échéanciers pratiques à des coûts réalistes. Dans le cadre du projet, les produits de la cartographie régionale ont servi d'assise pour des travaux plus détaillés à l'échelle locale, dans les zones cibles de la carrière de Chatham, Saint-Benoît, Saint-Eustache, Sainte-Anne-des-Plaines et Saint-Janvier (voir Savard et al., 2002b).

L'ensemble des données utilisées pour la synthèse hydrogéologique régionale comprend une série de paramètres géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques (tableau 1). Pour la région à cartographier, plusieurs groupes de données étaient partiellement existants, par exemple les niveaux d'eau et les conductivités hydrauliques. Suite à la compilation et la validation de ces données, une campagne de terrain a été planifiée de manière à compléter l'information existante et à caractériser l'ensemble du territoire à couvrir. Pour ce point particulier, une grande partie de la difficulté consistait à atteindre un degré adéquat de fiabilité de l'information pour l'échelle régionale. En effet, la cueillette de nouvelles données hydrauliques en nombre statistiquement élevé engendre des coûts non réalistes; cependant, comme nous l'avons mentionné plus haut, l'échelle d'investigation de 1/100 000 permet d'amener le niveau d'information requis à un minimum pratique et scientifiquement acceptable.

L'ensemble des informations hydrogéologiques recueillies et compilées au cours du projet ont été intégrées en une base interactive de données (tableau 2), conçue au moyen du logiciel Access® de Microsoft® puis couplée à l'interface GIMS (Lauzière et al., 2007; Savard et al., 2002a). Pour plus de détails sur les procédures à suivre pour valider, compiler, générer, intégrer et interpréter les données essentielles à la caractérisation régionale du système aquifère, le lecteur est renvoyé au *Guide méthodologique pour la caractérisation régionale des aquifères en roches sédimentaires fracturées* (Savard et al., 2007).

Figure 3. Schéma conceptuel de l'approche préconisée dans le présent travail de recherche. Les étapes de la cartographie hydrogéologique régionale décrites dans le présent ouvrage mènent à la production de multiples cartes hydrogéologiques et d'un modèle hydrostratigraphique conceptuel (cadres et flèches en trait plein). Les travaux possibles après la cartographie systématique mènent entre autres à la quantification de la ressource, présentée à la partie II (cadres et flèches en trait pointillé).

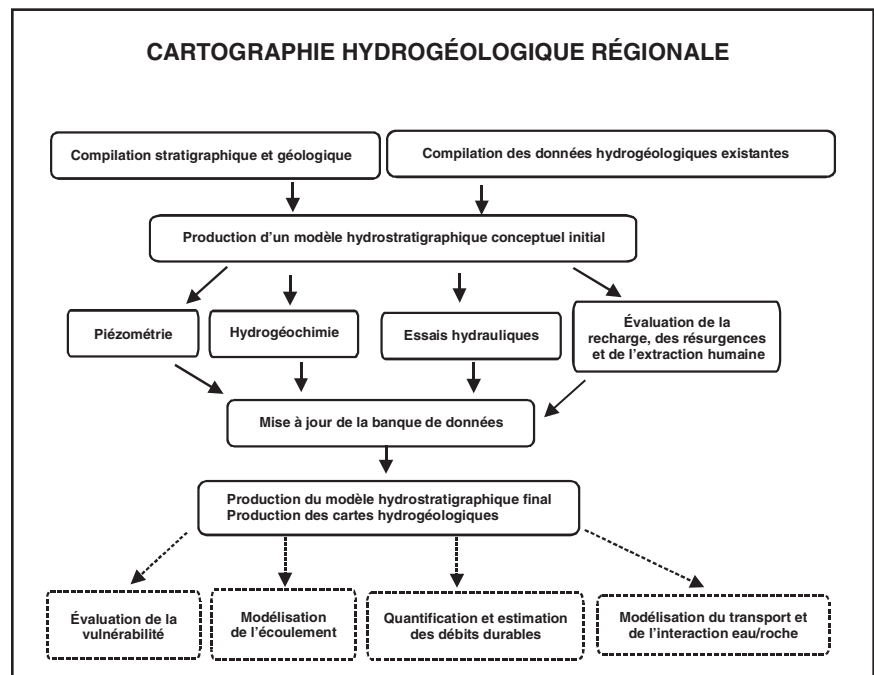


Tableau 1. Résumé des paramètres consignés lors des campagnes de cartographie systématique des aquifères en roches sédimentaires fracturées du sud-ouest du Québec.

Paramètres géologiques	Paramètres hydrogéologiques
Formations rocheuses Lithologie Nature de la porosité Pourcentage de la porosité Stratigraphie Structuration régionale (plis, failles)	Paramètres physiques Niveaux d'eau (profondeur à la nappe) Hydrogrammes de puits Direction d'écoulement Gradient hydraulique Liens hydrauliques entre les formations aquifères Volume d'eau souterraine Limites des zones de recharge Limites des zones de résurgence Évaluation de la recharge Emplacement des principales zones de captage Évaluation des quantités extraites Débit des puits Conductivité hydraulique des unités géologiques Transmissivité et emmagasinement
Unités sédimentaires quaternaires Lithologie Perméabilité Stratigraphie Distribution régionale	
Paramètres hydrologiques	Paramètres géochimiques Concentrations des ions majeurs et traces Concentrations des matières dissoutes totales Qualité de l'eau Distribution des types d'eau
Précipitation annuelle (mm) Rivières Emplacement Débits Hydrogrammes Lien hydraulique à l'aquifère Lacs Emplacement Lien hydraulique à l'aquifère Niveaux d'eau	

Tableau 2. Information contenue dans la base de données interactive du projet.

Information	Nombre de stations
Puits et piézomètres CGC ¹	30
Système d'information hydrogéologique (MENV ²)	17 809
Puits validés pour stratigraphie quaternaire	3 900
Forages MRN ³	313
Forages MTQ ⁴	2 576
Descriptions lithologiques (puits et affleurements)	88
Échantillons d'eau souterraine multiniveaux	86
Échantillons d'eau souterraine composites	183
Niveaux d'eau et observations relatives aux puits	918
Descriptions microstructurales	63
Échantillons de sol (sites)	37
Forages par foreuse portative	21
GEORADAR	10
Sismique-réfraction (lignes)	32
Puits municipaux	24
Rapports saisis	109
¹ CGC = Commission géologique du Canada ² MENV = Ministère de l'environnement du Québec ³ MRN = Ministère des Ressources naturelles du Québec ⁴ MTQ = Ministère des Transports du Québec	

Levés de terrain

Cette section résume les principales activités de caractérisation effectuées sur le terrain au cours des campagnes de 1999 et 2000 (tableau 3).

La cartographie des roches sédimentaires et des sédiments quaternaires sur le territoire d'étude a permis de raffiner le cadre géologique régional. Ces activités ont pris place parallèlement au projet « Caractérisation hydrogéologique régionale et intégrée du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec », qui a par ce fait bénéficié de l'appui de l'équipe de la Commission géologique du Canada du programme CARTNAT, ainsi que de celui du ministère des Ressources naturelles du Québec (projet « Les ponts géologiques de l'est du Canada », appuyé par le programme CARTNAT; Lavoie et al., 2001; Bolduc et Ross, 2001; Ross et al., 2001).

Les travaux sur les unités paléozoïques ont permis de décrire tous les affleurements et forages répertoriés sur le territoire d'étude. La caractérisation de la microfracturation a été effectuée sur 22 affleurements clés, dont sept dans des carrières (J.-M. Lemieux, 2000, projet de fin d'études de baccalauréat inédit sur la caractérisation structurale locale et régionale des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec, Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, Québec). Les travaux sur les unités quaternaires, appuyés par le programme CARTNAT et le projet « Caractérisation hydrogéologique régionale et intégrée du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec », ont généré sept nouveaux forages et 3 km de profils de sismique-réflexion à haute résolution (Commission géologique du Canada, Division de la science des terrains). Les cartes et coupes géologiques ainsi produites sont présentées dans ce bulletin.

En tout, 36 forages avec récupération de carottes ont été effectués par des sociétés privées au cours du projet, sur des sites sélectionnés par l'équipe de recherche (23 se sont terminés dans les unités rocheuses et 13 dans les dépôts meubles). De plus, 30 forages dans les dépôts meubles ont été effectués par l'équipe de recherche à l'aide d'une foreuse portative. L'étude de ces forages visait à compléter les connaissances stratigraphiques et la caractérisation des propriétés hydrogéologiques pour le territoire d'étude (p. ex. essais de pompage).

Plus de 505 mesures de niveaux d'eau ont été effectuées sur le territoire d'étude dans des puits existants. De plus, le suivi mensuel des niveaux d'eau a été fait sur 25 puits de surveillance distribués dans la région. Onze puits supplémentaires ont fait l'objet d'un suivi quotidien à l'aide de capteurs de pression connectés à un système d'acquisition de données. Ceci constitue en fait le réseau de surveillance des niveaux d'eau qui a été remis aux MRC à la fin du projet de caractérisation.

Tableau 3. Sommaire des principaux levés hydrogéologiques effectués au cours des campagnes de terrain de 1999 et 2000.

Activité de caractérisation	1999	2000
Étude des fractures (sites)	22	3
Forage de puits	9	27
Mesure de niveaux d'eau	400	41
Surveillance des niveaux d'eau	27	36
Géophysique de puits	-	22
Sismique de surface (km)	-	3
Échantillonnage de l'eau souterraine		
- composite	85	98
- multiniveau	5	86
Essais Lugeon (pneumatiques)		
- Nombre de puits	10	12
- Nombre d'intervalles	166	300
Essais de pompage	2	6
Essais à choc hydraulique	3	40
Précipitations (nombre d'échantillons)		
- Pluie	20	70
- Neige	3	7
Échantillonnage par lysimètre à succion	-	25

Deux sites où se trouvent des dépôts quaternaires typiques, soit du sable sur de l'argile et du till, ont été étudiés dans le but d'évaluer les processus d'infiltration de l'eau et de mieux comprendre la contribution des divers types de dépôts à la recharge des aquifères dans les milieux rocheux fracturés. Enfin, quatre cases lysimétriques ont été installées pour estimer le taux de recharge (Hamel, 2002).

Le nombre total d'échantillons prélevés et analysés pour l'étude hydrogéochimique est de 183, et ce, à partir de 156 puits. Les échantillons proviennent des formations rocheuses, des formations superficielles et parfois même des deux à la fois. Plus de 183 échantillons d'eau composites ont été prélevés alors que 91 échantillons d'eau ont été prélevés sur plusieurs niveaux dans un même puits afin d'évaluer la variation verticale de la composition chimique de l'eau.

De plus, les quatre cases lysimétriques installées pour l'étude de la recharge dans les régions de Saint-Janvier, Lachute et Saint-Hermas ont fait l'objet d'une caractérisation hydrogéochimique. Cette caractérisation avait pour but d'étudier la composition de l'eau qui transite dans la zone vadose constituée de till d'âge quaternaire.

Quatre cent soixante-six (466) essais hydrauliques par injection à charge constante entre deux obturateurs pneumatiques (essais Lugeon) ont été effectués dans 22 puits afin de caractériser les principales unités lithologiques de la région (formations de Beauharnois, Theresa, Cairnside et Covey Hill, et Groupe de Trenton) (Nastev et al., 2000).

Quarante (40) essais à choc hydraulique ont été réalisés dans des puits terminés au roc et dans les puits d'observation installés dans les dépôts quaternaires, afin d'obtenir la perméabilité du milieu aquifère, de même que huit essais de pompage de longue durée dans les sites d'étude détaillée

de Saint-Benoît, Saint-Janvier (tous deux dans la MRC de Mirabel), Sainte-Anne-des-Plaines (MRC de Thérèse-De Blainville), Saint-Eustache (carrière St-Eustache; MRC de Deux-Montagnes) et Saint-André-Est (carrière de Chatham; MRC d'Argenteuil). Ces essais ont permis de caractériser les propriétés hydrauliques du système aquifère et de mieux comprendre la dynamique de l'écoulement souterrain (Nastev et al., 2001).

Travaux de laboratoire et traitement des données

Sur la base de l'analyse structurale régionale et stratigraphique des roches paléozoïques, cinq coupes géologiques ont été réalisées (voir la section « Géologie du territoire » ci-dessous). Ces coupes ont servi à l'élaboration du modèle hydrogéologique conceptuel de l'aquifère en milieu rocheux fracturé. Quatre coupes sont généralement nord-sud (subperpendiculaires aux principales structures géologiques régionales), et une coupe est d'attitude est-ouest, recoupant les quatre premières. Toutes les coupes sont verticales et atteignent 500 m sous le niveau de la mer. Ces coupes sont montrées avec une exagération verticale de cinq fois.

Les données de forage, qui provenaient de sources multiples, ont été soumises à une procédure de normalisation et de contrôle de la qualité (coordonnées de localisation et description de la stratigraphie quaternaire) avant d'être intégrées à la base de données du projet. Les données épurées ont ensuite été combinées aux informations de surface (topographie, géologie des formations quaternaires), et 40 coupes géologiques géoréférencées d'orientation nord-ouest-sud-est ont été construites, de même que deux coupes approximativement perpendiculaires aux premières. Ces coupes montrent la topographie du substratum rocheux et les principales unités quaternaires sus-jacentes (exagération verticale de 20 fois). Elles ont servi à imposer des limites à la construction d'un modèle géologique tridimensionnel. Ce dernier a permis de mieux comprendre la distribution des conditions de confinement et la connectivité entre la surface et l'aquifère régional.

En tout, 450 points de contrôle ont été utilisés pour l'élaboration de la carte piézométrique de l'eau souterraine dans le socle rocheux. De ce nombre, 257 points (51 %) proviennent de mesures de terrain, 143 (28 %) de l'annuaire des puisatiers du Québec, et 105 (21 %) d'estimations déduites à partir de la connaissance de la région à l'étude (cours d'eau, topographie). L'interpolation des points de contrôle a été réalisée par krigeage à la suite d'une analyse spatiale des données. La carte piézométrique finale (section « Niveaux d'eau et écoulement de l'eau souterraine », plus bas) représente l'écoulement régional de l'eau souterraine dans l'aquifère rocheux du sud-ouest du Québec.

Plusieurs paramètres inorganiques et microbiologiques ont été mesurés pour tous les échantillons. Les analyses des ions majeurs et mineurs et des éléments traces ont été effectuées au Centre d'expertise en analyse environnementale du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. Les méthodes d'analyse suivantes ont été utilisées : la spectrométrie d'émission par plasma à couplage inductif (ICP-OES) pour Ag, Al, B, Ba, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Si, Sr, Zn et U; la spectrophotométrie d'absorption atomique après digestion et formation d'hydrures pour As et Se; la conductimétrie pour Cl et l'alcalinité totale; la colorimétrie pour F, SO₄; la détection infrarouge pour le CID (carbone inorganique dissous), le COD (carbone organique dissous), ainsi que NO₃, NH₄, PO₄, CN et HS; la spectrophotométrie d'absorption atomique avec génération de vapeur pour Hg; et la chromatographie ionique pour Br et I. Le contrôle de la qualité de l'échantillonnage et des analyses a été fait par analyse de duplicata (10 % des échantillons dans la présente étude) et calcul de l'équilibre chimique (électroneutralité de la solution). Une déviation de ± 5 % de l'équilibre chimique est considérée acceptable (Freeze et Cherry, 1979). Dans cette étude, la déviation de l'équilibre chimique est inférieure à 5 % pour 135 échantillons, entre 5 et 8 % pour 11 échantillons, et supérieure à 10 % pour 7 échantillons. Les échantillons pour lesquels la déviation de l'équilibre cations/anions est inférieure à 8 % (146 résultats, dont 144 puits et 2 sources captées) ont été retenus pour l'évaluation de la qualité de l'eau souterraine.

Certaines mesures ont été effectuées sur place afin de pouvoir déterminer quantitativement des paramètres qui évoluent après l'échantillonnage, soit la température, le pH, la conductivité et l'oxygène dissous, mesurés au moyen de sondes multiparamétriques de marque YSI (étalonnées quotidiennement), et le potentiel d'oxydoréduction, mesuré au moyen d'une sonde redox de Hanna Instruments. Les puits ont d'abord été purgés jusqu'à ce que les mesures de ces paramètres soient stables.

L'interprétation des résultats obtenus par chocs hydrauliques a été faite avec les méthodes décrites dans les publications suivantes: Bouwer et Rice (1976) pour les aquifères à nappe libre, Cooper et al. (1967) pour les aquifères captifs, et van der Kamp (1976) et Uffink (G.J.M. Uffink, 1984, *Theory of the oscillating slug test* [traduction], rapport de recherche inédit en néerlandais publié par le National Institute for Public Health and Environmental Hygiene, Bilthoven, Pays-Bas) pour les réponses oscillatoires. Ces résultats ont été comparés avec un autre type d'essai à petite échelle, par injection à charge constante entre deux obturateurs, et la corrélation obtenue a été satisfaisante compte tenu de la nature différente des deux types d'essais. L'analyse des essais de pompage a aussi été effectuée pour les sites d'étude détaillée (Saint-Benoît, Saint-Janvier, Sainte-Anne-des-Plaines, Saint-Eustache et la carrière de Chatham). Ces essais ont permis d'estimer

les propriétés hydrauliques des formations géologiques et de comprendre la dynamique de l'écoulement (présence de limites d'écoulement, anisotropie, effet de la fracturation).

La carte des formations aquifères et des dépôts meubles, ainsi que la caractérisation des propriétés hydrauliques, ont servi à l'évaluation de la vulnérabilité du système aquifère à la contamination. Dans le but de sélectionner une méthode d'évaluation qui serait applicable aux aquifères en milieu rocheux fracturé et tiendrait compte des conditions hydrogéologiques de la région à l'étude, une revue des méthodes DRASTIC et GOD d'évaluation de la vulnérabilité a été effectuée. Les aires de vulnérabilité relative obtenues à l'aide de ces méthodes d'évaluation sont comparées aux zones de recharge délimitées sur la base du contexte hydrostratigraphique. Ainsi, les approches indépendantes permettent, par estimation de la correspondance entre les zones vulnérables et les aires d'alimentation, de présenter de façon plus certaine les parties du territoire à protéger.

L'évaluation de la recharge des aquifères a été faite par analyse des données des stations météorologiques et des hydrogrammes de rivières et de puits. Ainsi, un bilan hydrologique global a été effectué à partir des données des 15 stations météorologiques situées dans la région. Les hydrogrammes de rivières provenant de 23 stations et les hydrogrammes de 20 puits d'observation ont également été analysés afin d'obtenir une estimation de la recharge annuelle des nappes à l'échelle de la région d'étude.

Les essais d'infiltration in situ ont été analysés pour obtenir la conductivité hydraulique du till de surface, et les données provenant des cases lysimétriques ont été analysées pour quantifier l'infiltration d'eau à travers les tills et ainsi estimer la quantité d'eau disponible pour la recharge de l'aquifère rocheux.

GÉOLOGIE DU TERRITOIRE

Le système aquifère du sud-ouest québécois est situé dans les roches paléozoïques de la Plate-forme du Saint-Laurent, une province géologique limitée au nord par les Laurentides (Précambrien, Province de Grenville) et au sud par les Appalaches (Cambrien à Ordovicien supérieur). La succession stratigraphique des roches paléozoïques du sud-ouest québécois comprend, de la base au sommet (Globensky, 1987; Salad Hersi et al., 2002, 2003), les groupes de Potsdam (formations de Covey Hill et Cairnside), Beekmantown (formations de Theresa, Beauharnois et Carillon), Chazy, Black River et Trenton (fig. 4-7). La succession paléozoïque et la structuration des roches sédimentaires sont illustrées par cinq coupes géologiques (fig. 5-7).

On peut regrouper les unités sédimentaires paléozoïques du sud-ouest québécois en trois catégories d'après leur composition et leurs propriétés physiques : les unités silico-clastiques (Covey Hill, Cairnside, Chazy inférieur), les dolomies (Beauharnois, Theresa, Carillon), et les calcaires

(Chazy supérieur, Black River, Trenton). Ces strates paléozoïques ont une attitude horizontale; elles sont légèrement ployées en de larges structures, tels des anticlinaux d'orientation nord-est-sud-ouest affectant la partie centrale du territoire d'étude (fig. 4). Des failles d'importance variable recoupent aussi les strates, comme la faille est-ouest de Lachute qui marque la bordure du Bouclier canadien au nord de la région étudiée (fig. 4, 6, 7; Globensky, 1987; Rocher et al., 2000). Plusieurs autres failles représentées sont des structures non pas observées, mais déduites. Il est à noter que l'effet sur l'écoulement régional de la plupart des failles déduites n'a pu être démontré faute de points de mesure adéquats à proximité de ces structures (voir la partie II). Une exception existe cependant : l'étude locale de la carrière de Chatham.

Les strates paléozoïques sont de plus recoupées par des intrusions crétacées de carbonatites. Ces dernières forment, avec les roches précambriennes qu'elles ont soulevées, les collines de Saint-André et d'Oka, qui font partie des collines Montérégiennes (fig. 4).

Dans les unités de roches sédimentaires, les pores primaires sont généralement obstrués par des ciments diagenétiques de calcite et de quartz. Ainsi, la plupart des unités rocheuses seraient imperméables si elles n'avaient été affectées par des déformations cassantes qui ont laissé des ouvertures secondaires comme des joints et des fractures. Ces joints et fractures constituent les principaux conduits pour l'eau souterraine dans les roches sédimentaires de la région (J.-M. Lemieux, 2000, projet de fin d'études de baccalauréat inédit sur la caractérisation structurale locale et régionale des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec, Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, Québec).

Dans la région à l'étude, le substratum rocheux est recouvert de sédiments non consolidés d'âge quaternaire, d'étendue et d'épaisseur très variables. Leur épaisseur est de 19 m en moyenne et atteint 150 m à certains endroits (fig. 8, 9). Ces sédiments ont fait l'objet de plusieurs études, dont celles de Hillaire-Marcel (1974), de Prichonnet (1977) et de Lévesque (1982), et, plus récemment, celles de Bolduc et Ross (2001) et de Ross et al. (2001). Plus de 200 forages stratigraphiques ont également été effectués à travers la séquence quaternaire au début des années 1970 (Kugler-Gagnon, 1974; St-Onge, 1979). Dans le cadre de la présente étude, 66 forages ont été effectués, parmi lesquels certains ont permis d'étudier en détail les successions quaternaires.

La séquence typiquement observée est constituée d'un till régional du Wisconsinien supérieur (de 20 000 à 12 000 a BP), recouvert successivement par les argiles de la Mer de Champlain (de 12 000 à 10 000 a BP) et les sédiments sableux témoignant de la régression marine et des épisodes fluviaux et éoliens subséquents (< 10 000 a BP). Toutefois, des sédiments fluvio-glaciaires et proglaciaires proximaux sont présents sous les argiles marines le long de certains corridors (fig. 9) dont l'axe long est généralement parallèle au

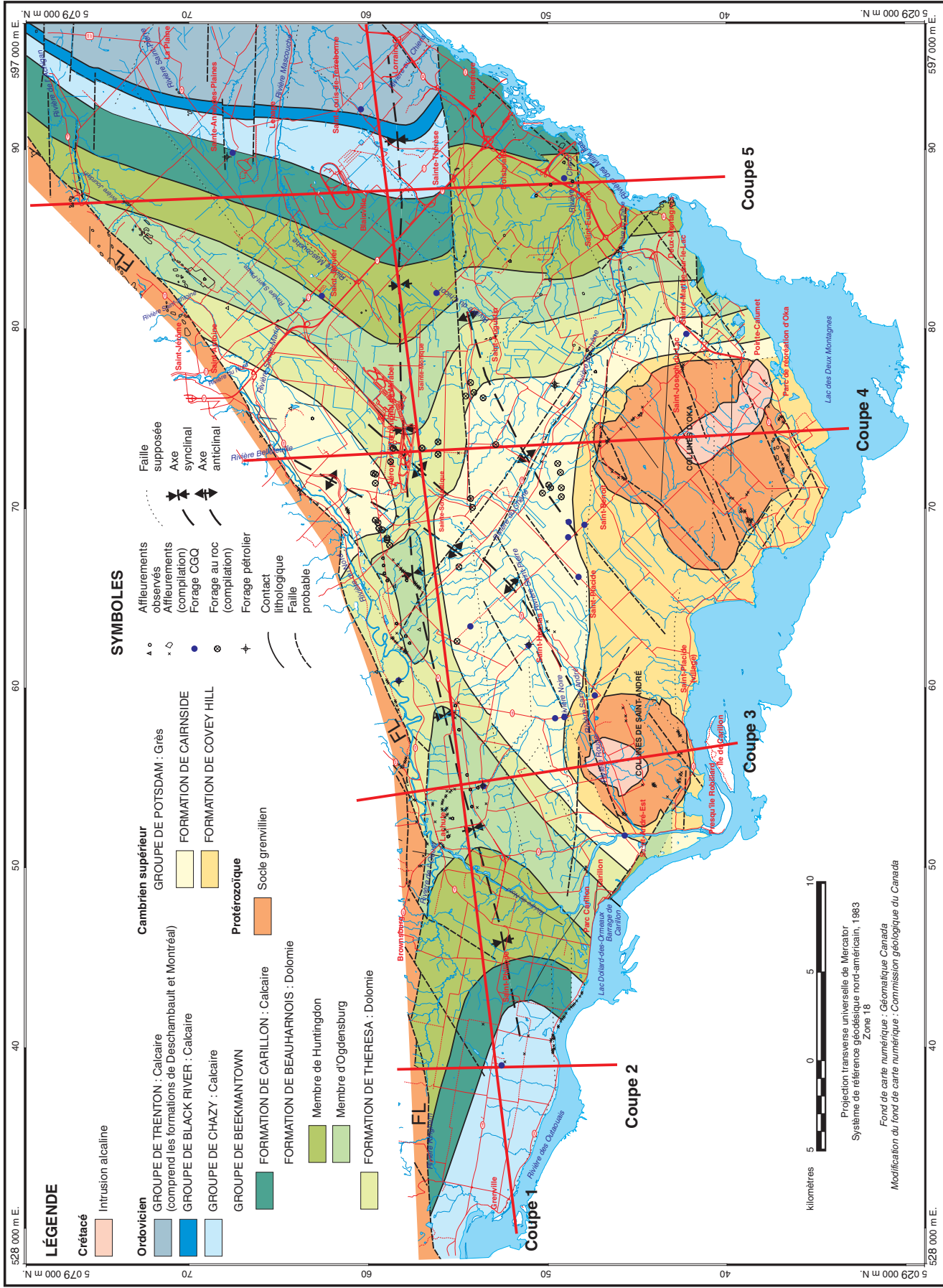
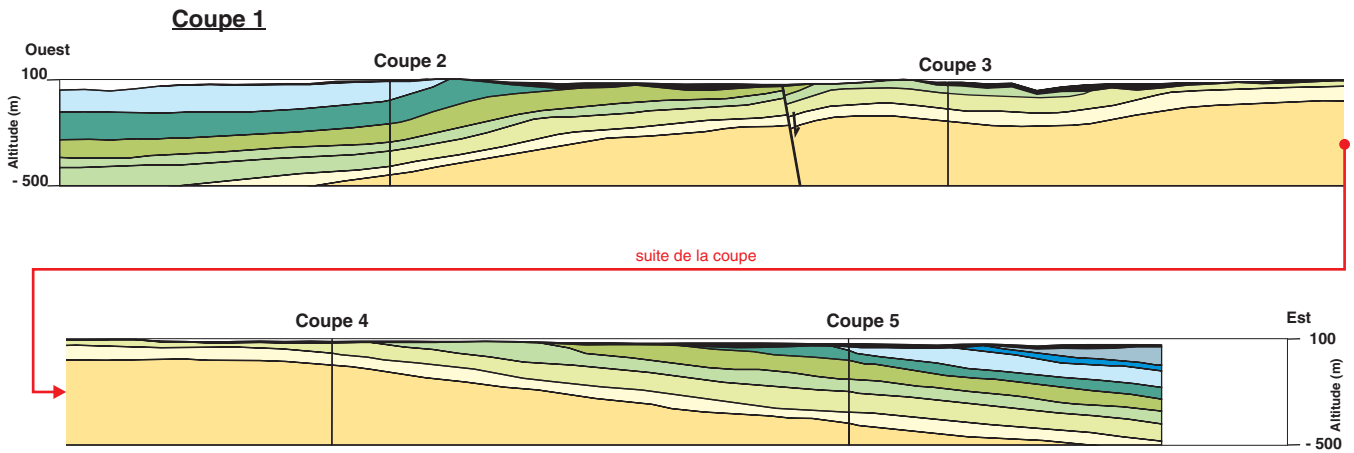


Figure 4. Géologie du substratum rocheux. CGQ = Centre géoscientifique de Québec; FL = faille de Lachute. (Figure créée par M. Rocher, O. Salad-Hersi et S. Castonguay.)



LÉGENDE

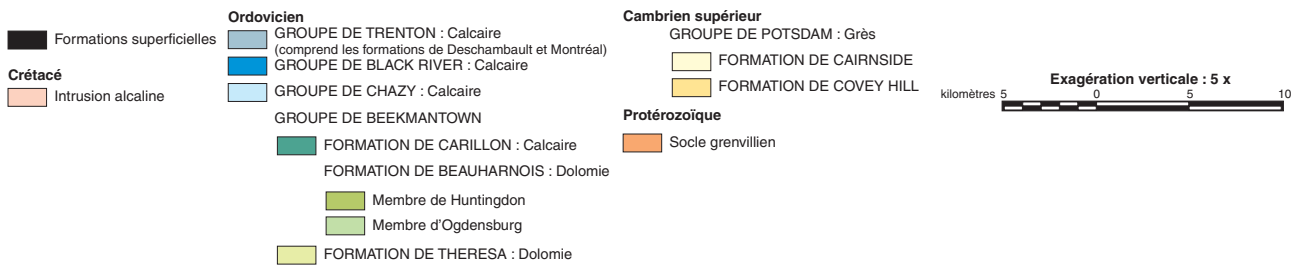


Figure 5. Géologie du substratum rocheux : coupe 1. (Figure créée par S. Castonguay.)

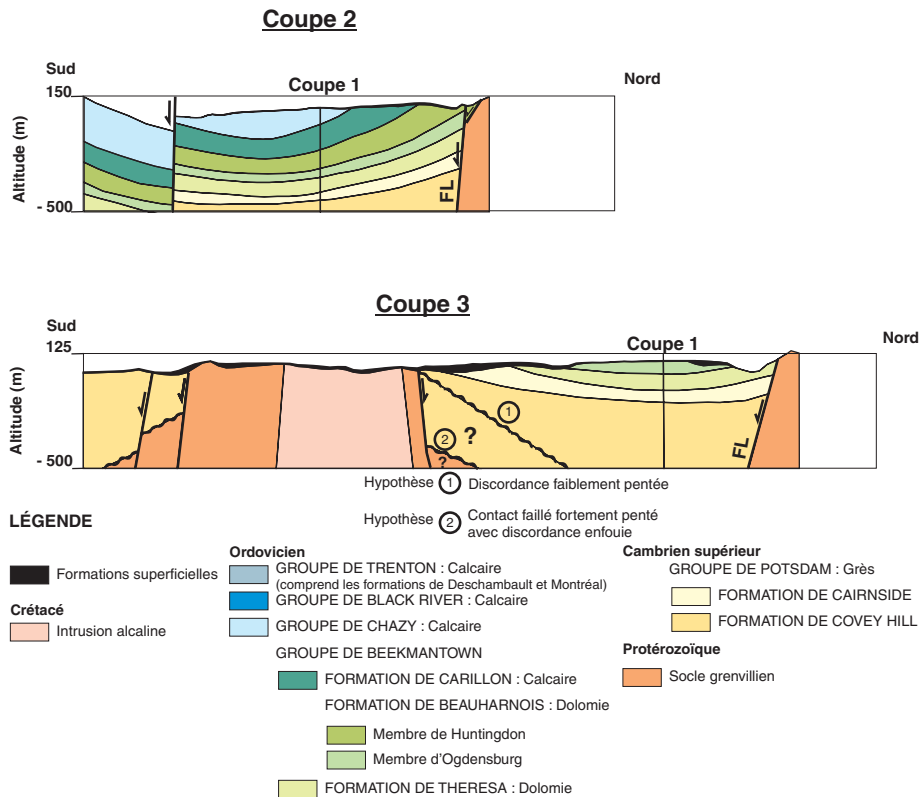


Figure 6. Géologie du substratum rocheux : coupes 2 et 3. FL = faille de Lachute. (Figure créée par S. Castonguay.)

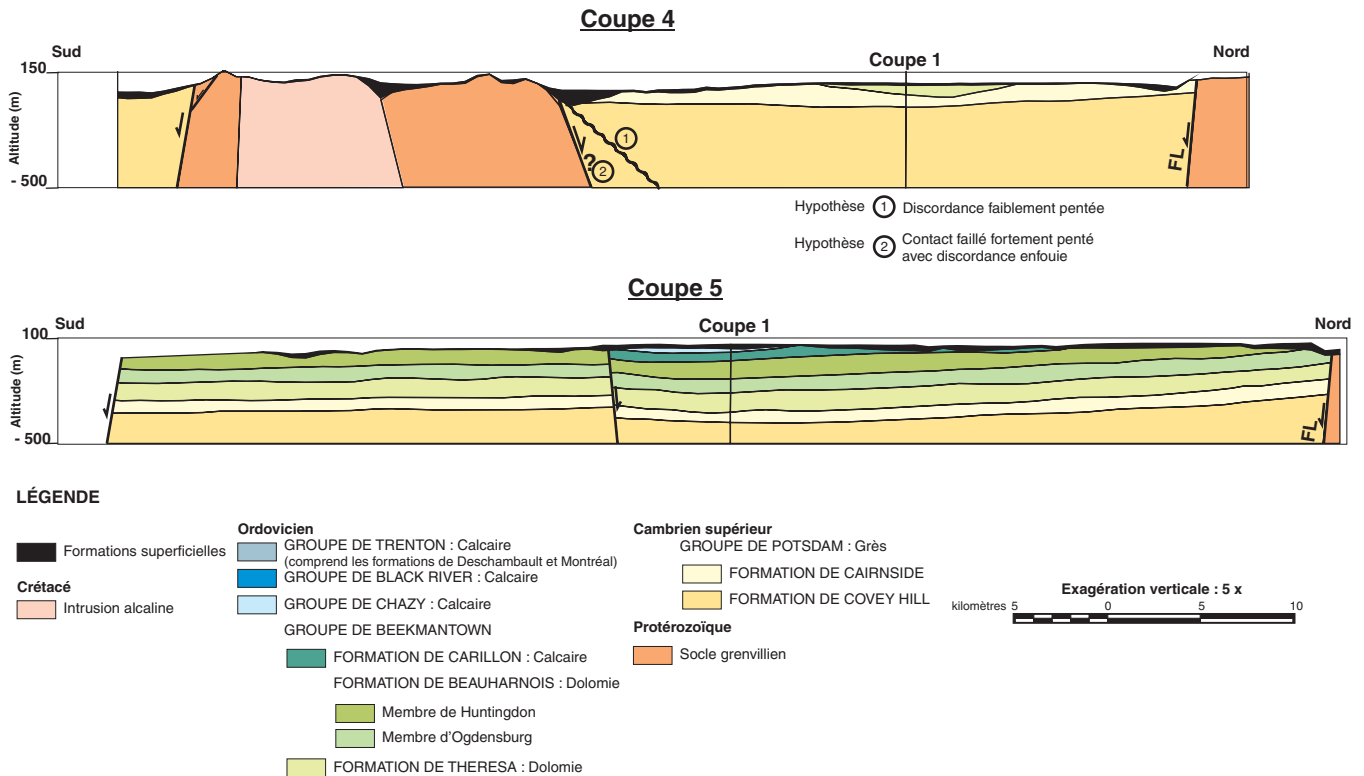


Figure 7. Géologie du substratum rocheux : coupes 4 et 5. FL = faille de Lachute. (Figure créée par S. Castonguay.)

dernier sens de l'écoulement de la glace, qui s'effectuait vers le sud-ouest. Quoique ces amas de sédiments sablo-graveleux soient situés stratigraphiquement entre le till et l'argile marine, ils sont souvent en contact direct avec le roc, le till sous-jacent ayant été érodé par les chenaux d'eaux de fonte sous-glaciaires. De plus, des sédiments antérieurs au till régional existent localement sous forme de corps sédimentaires résiduels (fig. 10-12). Les récents travaux effectués sur les principales vallées enfouies (Ross et al., 2001) ont permis d'ajouter des éléments à la séquence stratigraphique composite de la région à l'étude et de concevoir de nouveaux modèles paléogéographiques qui tiennent davantage compte du registre sédimentaire de ces vallées.

La cartographie de ces dépôts quaternaires permet de représenter la distribution régionale des principales unités perméables et imperméables recouvrant l'aquifère rocheux (fig. 13, 14). L'établissement des relations architecturales entre ces sédiments et les roches paléozoïques fracturées est donc essentiel pour délimiter le système aquifère et les contextes hydrogéologiques (fig. 9-15).

HYDROSTRATIGRAPHIE DES SÉDIMENTS QUATÉRNAIRES

Les sédiments quaternaires de la région contrôlent la recharge du système aquifère rocheux fracturé, de même que ses conditions de confinement. Ainsi, même si l'aquifère

régional est surtout constitué de roc fracturé, il demeure néanmoins crucial de bien comprendre la connectivité entre les aquifères granulaires et le système aquifère rocheux et d'établir les principales caractéristiques des zones de recharge. Les aquifères granulaires sont discontinus et leurs liens avec la surface topographique et l'aquifère régional ne sont pas toujours clairs. Certaines surfaces d'érosion créent un lien direct, alors que dans d'autres cas les aquifères granulaires sont séparés des roches sédimentaires par une importante couche de till, qui retarde l'écoulement. Afin de mieux comprendre ces différentes relations, une série de coupes géologiques (fig. 10-12) et un modèle tridimensionnel de l'architecture stratigraphique (fig. 9) ont été construits. Le modèle sert à l'analyse du bassin sédimentaire quaternaire et peut être utilisé pour obtenir des cartes de l'épaisseur ou de l'altitude des unités, des coupes géologiques dans différentes orientations, etc. Cette analyse permet de bien comprendre les contextes hydrogéologiques associés aux sédiments quaternaires, tels que la distribution et la connectivité des aquifères, la distribution et l'épaisseur des unités étanches, les caractéristiques des zones de recharge, etc. Les paragraphes suivants décrivent brièvement les principaux contextes.

Les vallées enfouies

La région comprend trois vallées principales largement comblées par les sédiments quaternaires, surtout les argiles de la Mer de Champlain. Ces vallées enfouies, d'orientation

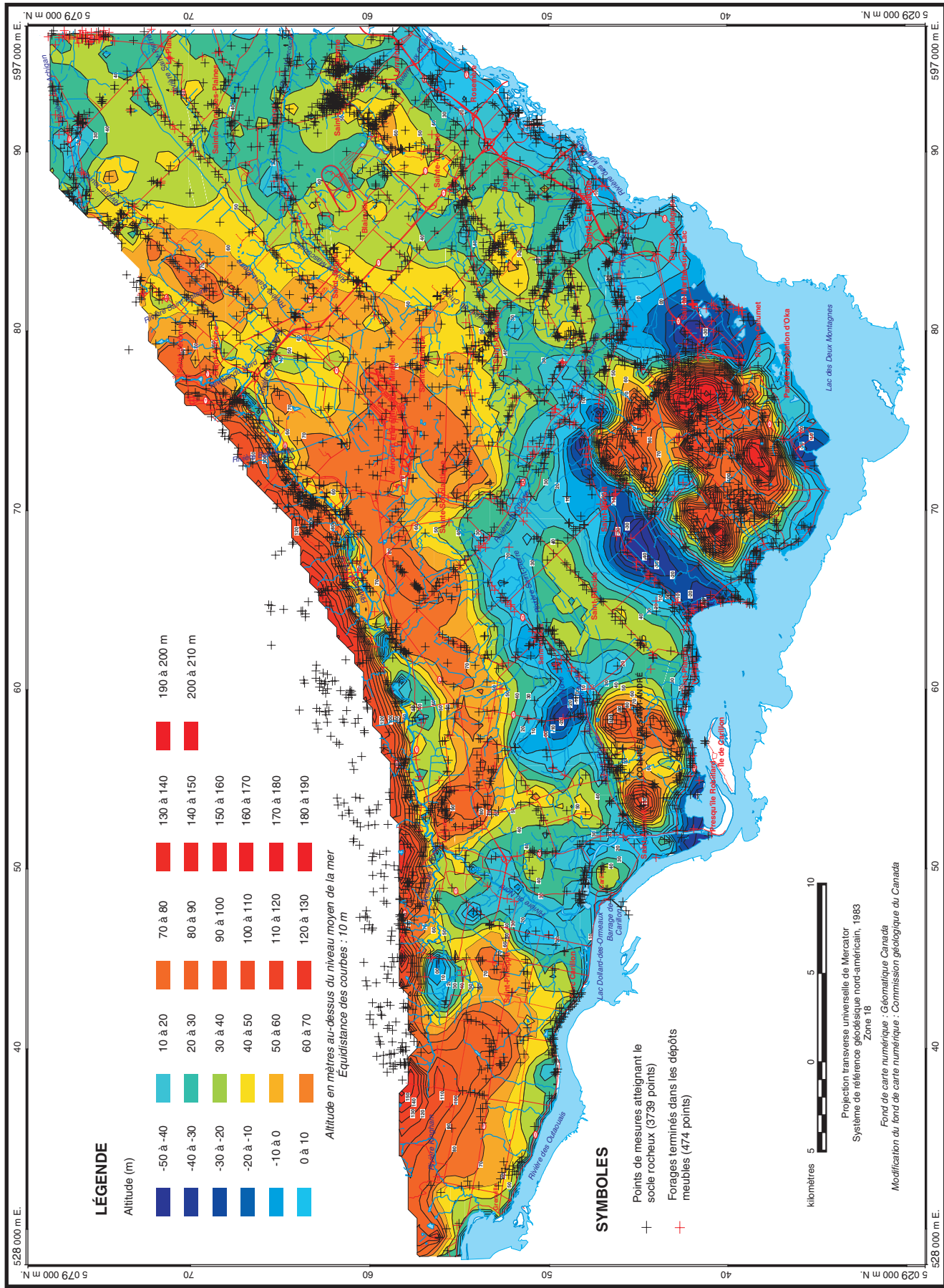
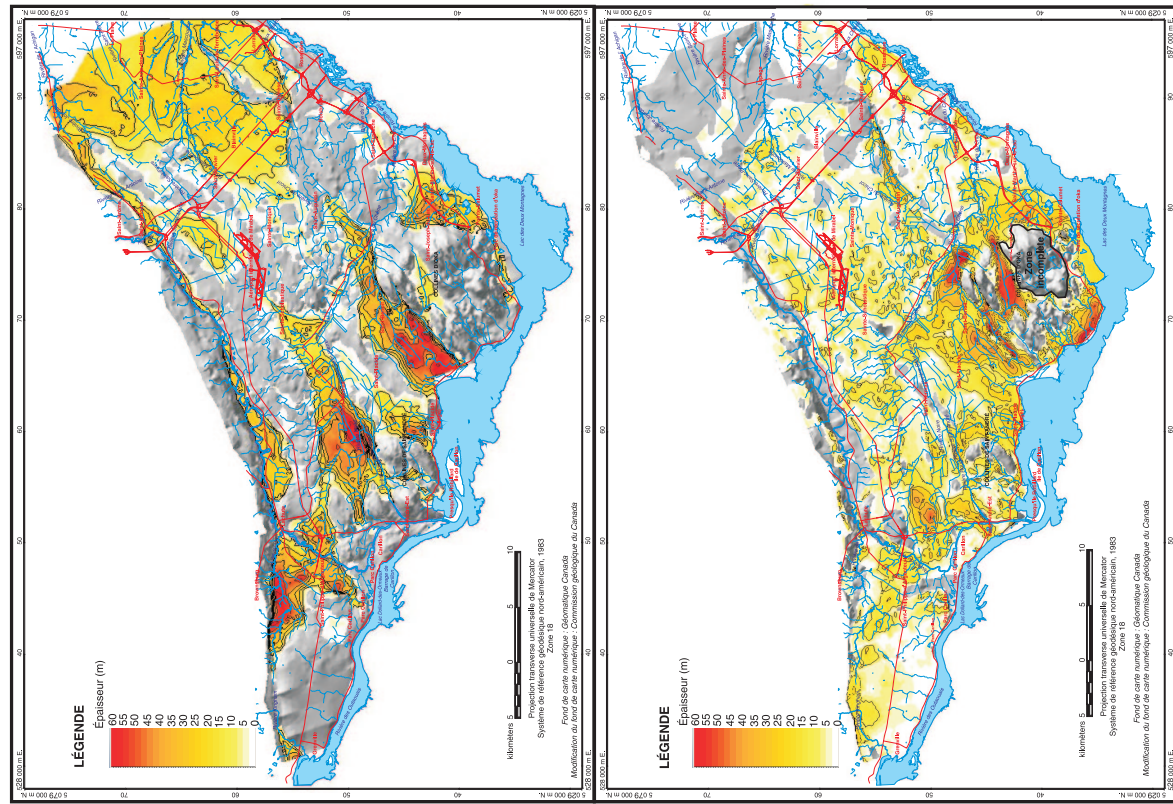


Figure 8. Altitude de la surface du socle rocheux. (Figure créée par D. Paradis.)



LÉGENDE
(Voir la figure 14
pour les descriptions)

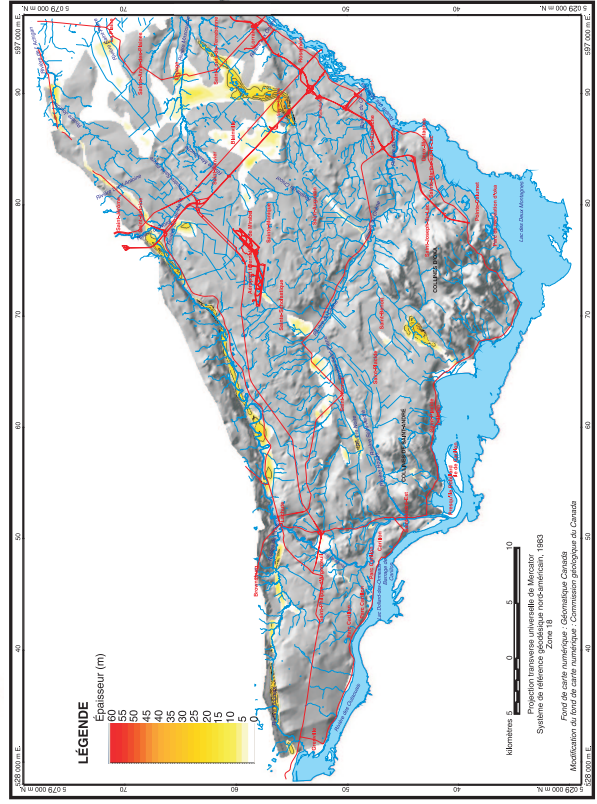
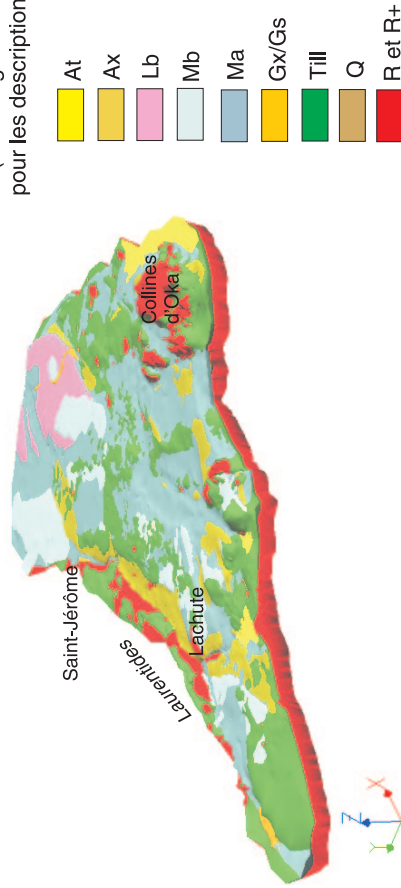


Figure 9. Distribution et épaisseur de quelques unités quaternaires (données extraites d'un modèle géologique tridimensionnel).
(Figure créée par M. Ross, R. Martel, R. Lefebvre et M. Parent.)

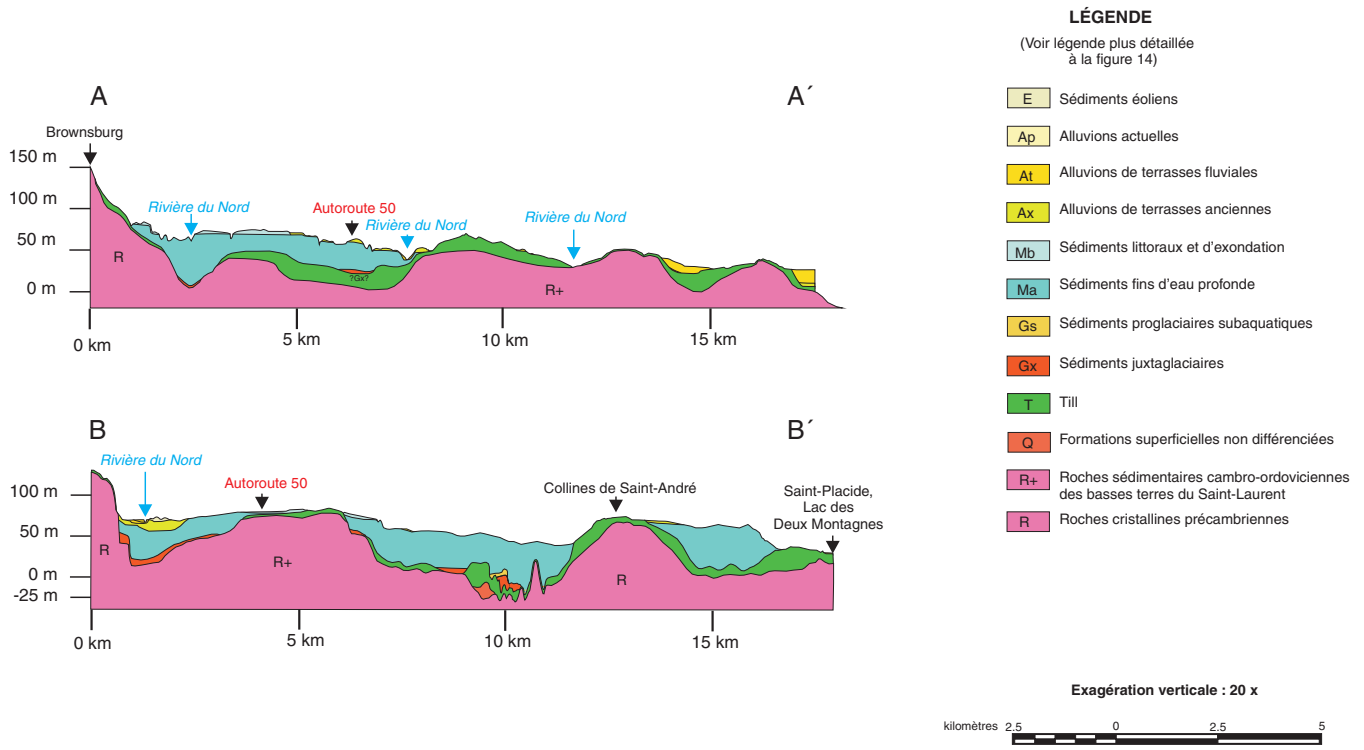


Figure 10. Géologie des formations superficielles : coupes A-A' et B-B'. Voir la position des coupes à la figure 13. (Figure créée par M. Ross et M. Parent.)

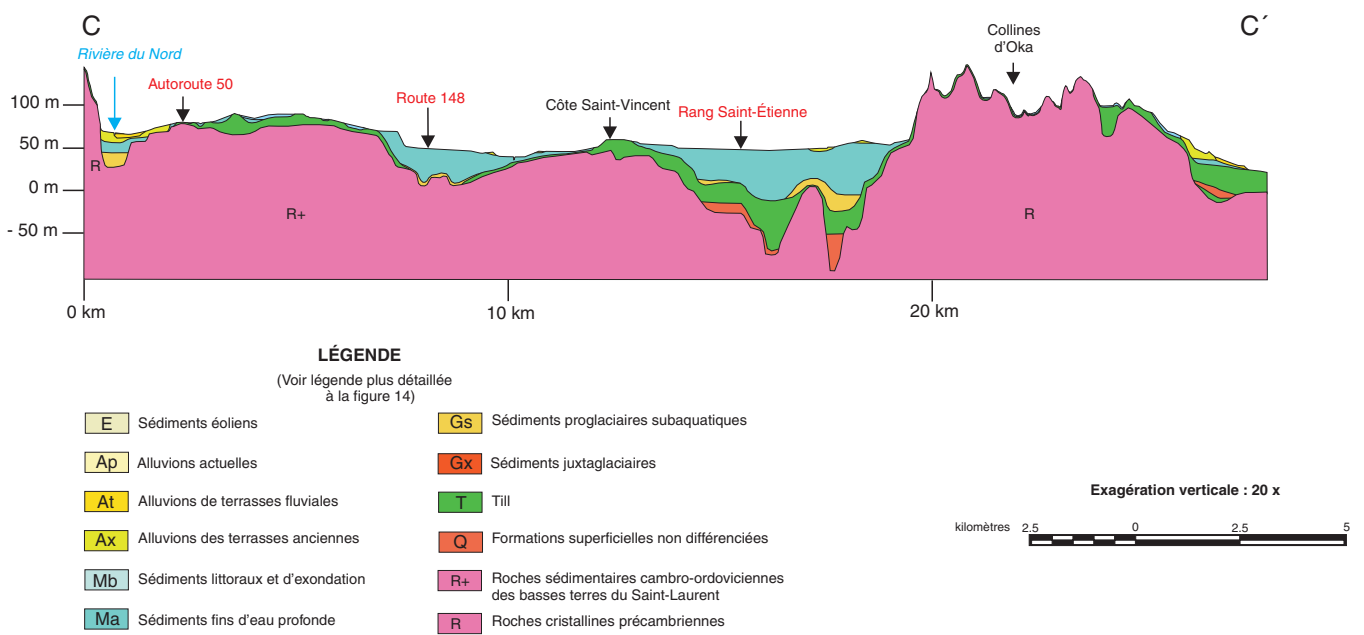


Figure 11. Géologie des formations superficielles : coupe C-C'. Voir la position des coupes à la figure 13. (Figure créée par M. Ross et M. Parent.)

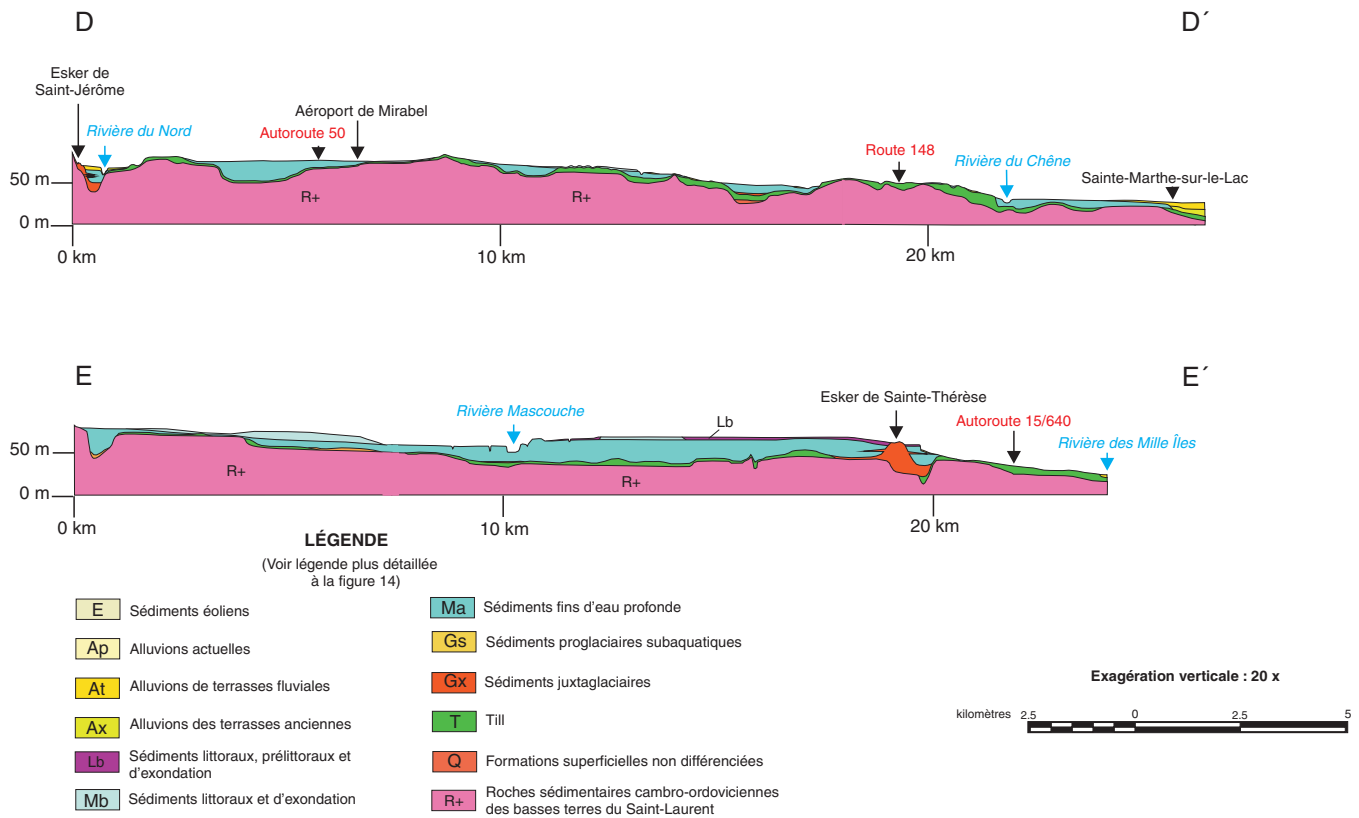


Figure 12. Géologie des formations superficielles : coupes D-D' et E-E'. Voir la position des coupes à la figure 13. (Figure créée par M. Ross et M. Parent.)

nord-est-sud-ouest, ont canalisé l'écoulement des eaux de fonte sous-glaciaires lors de la dernière déglaciation, ce qui a favorisé l'érosion du till dans un grand nombre de chenaux sous-glaciaires et la mise en place d'eskers. C'est là également qu'on trouve la majeure partie des sédiments glaciolacustres et glaciomarins avec leur cortège d'assemblages et de variations de faciès typiques de ces environnements. Des cônes d'épandage sous-aquatique sont présents par endroits, mais leur étendue et leur épaisseur sont limitées. Certains de ces cônes en provenance des vallées transversales situées dans les Laurentides bifurquent vers le sud-ouest et disparaissent sous les argiles dans la vallée de la rivière du Nord (fig. 11, 13, 14). Leur épaisseur et leur composition varient de façon appréciable, et ils ne sont peut-être pas totalement continus. Par contre, ils forment des aquifères généralement en contact avec l'aquifère régional et ils sont à nappe libre dans la portion située entre Saint-Canut et Saint-Jérôme (fig. 12-14). Un système aquifère similaire est présent dans la vallée enfouie entre Saint-André et Saint-Hermas, quoique les sédiments fluvioglaciaires et proglaciaires y semblent plus discontinus. De plus, cette dépression est plus profonde et plus large, et le till atteint près de 25 m d'épaisseur à certains endroits (fig. 9, 10). Enfin, la présence d'une unité d'argile marine pouvant atteindre plus de 60 m d'épaisseur fait en sorte que tout le système de cette vallée est captif.

La vallée enfouie qui s'étend vers le sud-ouest à partir du village de Saint-Benoît est la plus profonde dépression de la région à l'étude, atteignant sans doute une centaine de mètres sous le niveau moyen des océans. Le till y est généralement très épais et continu sous l'argile de la Mer de Champlain, ce qui n'est pas le cas dans les autres vallées de même orientation (fig. 11). Par ailleurs, certains faciès particuliers ont été observés dans le till en bordure de cette dépression, tels que des interlits sableux et une matrice également plus sableuse, particulièrement à la base de l'unité (Ross et al., 2001), de sorte que les conductivités hydrauliques y sont plus élevées. De plus, l'analyse d'un profil de sismique-réflexion suggère la présence de dépôts sableux stratifiés au-dessus et, probablement par endroits, au-dessous du till dans les environs de la Côte-Rouge entre les rangs de La Fresnière et Saint-Étienne (fig. 11).

La plaine de till

Les vallées enfouies sont séparées par des hauts points pouvant atteindre 90 m d'altitude dans la plaine (à l'exclusion des collines Montérégiennes). Quoique le roc affleure à certains endroits, ces zones sont généralement caractérisées par une couverture de till relativement continue, d'épaisseur variable et à surface parfois modelée en drumlins (fig. 13, 14). De l'argile est souvent présente dans les

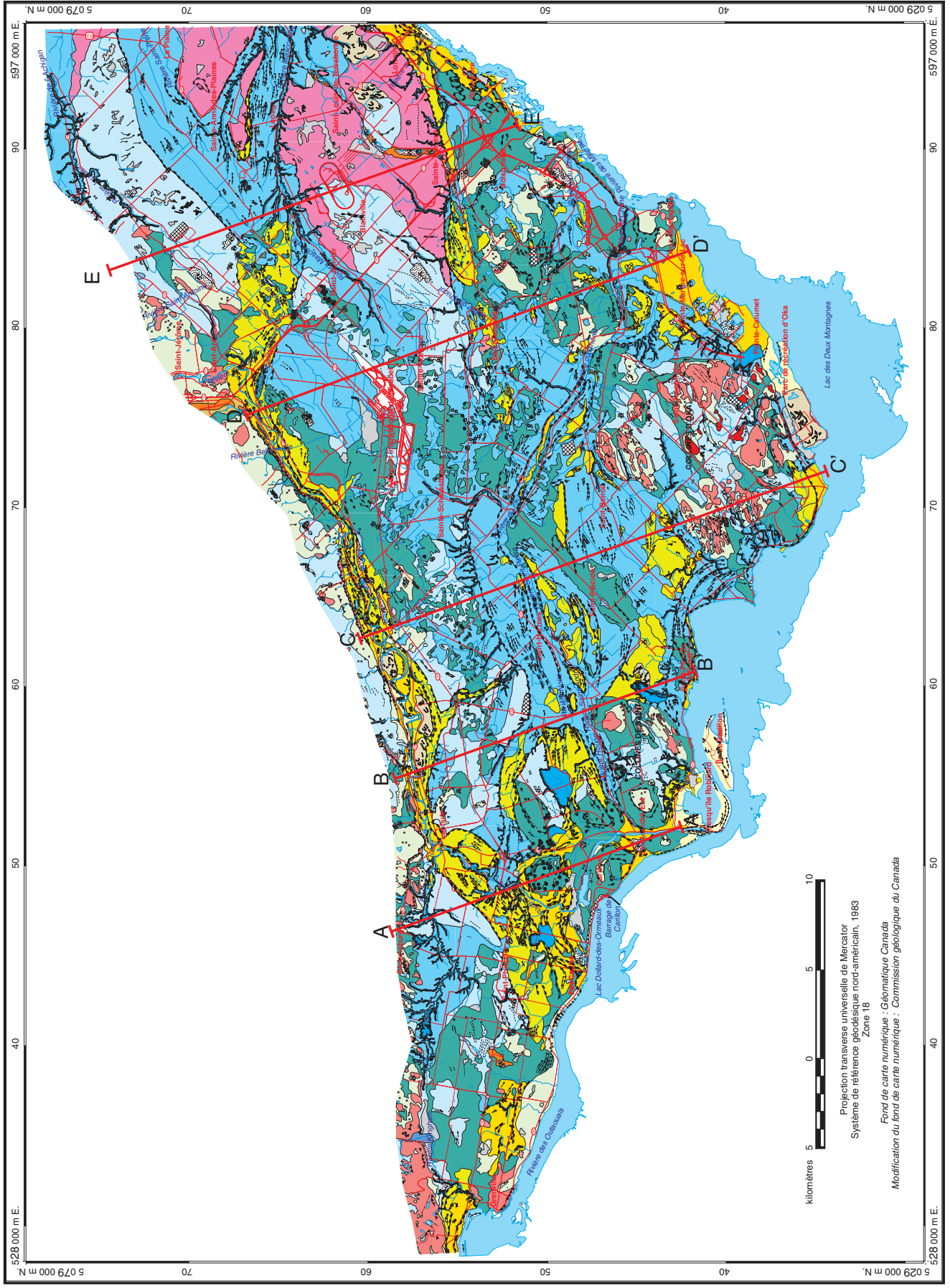


Figure 13. Géologie des formations superficielles. La légende est présentée à la figure 14. (Figure créée par A. Bolduc et M. Ross.)

QUATÉNAIRE

Holocène

Mg

Sédiments remaniés par des glissements de terrain : argilo-silts remaniés par des glissements de terrain et occupant le plus souvent des amphithéâtres marqués par des modelés chaotiques ou en gradins; selon la nature du matériel recouvrant les argilo-silts marins, ces sédiments peuvent comprendre des amas de sable ou de gravier entraînés par les glissements

O

Dépôts organiques : tourbe, plus ou moins décomposée; épaisseur variant de 0,3 à 4 m

E

SÉDIMENTS ÉOLIENS

Sédiments éoliens : sable fin à stratifications obliques diffuses mis en place par le vent sous forme de dunes paraboliques formées à la surface des sédiments littoraux et alluviaux fraîchement exondés; indiquant des vents dominants provenant du nord-est ou du sud-ouest; pouvant contenir des horizons organiques tels des paléols; d'une hauteur variant de 1 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. Situés principalement dans la vallée de la rivière du Nord

SÉDIMENTS ALLUVIAUX

Sédiments mis en place le long des cours d'eau du système fluvial actuel et lors de leur incision dans les formations quaternaires antérieures. Ces sédiments comprennent notamment des alluvions mises en place dans les anciens chenaux de la proto-rivière des Outaouais. La transition entre les sédiments de la Mer de Champlain et ceux de la proto-rivière des Outaouais s'est effectuée entre 70 m (à l'ouest) et 55 m (à l'est). Entre ces altitudes, des faciès estuariens sont présents

Ap

Alluvions actuelles : sable, silt, sableux, sable graveleux et gravier contenant fréquemment de la matière organique; de 0,5 à 3 m d'épaisseur; levées, barres et plaines alluviales actuelles

At

Alluvions de terrasses fluviales : sable, silt, sableux, sable graveleux et gravier contenant un peu de matière organique; de 0,5 à 5 m d'épaisseur; surface généralement marquée par des levées et barres alluviales et parfois remaniée par l'action éolienne

Ax

Alluvions des terrasses fluviales anciennes : sable, silt, sableux et gravier contenant un peu de matière organique; de 0,5 à 5 m d'épaisseur; restreintes à des zones situées principalement en marge des couloirs fluviaux actuels, entre la rivière du Nord et la rivière des Outaouais. Les faciès estuariens sont fréquents dans cette unité. 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

SÉDIMENTS DU LAC LAMPILLS

Sédiments mis en place dans le Lac Lampills, un bassin successeur de la Mer de Champlain et ancêtre du Lac Saint-Pierre actuel, comprenant principalement des sables et graviers littoraux et pré-littoraux; pouvant aussi inclure des sédiments remaniés à partir d'unités sous-jacentes. Les sédiments fins mis en place dans ce bassin n'ont pas été différenciés de ceux mis en place dans la Mer de Champlain. Dans cette partie du bassin, le passage des eaux saumâtres de la fin de la Mer de Champlain aux eaux douces du Lac Lampills s'est produit à une altitude d'environ 65 m

Lb

Sédiments littoraux, pré-littoraux et d'exondation : sable, silt, sableux, sable graveleux et gravier stratifiés et généralement bien triés; d'épaisseur variant de 0,5 à 5 m environ; 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 marins d'eau profonde (unité Ma)

WISCONSINIEN SUPÉRIEUR

SÉDIMENTS MARINS

Sédiments mis en place lors de l'épisode de la Mer de Champlain, généralement fossilifères, comprenant principalement des silts et argiles déposés en eau profonde ainsi que des sables et graviers littoraux, pré-littoraux et deltaïques; pouvant aussi inclure des diamclions glaciomarins et des sédiments remaniés à partir d'unités sous-jacentes. L'altitude maximum atteinte par la Mer de Champlain est d'environ 250 m dans cette partie du plateau laurentien

Md

Sédiments deltaïques : sable, sable graveleux et gravier, stratifiés et bien triés; jusqu'à 30 m d'épaisseur; mis en place à l'embouchure de cours d'eau se déversant dans la Mer de Champlain, comprenant localement des sédiments silt-sableux prodeltaïques

Mb

Sédiments littoraux, pré-littoraux et d'exondation : sable, silt, sableux, sable graveleux et gravier stratifiés et généralement bien triés; d'épaisseur variant de 0,5 à 5 m environ; 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, comprennent localement des siltimites; variant de moins de 1 m à plus de 80 m (en forage) d'épaisseur; principalement mis en place par décanatation durant la phase d'inondation marine

Gs

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

Sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique : sable et sable silteux, un peu de gravier; de 1 à 20 m d'épaisseur; formant des amas mis en place en eau plus ou moins profonde au bout de tunnels sous-ou intra-glaciaires débouchant dans le Lac Candona ou la Mer de Champlain; parfois exposés sous les argilo-silts marins dans les sablières

Gx

Sédiments lutvagioculaires : sable et gravier, blocs, un peu de till ou de diamclion; jusqu'à 40 m d'épaisseur; formant des eskers, des kames et des crêtes morainiques dont la surface est généralement bosselée

SÉDIMENTS GLACIAIRES

Diamclion à matrice sablo-silteuse à silt-argileuse mis en place directement par le glacier. De couleur gris olive sur le bouclier, à gris moyen ou brunâtre sur la plate-forme paléozoïque. Le remaniement par les vagues et les courants peut être localement important sous la limite marine, mais est surtout très superficiel, de l'ordre de 50 cm et moins. Par contre, la surface délavée est souvent caractérisée par des concentrations de blocs métriques. La teneur en cailloux cristallins précambriens varie de 100 % sur le bouclier à moins de 10 % sur la plate-forme paléozoïque. Sur la plate-forme, la matrice du till peut être carbonatée selon la nature du substratum traversé

Tr

Till remanié : diamclion dont la portion superficielle a été remaniée par les vagues et les courants sous la limite maximum de la Mer de Champlain. Partois fossilifère et comprenant des niveaux stratifiés sablo-graveleux

Tvr

Till remanié en couverture discontinue : diamclion comprenant principalement des faciès d'ablation remaniés par les vagues et courants sous la limite maximum de la Mer de Champlain. d'épaisseur inférieure à 1 m; la surface est généralement ponctuelle d'affleurements rocheux et la structure du roc sous-jacent transparent sur les photographies aériennes

T

Till en couverture généralement continue : diamclion comprenant des faciès de fond et d'ablation; d'épaisseur supérieure à 1 m; en surface, cette unité est présente principalement sur le bouclier

PRÉ-QUATÉNAIRE

SUBSTRAT ROCHEUX

Affleurements rocheux et roc à couverture mince (épaisseur < 1 m) de sédiments quaternaires; au-dessus de la limite marine, les surfaces rocheuses sont généralement recouvertes de minces placages discontinus de till et sont parsemées de blocs plutôt épars; sous la limite marine, les surfaces rocheuses sont généralement délavées de sédiments quaternaires

R+

Roches intrusives crétaées : ces roches intrusives alcalines sont reliées aux intrusions montaigniennes. Il s'agit de lamprophyres, porphyres, aïnolites, carbonatites et okalites, ainsi que d'altération métamorphique de roches silicatées. Cette unité affleure principalement dans les collines d'Okla

R+

Roches sédimentaires cambro-ordoviciennes des basses terres de Saint-Laurent : ces roches de plate-forme sédimentaire, principalement des grès (Groupe de Potsdam, Cambrien) et des grès, dolomies, calcaires et shales (Groupes de Beekmantown et de Chazy, Ordovicien), sont toutes sises sous la limite marine. Les rares affleurements montrent des surfaces planes à faiblement inclinées

R

Roches métamorphiques et magmatiques précambriennes du Bouclier canadien : ces roches du Bouclier canadien, composées principalement de calcaire cristallin, quartzite et grès (serie de Grenville), de syénite, granite monzonite, diorite et anorthosite (compexe de Ulton, principalement dans les collines d'Okla et de Saint-Amand), de granite et syénite (stock de Chatham-Grenville) et de grès (de la Montagne Tremblant) forment des surfaces très irrégulières et bosselées, partiellement masquées par des formations quaternaires, principalement du till

Note : Les unités composées, par exemple NbMa, sont indiquées lorsque l'épaisseur de l'unité supérieure est faible par rapport à celle de l'unité sous-jacente, ou lorsque la présence de l'unité sous-jacente est importante du point de vue de la géologie environnementale

SYMBOLES

Limite géologique (interprétée)



Gravière ou sablière (active, abandonnée)



Carrière, mine



Zone de remblai



Cicatrice de glissement de terrain



Forme éolienne



Paléochenal (direction d'écoulement connue, inconnue)



Rebord de rivage



Rebord de terrasse fluviale



Rebord de terrasse marine ou lacustre



Levés ou barres alluviales



Crête de plage



Site fossilifère



Trace d'esker



Esker (d'écoulement connu)



Moraine mineure



Moraine bosselée (en surface, à faible profondeur)



Trainée morainique derrière abri



Forme moraine fuselée



Stries glaciaires (d'écoulement connu, inconnu)



Chronologie relative des surfaces striées (1 = plus ancien)



Dépression linéaire contrôlée par la structure du roc



Rebord d'escarpement rocheux

Figure 14. Géologie des formations superficielles (figure 13) : légende.

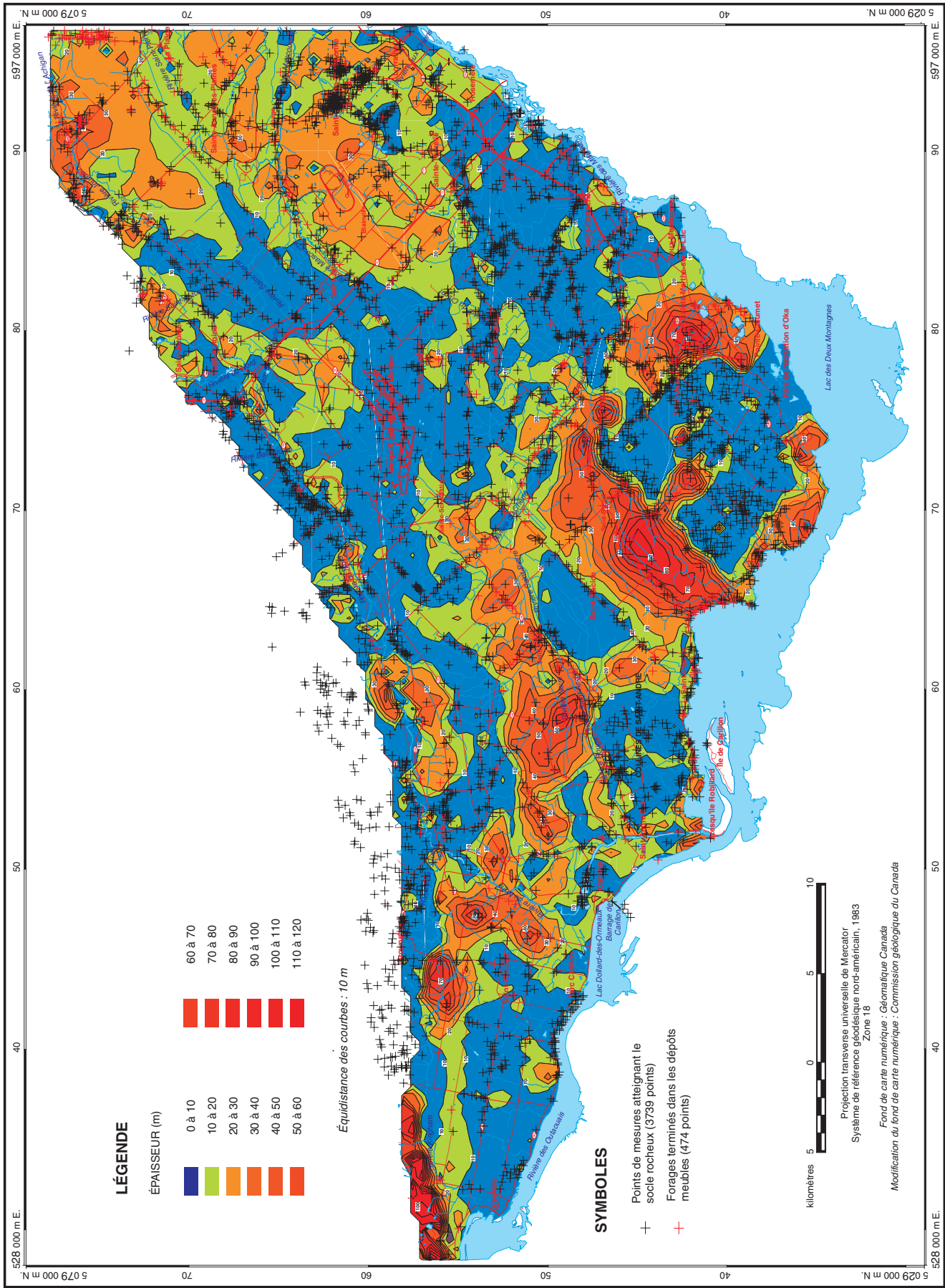


Figure 15. Épaisseur des matériaux superficiels. (Figure créée par D. Paradis.)

creux. Les drumlins ont été partiellement remaniés par la Mer de Champlain, ce qui explique leur morphologie moins typique et le fait qu'ils soient parfois recouverts de sable sur leurs flancs (fig. 11, 13, 14). Dans les environs de la côte Saint-Vincent (municipalité de Saint-Placide) et du Coteau-des-Hêtres (municipalité de Saint-André-d'Argenteuil), de larges crêtes de till d'orientation nord-est-sud-ouest sont présentes (fig. 11, 13, 14). L'épaisseur du till peut y excéder 20 m. Par contre, dans des endroits moins élevés tels que Boisbriand et Saint-Eustache, la couverture de sédiments quaternaires est très mince (fig. 13-16), comme dans la zone plus élevée de Saint-Antoine.

Le till mince a été remanié plusieurs fois par les processus fluviaux, mais aussi par ceux associés à la Mer de Champlain, principalement durant la phase régressive. Lorsque le till est présent directement à la surface, les premiers mètres sont aussi affectés par les processus récents d'altération, qui peuvent le rendre plus perméable.

L'esker de Sainte-Thérèse

L'esker de Sainte-Thérèse forme un dépôt graveleux sinueux et généralement visible en surface (fig. 9, 12-14). Il est latéralement interdigité avec de l'argile marine, qui recouvre ses flancs. Très peu de données de subsurface sont disponibles le long de l'esker, mais le till semble généralement absent sous ce dernier (fig. 12), ce qui est fort probable étant donné les mécanismes de formation des eskers et les processus d'érosion associés aux eaux de fonte sous-glaciaires. Cet esker a été largement exploité pour ses sables et graviers, de sorte que la nappe d'eau souterraine est visible pendant l'été dans les principales sablières abandonnées. Cet esker est très important en termes de connectivité entre la surface et le substrat rocheux puisqu'il s'étend à travers une zone normalement caractérisée par la présence d'une épaisse unité argileuse.

La zone à chenaux secondaires et dépôts résiduels

Dans la grande région entre Sainte-Anne-des-Plaines et Sainte-Thérèse, le till semble généralement très mince, et il est même souvent absent (fig. 13), de sorte que l'argile repose fréquemment sur le roc ou sur une mince couche de blocs. L'analyse des données indique qu'une grande partie de cette région est caractérisée par un assemblage de dépôts résiduels, de till mince et de sédiments fluvio-glaciaires également minces dont la distribution n'est pas très bien connue en raison de l'épaisse couverture argileuse. L'analyse de bassin suggère que l'érosion du till et la sédimentation fluvio-glaciaire pourraient avoir été contrôlées par un vaste système de chenaux sous-glaciaires secondaires connectés à l'esker de Sainte-Thérèse. Ainsi, cette zone pourrait cacher tout un réseau d'étroits cordons fluvio-glaciaires secondaires de quelques mètres d'épaisseur et plus ou moins connectés entre eux.

Les petits aquifères locaux

Les dépôts fluvio-glaciaires et proglaciaires ne sont pas toujours en contact avec l'aquifère régional, et quelques corps sédimentaires forment de petits aquifères perchés entre le till régional et l'argile marine (fig. 10). Un aquifère granulaire de surface existe également dans la région, mais il est très discontinu. Il est constitué principalement de sable surmontant les argiles marines, et son épaisseur est généralement entre 2 et 4 m, mais peut atteindre 10 ou 20 m. Ces sédiments sont d'origine marine (plages, etc.), fluviale et éolienne (sable fin).

DÉLIMITATION DU SYSTÈME AQUIFÈRE RÉGIONAL

L'aquifère rocheux régional

Les roches sédimentaires les plus fracturées représentent l'aquifère régional. Alors que la Formation de Covey Hill, située à la base de la séquence rocheuse, est surtout constituée de grès peu cimentés, la densité des fractures ouvertes contribuant à l'écoulement est élevée au sommet de la séquence, particulièrement dans les premiers mètres des dolomies du Groupe de Beekmantown. Cette unité rocheuse, désignée ci-après comme « roches très fracturées », constitue le principal conduit de l'écoulement régional.

De façon générale, le till recouvre en discordance les roches fracturées. Ce till est parfois remanié de façon superficielle, quoique le remaniement ait été plus important à maints endroits, laissant un dépôt résiduel très perméable d'environ 1 m d'épaisseur, surtout dans les corridors de drainage sous-glaciaire. Toutes les unités présentes dans la séquence quaternaire peuvent être en contact direct avec les roches sédimentaires à un endroit ou un autre de la région à l'étude. Par exemple, les roches fracturées (fig. 17, unité 2) sont surmontées à certains endroits par des dépôts fluvio-glaciaires grossiers très perméables désignés ci-après comme « sable-gravier ». Cette unité et le till remanié, ainsi que les roches très fracturées avec lesquelles ceux-ci sont en contact hydrogéologique direct, constituent la couche la plus transmissive du système aquifère régional (fig. 17, unité 3). Les études stratigraphiques des carottes de forages et les descriptions tirées de la base de données du ministère de l'Environnement du Québec ont permis d'évaluer que l'épaisseur de cette unité hydrostratigraphique est généralement inférieure à 3 m et en moyenne de 1 à 2 m, bien qu'elle puisse atteindre plusieurs dizaines de mètres par endroits.

Des roches faiblement fracturées, appelées ci-après « roches massives peu perméables », constituent la base du système aquifère régional (fig. 17, unité 1). Le plancher de l'aquifère a été placé à environ 100 m de profondeur dans la séquence de roches sédimentaires à l'aide des résultats d'essais hydrauliques à charge constante (voir les conclusions de la section « Essais d'injection à charge constante

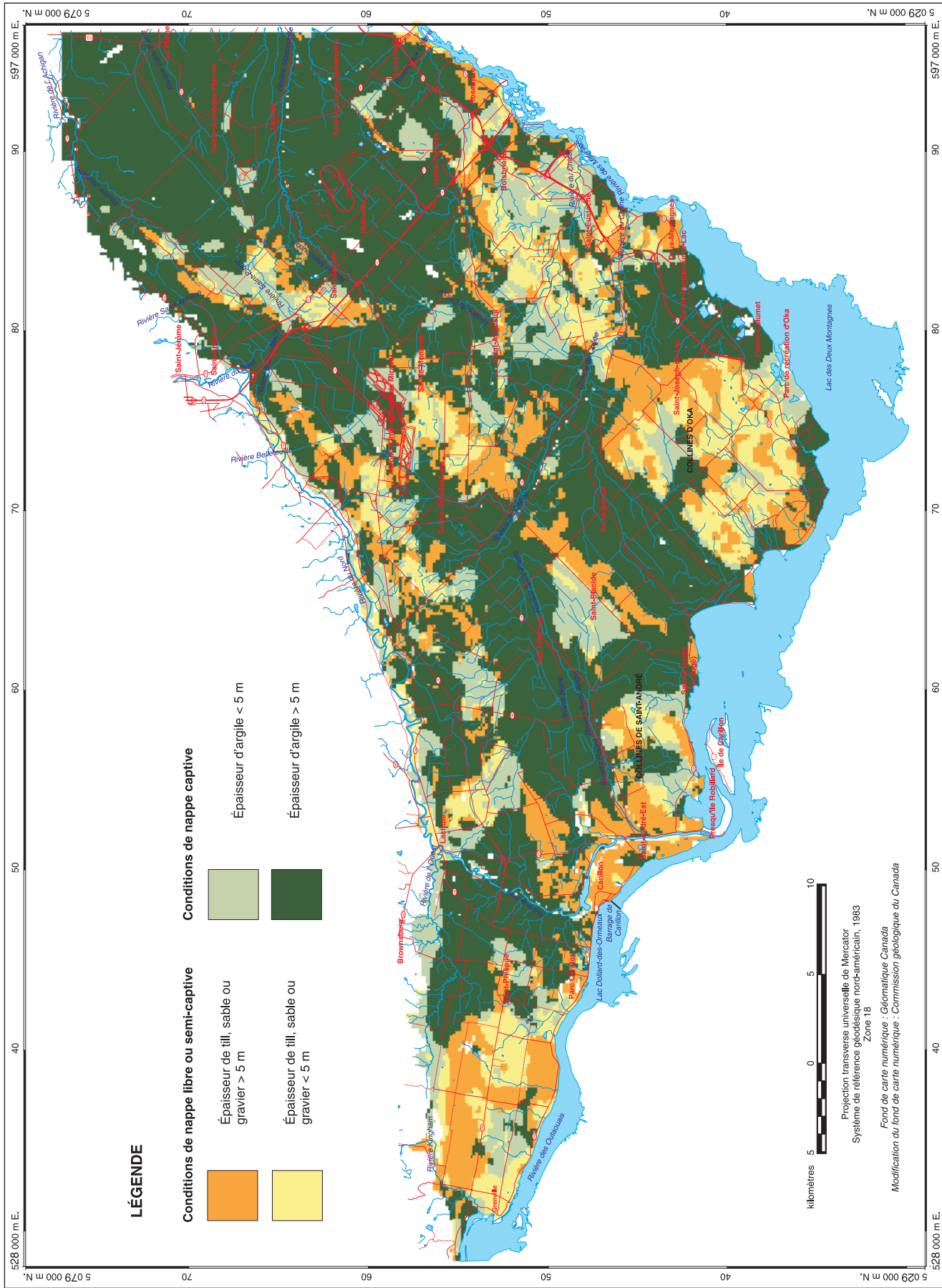


Figure 16. Contextes hydrogéologiques. (Figure créée par A. Hamel à partir de données fournies par A. Bolduc et M. Ross.)

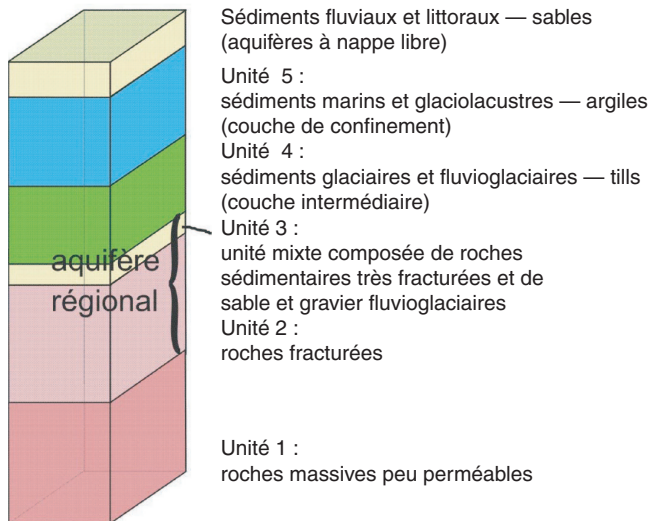


Figure 17. Modèle hydrostratigraphique pour le système aquifère du sud-ouest du Québec.

à l'aide d'obturateurs pneumatiques (essais Lugeon »). Près du toit de l'aquifère, l'unité mixte très perméable (roc très fracturé et sable-gravier; fig. 17, unité 3) est confinée entre du till et des couches très perméables de sédiments marins fins dominés par des argiles (fig. 17, unités 4 et 5).

Les zones de recharge

La plaine de till, décrite précédemment dans la section du même nom, représente avec les collines d'Oka et de Saint-André la principale zone de recharge. Aux endroits où les couches imperméables d'argile sont absentes, les cours d'eau sont directement reliés au système aquifère que constituent les roches paléozoïques. Quant aux aquifères perchés, ils sont très rarement exploités pour l'eau souterraine dans la région étudiée, vu leur étendue limitée. Il est à noter que ces aquifères libres sont, dans certains cas, connectés avec des unités perméables qui s'étendent sous l'argile. Par exemple, le complexe fluvioglaciaire de la rivière du Nord et l'esker de Sainte-Thérèse s'étendent sous l'argile, comme il a été décrit plus haut dans les sections « Les vallées enfouies » et « L'esker de Sainte-Thérèse », respectivement.

Les conditions de confinement

L'unité de confinement d'étendue régionale est composée de silt et d'argile de la Mer de Champlain. Cette unité très répandue (fig. 9) peut atteindre 60 m d'épaisseur dans les dépressions autour des collines d'Oka et de Saint-André (fig. 10, 11), et probablement sous la rivière de l'Ouest entre Saint-Philippe et Brownsburg (fig. 10). Les conditions de confinement sont donc généralement très bonnes lorsque cette unité est présente, sauf dans les endroits où son épaisseur est insuffisante pour prévenir son altération pédogénique jusqu'à la base. La distribution de cette unité a été largement

contrôlée par des zones de sédimentation marine rapide dont l'emplacement a été déterminé par la position dans les vallées des points de sortie du réseau d'eaux de fonte sous-glaciaires. À l'opposé, la faible sédimentation argileuse sur les hauteurs (zones de recharge) s'explique par les processus de brassage et l'effet des marées et des courants au sein du bassin marin.

D'après le récent modèle tridimensionnel des sédiments quaternaires (Ross et al., 2005), 65 % du système aquifère serait en conditions de nappe captive, environ 31 % serait semi-captif et seulement 4 % serait en conditions de nappe libre (fig. 16, 17).

En somme, même si à l'échelle régionale la succession paléozoïque comprend plusieurs unités et la stratigraphie des sédiments quaternaires est complexe, l'hydrostratigraphie conceptuelle du système étudié se résume en cinq unités se succédant comme suit, de la base au sommet : 1) roches massives peu perméables, 2) roches fracturées, 3) roches très fracturées et sable-gravier (et till remanié perméable), 4) till peu perméable et 5) argiles peu perméables (fig. 17). Deux de ces couches, d'étendue régionale, composent le système aquifère principal. Il s'agit des unités 2 (roches paléozoïques fracturées) et 3 (unité mixte constituée de roches paléozoïques très fracturées et de sédiments quaternaires fluvioglaciaires, avec localement du till délavé). Les roches paléozoïques peu perméables (unité 1) et les argiles marines d'âge quaternaire, pratiquement imperméables (unité 5), constituent respectivement le plancher et le toit du système aquifère.

CARACTÉRISTIQUES DU SYSTÈME AQUIFÈRE ROCHEUX

Les propriétés hydrauliques des deux principales unités aquifères, soit l'unité mixte (roches très fracturées et sable-gravier) et l'unité de roches fracturées, ont été estimées à l'aide des types d'essais suivants : perméabilité in situ, injection à charge constante de type Lugeon, capacité spécifique, et pompage avec ou sans puits d'observation. Cette section et la suivante présentent brièvement les résultats obtenus à l'aide des essais hydrauliques pour l'unité mixte et pour l'unité de roches fracturées, respectivement.

Propriétés hydrauliques de l'unité mixte (roches très fracturées et sable-gravier)

Les roches très fracturées, de tous les types lithologiques confondus, et le sable-gravier à la base de la séquence quaternaire ont des origines géologiques fort différentes. Malgré cela, ces unités sont regroupées en une même unité hydrostratigraphique, puisque leurs propriétés hydrauliques sont semblables et qu'elles sont toujours contiguës. Cette unité mixte est caractérisée par une perméabilité élevée; souvent, lors de travaux de forage, de grandes quantités de boue sont

nécessaires pour stabiliser les murs des puits. De plus, des venues d'eau abondantes ont lieu lors de l'interception de cette unité.

La couche mixte est de distribution non uniforme; elle peut être inexistante localement, ou une seule de ses deux composantes peut être présente. Ainsi, son épaisseur varie grandement, de zéro à plusieurs dizaines de mètres. Au total, 25 essais hydrauliques ont permis de caractériser cette unité : six essais de pompage avec puits d'observation, six essais de pompage sans puits d'observation et 13 essais de perméabilité in situ (*slug test*). La moyenne géométrique de la conductivité hydraulique est de $7,81 \times 10^{-4}$ m/s (fig. 18). L'écart type du logarithme de la conductivité hydraulique est de 0,47, ce qui correspond à une conductivité hydraulique relativement homogène. Le coefficient d'emmagasinement moyen est de 7×10^{-4} , ce qui est typique des aquifères captifs (Freeze et Cherry, 1979; Fetter, 1994).

Propriétés hydrauliques des roches fracturées

Une attention particulière a été portée à la caractérisation des propriétés hydrauliques des roches fracturées, principalement pour définir leur variation spatiale mais aussi pour évaluer l'épaisseur de la séquence rocheuse qui contribue majoritairement à l'écoulement souterrain. Le tableau 4 résume les données de conductivité hydraulique obtenues pour les roches fracturées.

Essais d'injection à charge constante à l'aide d'obturateurs pneumatiques (essais Lugeon)

Ce type d'essai consiste à injecter de l'eau à un taux constant dans un intervalle du puits délimité par des obturateurs pneumatiques. La transmissivité de la zone mise à l'essai est obtenue en supposant un écoulement en régime

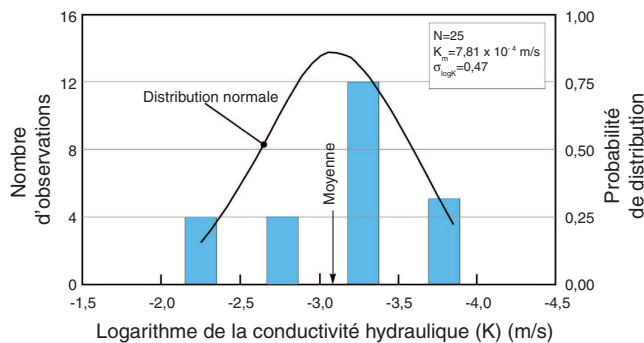


Figure 18. Résultats des essais hydrauliques dans l'unité mixte (roches très fracturées et sable-gravier). N = nombre de mesures; K_m = moyenne géométrique de la conductivité hydraulique; $\sigma_{\log K}$ = écart type du logarithme de la conductivité hydraulique.

permanent. Ainsi, par des essais successifs à des profondeurs différentes, un profil vertical de la transmissivité de la formation rocheuse est obtenu.

Au total, 20 puits forés dans les roches paléozoïques ont fait l'objet d'une caractérisation à l'aide de ce type d'essai. Trois de ces puits interceptent les calcaires, 10 sont forés dans les dolomies, cinq dans les grès, un dans les roches précambriennes, et un puits intercepte les dolomies et les roches précambriennes. La profondeur maximale atteinte lors des forages est de 140 m et la longueur des puits ouverts au roc varie entre 30 et 90 m. Dans la perspective de la caractérisation régionale, la longueur de l'intervalle mis à l'essai a été fixée à 3,75 m. Un total de 328 essais a ainsi été produit.

Les résultats pour les quatre types de roches interceptés sont montrés séparément à la figure 19. La moyenne géométrique des logarithmes de la transmissivité ne suggère pas de relation particulière entre la transmissivité et le type de roche. Toutefois, le profil de transmissivité suggère, pour la dolomie (fig. 19b), le grès (fig. 19c) et le roc précambrien (fig. 19d), une diminution de la transmissivité avec la profondeur. C'est la dolomie et le roc précambrien qui montrent les plus fortes relations, avec des diminutions de trois ordres de grandeur (facteur 1000) sur la totalité de l'intervalle éprouvé, tandis que le grès montre une diminution d'environ un ordre de grandeur. Ces observations impliquent que la densité de fractures communicantes (porosité effective) est beaucoup plus élevée près de la surface du roc et que la facilité d'écoulement souterrain diminue avec la profondeur dans ces unités rocheuses.

Pour les calcaires (fig. 19a), le profil de transmissivité est différent. On observe plutôt une augmentation de la transmissivité avec la profondeur jusqu'à 40 m, puis une diminution abrupte, après quoi la transmissivité demeure constante jusqu'à 90 m. Ces changements de transmissivité seraient corrélés avec les changements lithologiques des membres composant les formations calcaires (Savard et al., 2004).

De manière à définir les propriétés moyennes du socle rocheux pour toutes les formations rocheuses, l'ensemble des profils de transmissivité a été fondu en un seul graphique (fig. 20). La moyenne géométrique de la transmissivité des 328 essais est de $1,54 \times 10^{-6}$ m²/s, et l'écart type des logarithmes est de 1,4. Pour la longueur de l'intervalle mis à l'essai (3,75 m), cette transmissivité correspond à une conductivité hydraulique de $4,1 \times 10^{-7}$ m/s. La transmissivité diminue de presque deux ordres de grandeur sur 90 m, soit la longueur de puits ouvert. Ainsi, pour le modèle conceptuel d'écoulement, nous considérons qu'à des profondeurs supérieures à 100 m dans la séquence rocheuse, les matériaux sont si peu perméables qu'ils ne contribuent pas de façon appréciable à l'écoulement global du système aquifère. C'est pourquoi le plancher effectif de l'aquifère exploitable a été fixé à environ 100 m de profondeur dans la séquence rocheuse saturée en eau.

Tableau 4. Résumé des données de conductivité hydraulique pour les roches paléozoïques fracturées.

Rangée	Essais hydrauliques	N ¹	K _{min} ² (m/s)	K _{max} ² (m/s)	K _{moy. géom.} ^{2,3} (m/s)	σ _{log K} ⁴
a	Essais d'injection ⁵	328	2,7 x 10 ⁻¹¹	1,4 x 10 ⁻³	4,1 x 10 ⁻⁷	1,40
b	Essais d'injection ⁶	20	3,8 x 10 ⁻⁸	1,6 x 10 ⁻⁴	4,8 x 10 ⁻⁶	0,90
c	Essais de capacité spécifique	132	3,5 x 10 ⁻⁸	4,9 x 10 ⁻⁴	2,8 x 10 ⁻⁵	0,83
d	Essais de pompage ⁷	23	1,4 x 10 ⁻⁶	6,7 x 10 ⁻⁴	3,1 x 10 ⁻⁵	0,79
e	Essais de pompage (avec puits d'observation)	12	1,0 x 10 ⁻⁶	7,9 x 10 ⁻³	1,2 x 10 ⁻⁴	0,86
f	b + c + d + e ⁸	179	3,5 x 10 ⁻⁸	7,9 x 10 ⁻³	2,6 x 10 ⁻⁵	0,89

¹ N = nombre de mesures
² K = conductivité hydraulique
³ Moy. géom. = moyenne géométrique
⁴ σ_{log K} = écart type du logarithme de la conductivité hydraulique
⁵ Intervalles de 3,75 m mis à l'essai
⁶ Puits entiers
⁷ Essais de pompage sans puits d'observation
⁸ Plusieurs essais hydrauliques ont été effectués dans certains puits mais une seule valeur a été retenue.

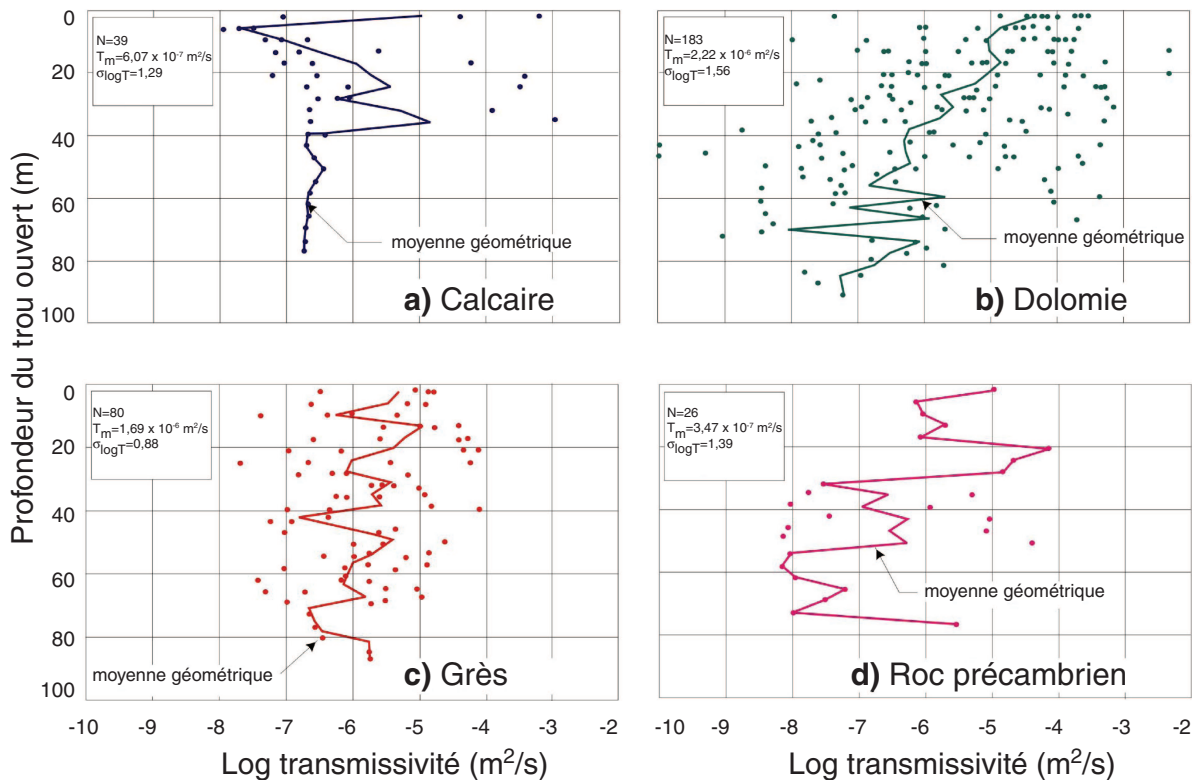


Figure 19. Distribution de la transmissivité par rapport à la profondeur des quatre principaux types de roches de la région. La profondeur du trou ouvert est mesurée à partir du toit de la séquence rocheuse. Le trait plein indique la moyenne géométrique spécifique pour chaque profondeur. La moyenne géométrique de la transmissivité (T_m), l'écart type du logarithme de la transmissivité ($\sigma_{\log T}$), et le nombre de mesures (N) s'appliquent pour l'ensemble des points sur chacun des graphiques.

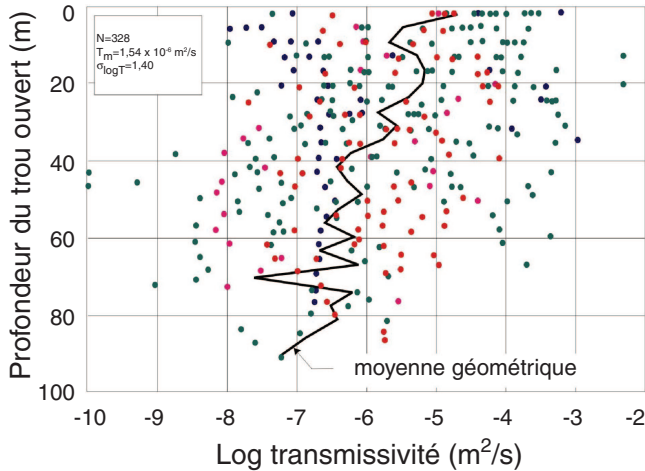


Figure 20. Sommaire des données de transmissivité obtenues à partir des essais d'injection à charge constante à l'aide d'obturateurs pneumatiques, pour tous les types de roches de la région étudiée. Les couleurs des points correspondent aux types de roches, suivant l'usage à la figure 19. N = nombre de mesures; T_m = moyenne géométrique de la transmissivité; $\sigma_{\log T}$ = écart type du logarithme de la transmissivité.

Essais de capacité spécifique

Le Système d'information hydrogéologique (SIH; www.mddep.gouv.qc.ca/eau/souterraines/sih/index.htm) du ministère de l'Environnement du Québec, une compilation de l'information produite par les puisatiers, fournit une information très utile sur les propriétés hydrauliques du système aquifère régional. La capacité spécifique, calculée comme le ratio du débit pompé et du rabattement observé, est, suite au forage d'un puits, habituellement tirée d'essais visant à déterminer la productivité du puits. La capacité spécifique est en réalité une première estimation brute de la transmissivité de la formation rocheuse interceptée par le puits. Pour obtenir une estimation plus précise de la transmissivité, la solution de Theis (1935) à l'équation d'écoulement, modifiée par Jacob (1947), peut être appliquée. La conductivité hydraulique est alors obtenue comme le ratio entre la transmissivité et la colonne d'eau dans le puits à la fin du pompage.

La base de données du Système d'information hydrogéologique comprend plus de 4600 puits répartis sur la région étudiée, pour lesquels les données de capacité spécifique sont généralement fournies. Cependant, l'information ne peut être retenue s'il est vérifié que le puits possède un niveau statique plus bas que son niveau dynamique, qu'il est sec à la fin du pompage, que son niveau dynamique est plus bas que 50 % de la colonne d'eau initiale, ou que la durée de l'essai qu'il a subi est non indiquée ou plus courte que 2 h. Après un tri rigoureux des données, seuls 132 essais de capacité spécifique ont servi au calcul de la transmissivité et de la conductivité hydraulique. Les résultats compilés sous forme d'histogramme des logarithmes avec la fonction de la

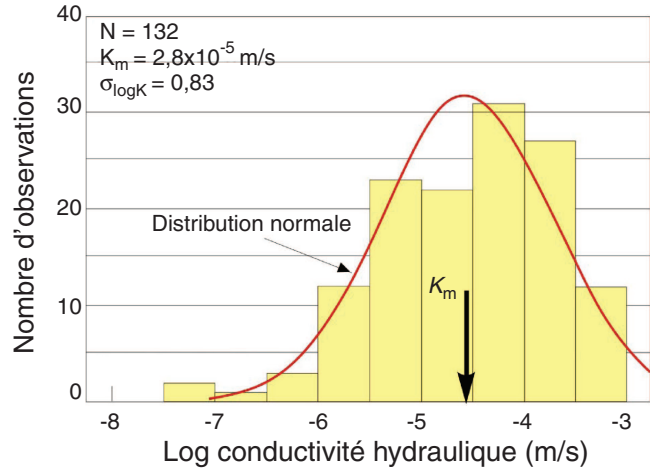


Figure 21. Sommaire des données de conductivité hydraulique obtenues à partir d'essais de capacité spécifique (base de données du Système d'information hydrogéologique (SIH)). N = nombre de mesures; K_m = moyenne géométrique de la conductivité hydraulique; $\sigma_{\log K}$ = écart type du logarithme de la conductivité hydraulique.

distribution normale indiquent une moyenne géométrique de la conductivité hydraulique de $2,8 \times 10^{-5}$ m/s, et un écart type des logarithmes de 0,8 (fig. 21).

Même si les valeurs de transmissivité et de conductivité hydraulique obtenues par cette méthode sont approximatives, elles sont acceptables et d'ailleurs fort utiles vu la grande superficie de la région d'étude; elles permettent d'amener la densité de l'information à une mesure par 10 km².

Essais de pompage

Les résultats de 35 essais de pompage effectués dans les roches fracturées, dont cinq dans le cadre de cette étude, ont été analysés. Les débits de pompage ont varié entre 0,1 et 2,3 m³/min pour une durée de pompage moyenne de 64 h. Les rabattements observés ont varié entre 1 et 48 m. La transmissivité a été obtenue à partir des courbes de rabattement en employant la solution de Theis (1935) pour l'écoulement dans des aquifères captifs. Cette méthode a été utilisée pour l'interprétation de 12 essais de pompage avec puits d'observation. La solution de Cooper-Jacob (Cooper et Jacob, 1946) a été appliquée à 23 essais dont la courbe de rabattement/remontée a été mesurée uniquement dans le puits pompé (tableau 4, rangée d). La moyenne géométrique du coefficient d'emmagasinement est de 4×10^{-4} , ce qui est caractéristique des aquifères captifs.

En tout, 179 valeurs de conductivité hydraulique (tableau 4, rangée f) ont été utilisées pour générer une carte de distribution spatiale de la conductivité hydraulique (fig. 22). La méthode de distance inverse modifiée a été appliquée pour l'interpolation des données. Outre les distances, les volumes

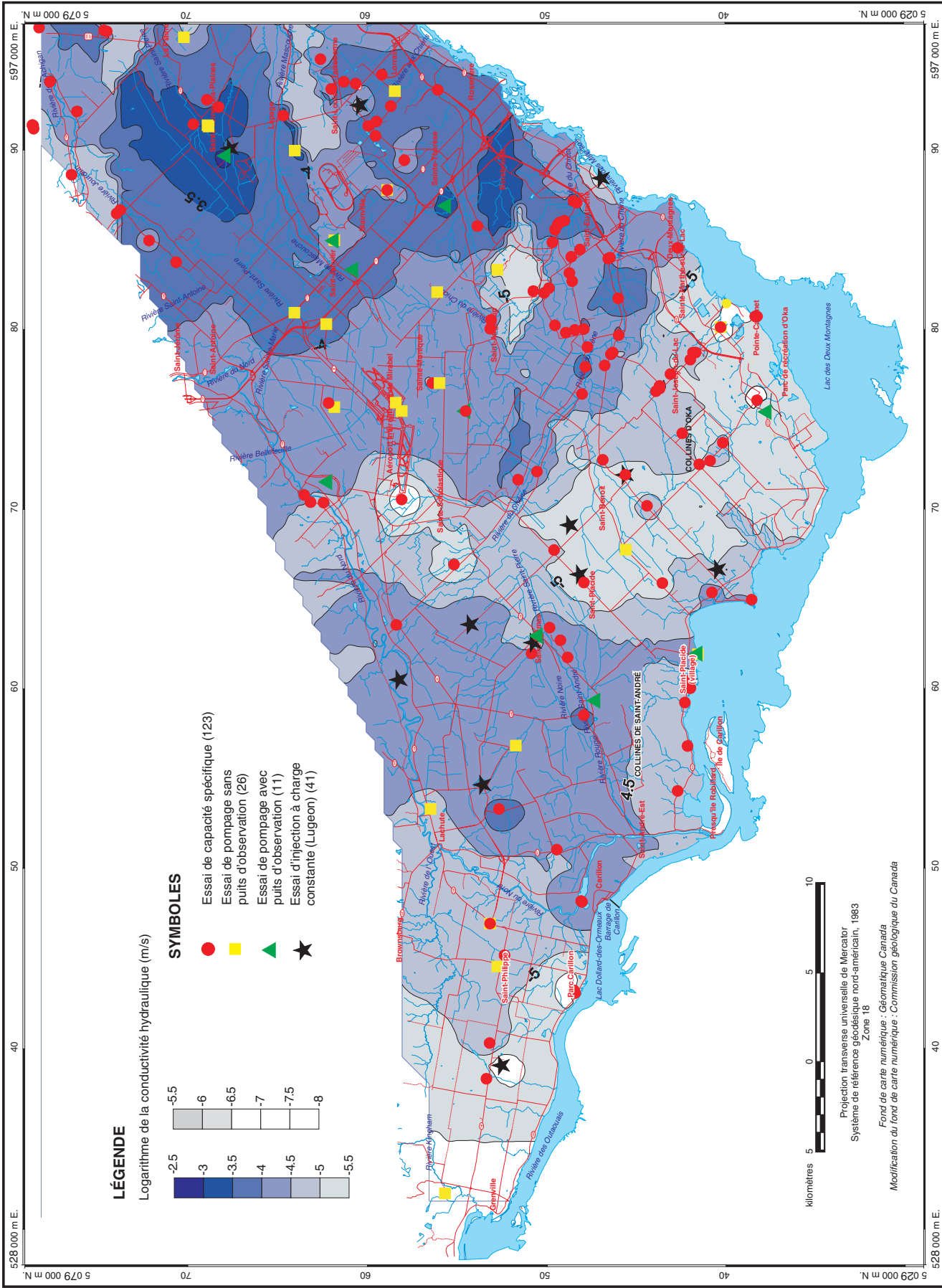


Figure 22. Logarithme de la conductivité hydraulique de l'aquifère rocheux. (Figure créée par M. Nastev.)

d'aquifère ayant fait l'objet d'essais hydrauliques ont été pris en compte pour estimer la conductivité hydraulique aux points d'interpolation (Nastev et al., 2004).

Sur la carte de distribution spatiale du logarithme de la conductivité hydraulique, la densité des données disponibles est plus élevée dans les parties centre-sud et est de la région, où affleurent principalement des dolomies (fig. 22). Ces roches montrent les valeurs de conductivité hydraulique les plus élevées (de l'ordre de 10^{-4} m/s). Leur répartition semble contrôler la distribution des valeurs les plus élevées de conductivité hydraulique.

Niveaux d'eau et écoulement de l'eau souterraine

La campagne de levés piézométriques, principalement effectuée au cours de l'été 1999 et complétée pendant l'été 2000, a permis d'obtenir plus de 505 points de mesure de la surface piézométrique. Ces mesures proviennent surtout de puits résidentiels, mais également de puits d'observation du ministère de l'Environnement du Québec, de piézomètres d'études locales, et de sondages effectués par la Commission géologique du Canada (Québec). Afin de couvrir certaines zones inaccessibles, 143 mesures provenant du Système d'information hydrogéologique (SIH) ont été intégrées. De plus, 105 points de contrôle distribués le long de cours d'eau (69) et dans les régions inhabitées ou à relief important (36) ont été ajoutés dans les zones où il y avait encore un manque de données. Ces points de contrôle additionnels visent à mieux refléter le contexte hydrogéologique observé sur le terrain et à faciliter l'interpolation des données. Aux endroits où les cours d'eau sont en lien hydraulique avec les formations rocheuses, la valeur d'altitude du terrain a été attribuée au point de contrôle. Les mesures piézométriques représentent la charge hydraulique au niveau de l'aquifère rocheux fracturé de surface.

Afin d'exercer un certain contrôle sur la qualité de la carte piézométrique, une validation des mesures a été effectuée. Mentionnons d'abord que la valeur de l'altitude de la surface piézométrique est le résultat de l'addition de l'altitude du niveau de référence (sol, margelle ou autre) à la profondeur de la surface piézométrique par rapport à ce niveau de référence. En fonction des méthodes de mesure de l'altitude du niveau de référence et de la profondeur de la surface piézométrique, l'exactitude des mesures peut différer. On évalue que l'erreur d'estimation de l'altitude du point de référence au moyen des cartes topographiques à l'échelle de 1/50 000 est de -0,18 m par rapport aux valeurs obtenues par nivellement, avec un écart type de 1,89 m. Cette évaluation a été réalisée en comparant les altitudes obtenues par nivellement à celles obtenues à l'aide des cartes topographiques, et ce, pour 47 points de mesure. Cette erreur est considérée négligeable à l'échelle d'investigation, ce qui permet de valider l'utilisation des cartes topographiques pour la détermination de l'altitude du sol.

Pour la profondeur, les mesures effectuées au cours des étés 1999 et 2000 à l'aide des sondes à niveau d'eau sont considérées précises à 0,5 cm près si ces mesures ont été prises dans des puits abandonnés. Cependant, la majorité des mesures proviennent de puits domestiques en opération, et afin de réduire l'erreur induite par le pompage dans les formations peu perméables, les puits pour lesquels la différence entre les niveaux dynamique et statique est supérieure à 10 m ont été systématiquement écartés. De plus, la procédure de terrain adoptée pour réduire les erreurs de mesure exige que 1) la pompe ne soit pas en opération durant la prise de mesures, et 2) la différence entre deux mesures prises à un intervalle de 5 à 15 min soit inférieure à 1 cm. La validation des mesures provenant du SIH a été réalisée en comparant ces données avec 174 mesures de terrain effectuées au cours de l'été 1999. L'erreur pour ces mesures est de 2,32 m, avec un écart type de 4,88. L'écart entre ces deux sources de données provient principalement du fait que les mesures ont été prises au cours d'années et de périodes différentes.

L'ensemble final décrivant les niveaux d'eau de l'aquifère rocheux régional comprend 450 points de piézométrie interpolés par krigeage (fig. 23). Les altitudes de la surface piézométrique s'échelonnent depuis 20 à 40 m au niveau de la rivière des Outaouais et de la rivière des Mille Îles jusqu'à 120 m sur les collines d'Oka et plus de 170 m dans les Laurentides. De façon générale, l'écoulement se fait depuis les Laurentides, les collines d'Oka et les collines de Saint-André vers la rivière des Outaouais et la rivière des Mille Îles. Pour donner une idée du temps requis pour que l'eau infiltrée traverse le territoire étudié, les vitesses d'écoulement dans l'unité mixte ont été grossièrement estimées. Elles varient entre 0,5 et 1500 m/a selon les régions, avec une valeur moyenne de l'ordre de 150 m/a basée sur des estimations moyennes de la conductivité hydraulique, du gradient hydraulique et de la porosité.

Du nord, l'écoulement emprunte un réseau de bassins hydrogéologiques avant d'atteindre, au sud, les rivières (en aval). Les bassins hydrogéologiques définis par la distribution des charges hydrauliques suivent la forme des bassins des rivières du Nord, Noire, du Chêne et Mascouche. Les gradients piézométriques pour les Laurentides et les collines d'Oka et de Saint-André sont en moyenne de 2,2 et 1,6 %, respectivement. Dans la région plus plate de la Plateforme du Saint-Laurent proprement dite, les gradients sont de l'ordre de 0,46 %, avec un minimum autour de 0,0008 %.

Réseau de surveillance et variations temporelles des niveaux d'eau souterraine

Un programme de surveillance des fluctuations des niveaux d'eau dans les roches fracturées a été établi par le ministère de l'Environnement du Québec dans la région entre 1974 et 1992. Dans le cadre du projet de caractérisation régionale, un nouveau réseau de 36 puits d'observation a été installé et suivi de 1999 à 2002 (fig. 24). Les fluctuations ont été mesurées quotidiennement dans 12 puits d'observation,

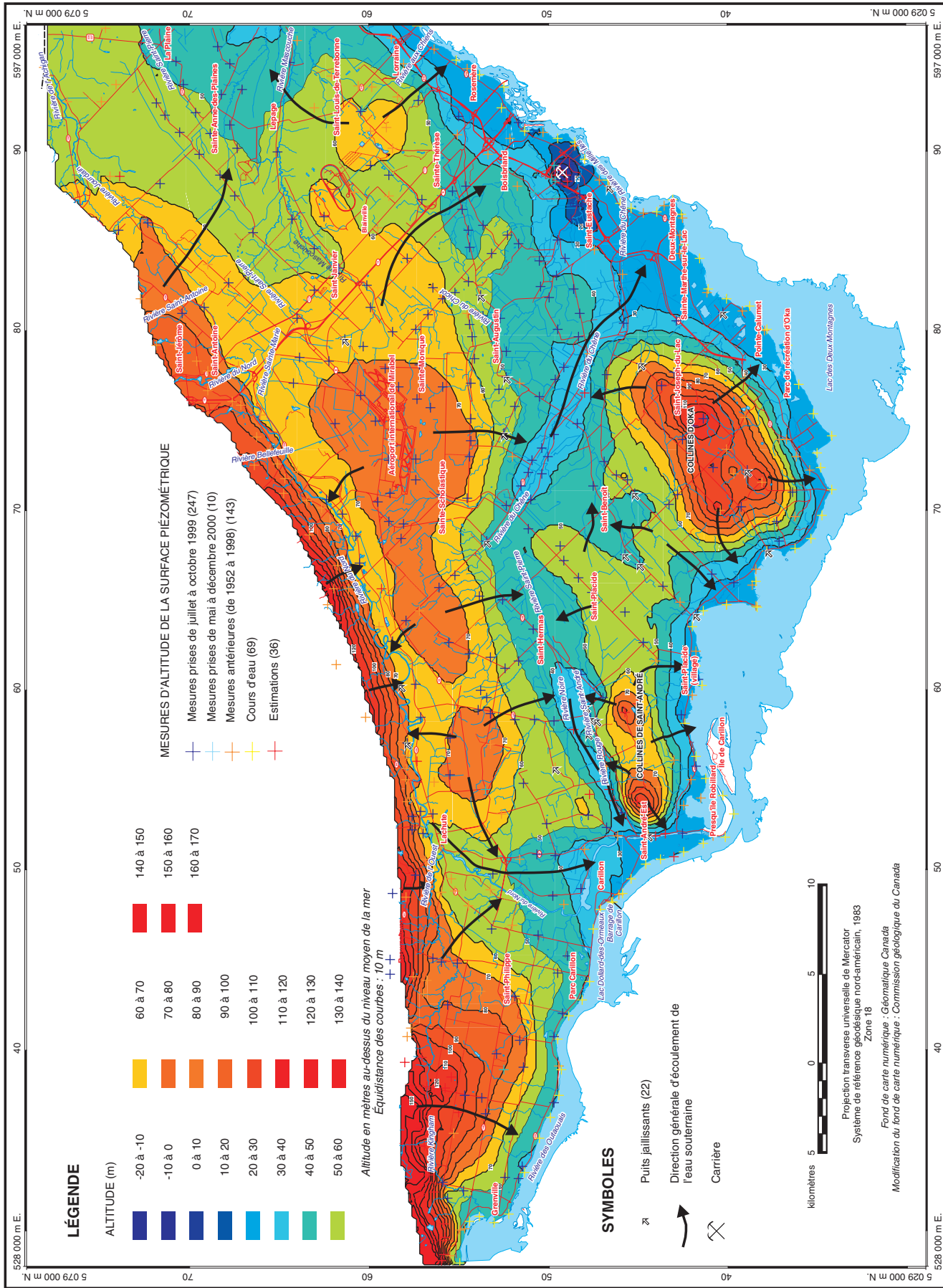


Figure 23. Altitude de la surface piézométrique de l'aquifère rocheux. (Figure créée par D. Paradis.)

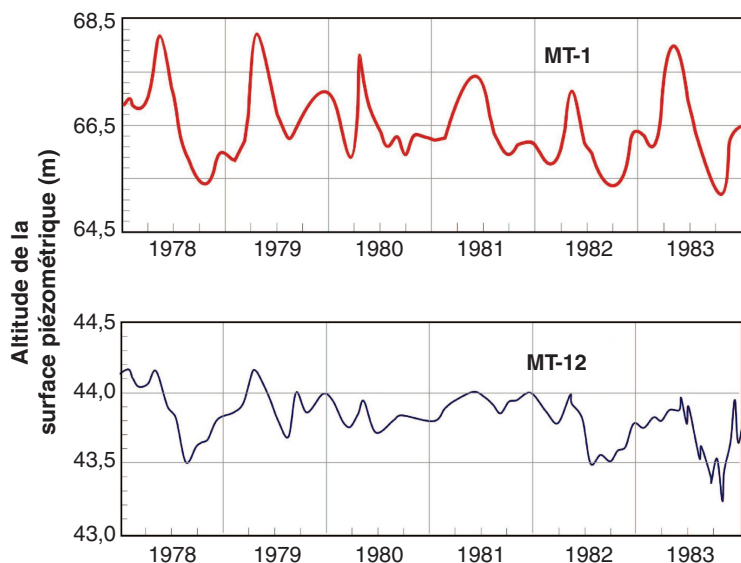


Figure 25. Fluctuations des niveaux d'eau pour deux puits d'observation, pour la période de 1978 à 1984 : MT-1 (zone à nappe libre) et MT-12 (zone à nappe captive).

Tableau 5. Moyennes à long terme de la fluctuation du niveau d'eau dans les puits d'observation traversant les roches fracturées.

N°	Puits	Coordonnées UTM (zone 18, NAD83 ¹)		Altitude (m a.n.m. ²)	Profondeur		Durée des observations (a)	Moyennes annuelles				Variation du niveau d'eau		
		Est (m)	Nord (m)		Roc (m)	Puits (m)		Niveau d'eau			moyenne (m)	minimum (m)	maximum (m)	
								Écart type (m)	minimum (m a.n.m. ²)	maximum (m a.n.m. ²)				
1	MT-1 ³	553212	5056414	79,2	16,3	19,7	18	66,2	0,80	65,2	67,7	2,5	1,2	4,6
2	R-1 ³	553220	5056439	79,2	18,3	91,5	14	65,9	0,80	64,9	67,3	2,4	1,1	3,4
3	R-15 ³	571906	5045871	68,2	4,6	91,5	16	62,3	1,13	60,8	64,6	3,8	1,4	8,1
4	26856 ³	580779	5063973	68,6	0,9	32,0	20	66,3	0,46	65,3	67,2	1,9	1,2	2,7
5	R-19 ³	575250	5054250	68,6	9,1	61,0	13	66,3	0,88	65,1	67,6	2,5	1,2	3,9
6	99-STV ³	566319	5048312	58,0	20,8	110,3	1	48,5	0,37	47,5	49,8	2,3	2,3	2,3
7	MT-2 ³	545370	5049010	45,7	7,9	10,6	12	38,9	0,43	38,3	39,6	1,3	0,8	2,3
8	MT-3 ⁴	546882	5053038	79,2	19,5	24,3	14	54,5	0,36	54,0	55,1	1,1	0,6	1,8
9	R-3 ⁴	546893	5053048	73,3	16,1	91,5	14	53,1	0,31	52,7	53,7	1,0	0,3	1,9
10	MT-7 ⁴	579928	5040343	30,5	30,2	33,5	8	23,2	0,24	22,9	23,9	1,1	0,8	1,5
11	MT-12 ⁴	565080	5052300	45,7	32,8	35,5	12	43,8	0,18	43,5	44,1	0,6	0,2	1,3
12	MT-16 ⁴	557449	5055442	76,2	17,7	18,3	13	72,1	0,79	71,2	73,4	2,2	0,4	3,9
13	R-13 ⁴	589929	5065023	61,0	18,6	91,5	15	53,3	0,41	52,7	54,1	1,4	0,7	2,4
14	R-16 ⁴	562829	5050472	45,7	42,0	60,9	18	44,4	0,23	44,0	44,8	0,7	0,3	1,7
15	99-SAB ⁴	581881	5056057	71,0	19,5	91,5	1	64,7	0,78	63,1	65,8	2,7	2,7	2,7
16	99-FRO ⁴	566705	5041109	38,0	70,0	142,0	1	32,4	0,43	32,0	33,4	1,4	1,4	1,4
17	99-BAS ⁴	580649	5042933	52,9	78,3	78,3	1	30,7	0,29	30,4	31,3	0,9	0,9	0,9
18	99-13E ⁴	581053	5040299	26,8	36,8	38,1	1	20,0	0,69	18,6	20,8	2,2	2,2	2,2
19	R-8 ⁴	593009	5058402	67,1	13,7	91,4	18	54,8	0,40	54,3	55,5	1,2	0,5	1,7
20	R-1-69 ⁴	575629	5062123	73,6	18,3	49,4	12	69,0	0,47	68,3	69,7	1,3	0,6	2,3

¹ NAD83 = Système de référence géodésique nord-américain, 1983

² a.n.m. = au-dessus du niveau de la mer

³ Aquifère à nappe libre ou semi-captive

⁴ Aquifère à nappe captive

Plate-forme du Saint-Laurent proprement dite, les gradients sont plutôt autour de 0,46 %. L'écoulement de l'eau souterraine se fait généralement du nord vers le sud, contribuant au débit des rivières des Outaouais et des Mille Îles.

Le réseau de surveillance des niveaux d'eau souterraine a permis de reconnaître les variations annuelles des parties de l'aquifère régional en conditions captives (de 0,7 à 2,7 m environ) et en conditions de nappe libre (de 1,9 à 3,8 m).

CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET QUALITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE

Approche méthodologique

C'est en analysant les constituants chimiques qui s'y trouvent que l'on peut évaluer la qualité de l'eau souterraine. Les concentrations des différents éléments présents dans l'eau sont souvent variables d'une zone à l'autre pour une région donnée. Cette variabilité peut être reliée à des facteurs 1) géologiques (échanges eau-roche), 2) hydrogéochimiques (temps de résidence de l'eau souterraine dans l'aquifère, degré de confinement de la zone aquifère, mélanges d'eaux d'origines différentes) ou 3) anthropiques (effets polluants de l'utilisation des fosses septiques et des lieux d'enfouissement sanitaires, de l'épandage de sels déglaçants, d'engrais ou de pesticides, de fuites de réservoirs d'hydrocarbures, etc.). La variabilité hydrogéochimique est étudiée afin d'évaluer le potentiel de la ressource et d'identifier des problématiques de qualité d'eau qui pourraient nécessiter des mesures particulières de gestion et de protection.

Les objectifs de la caractérisation de la qualité de l'eau souterraine sont les suivants :

- vérifier si la qualité de l'eau est appropriée pour différents usages;
- évaluer la variabilité hydrogéochimique régionale;
- identifier les facteurs causant la variabilité;
- établir un portrait régional de la qualité de l'eau.

Trois campagnes d'échantillonnage de l'eau ont été effectuées : au printemps et à l'été 1999, puis à l'été 2000. Au total, on a échantillonné 151 puits (puits de particuliers, puits municipaux, et puits d'observation), ainsi que deux sources captées. Des cartes géologiques des formations superficielles, du socle rocheux, des épaisseurs de dépôts meubles, des sous-bassins, et des zones de recharge et d'émergence ont guidé le choix des sites où il a été jugé nécessaire de prélever des échantillons d'eau afin de bien caractériser le système d'écoulement.

Les puits échantillonnés exploitent des aquifères dans des formations rocheuses (115), dans des formations de dépôts meubles (20, dont des sédiments de surface (7) et des sédiments sous l'argile (13)), et parfois même dans les deux à la fois (provenance mixte) (9). La figure 26 présente la distribution des sites d'échantillonnage et la provenance des échantillons d'eau souterraine.

Évaluation de la qualité de l'eau souterraine

Afin d'évaluer la qualité de l'eau souterraine, les concentrations naturelles des éléments chimiques contenus dans l'eau sont comparées à des critères de qualité de l'eau établis pour différents usages. Les usages pour lesquels la qualité de l'eau souterraine est évaluée sont 1) l'approvisionnement en eau potable, 2) l'abreuvement des animaux et 3) l'irrigation. Les critères proposés sont ceux du gouvernement du Québec (2001a), du Sous-comité fédéral-provincial sur l'eau potable du Comité fédéral-provincial-territorial de l'hygiène du milieu et du travail (2001), et du Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME) (1999). Les critères du CCME, contrairement aux critères du gouvernement du Québec, n'ont pas force de loi, à moins qu'il n'en ait été décidé autrement par les autorités provinciales, territoriales ou fédérales appropriées.

Les tableaux 6 à 8 présentent des bilans des dépassements des critères de qualité de l'eau. On peut voir que les dépassements des critères reliés à la santé sont peu nombreux, n'ayant été observés que pour les coliformes totaux (12 échantillons sur 80), le fluorure (10 échantillons sur 142), le baryum (2 échantillons sur 146) et le nitrate (1 échantillon sur 144). Des dépassements de critères esthétiques ont aussi été identifiés pour certains paramètres : le fer (47 échantillons sur 143), le sulfure (28 échantillons sur 142), le manganèse (48 échantillons sur 146), le sodium (25 échantillons sur 146), le chlorure (21 échantillons sur 146), le pH (12 échantillons sur 146), le sulfate (2 échantillons sur 144) et les concentrations de matières dissoutes totales (MDT) (43 échantillons sur 146).

Variabilité régionale de la qualité de l'eau souterraine et représentation graphique

La représentation graphique et cartographique des résultats d'analyses physicochimiques aide à la compréhension des caractéristiques hydrogéochimiques qui ont une variabilité spatiale. Tous les résultats obtenus au cours du projet de recherche sont présentés dans la base de données du projet.

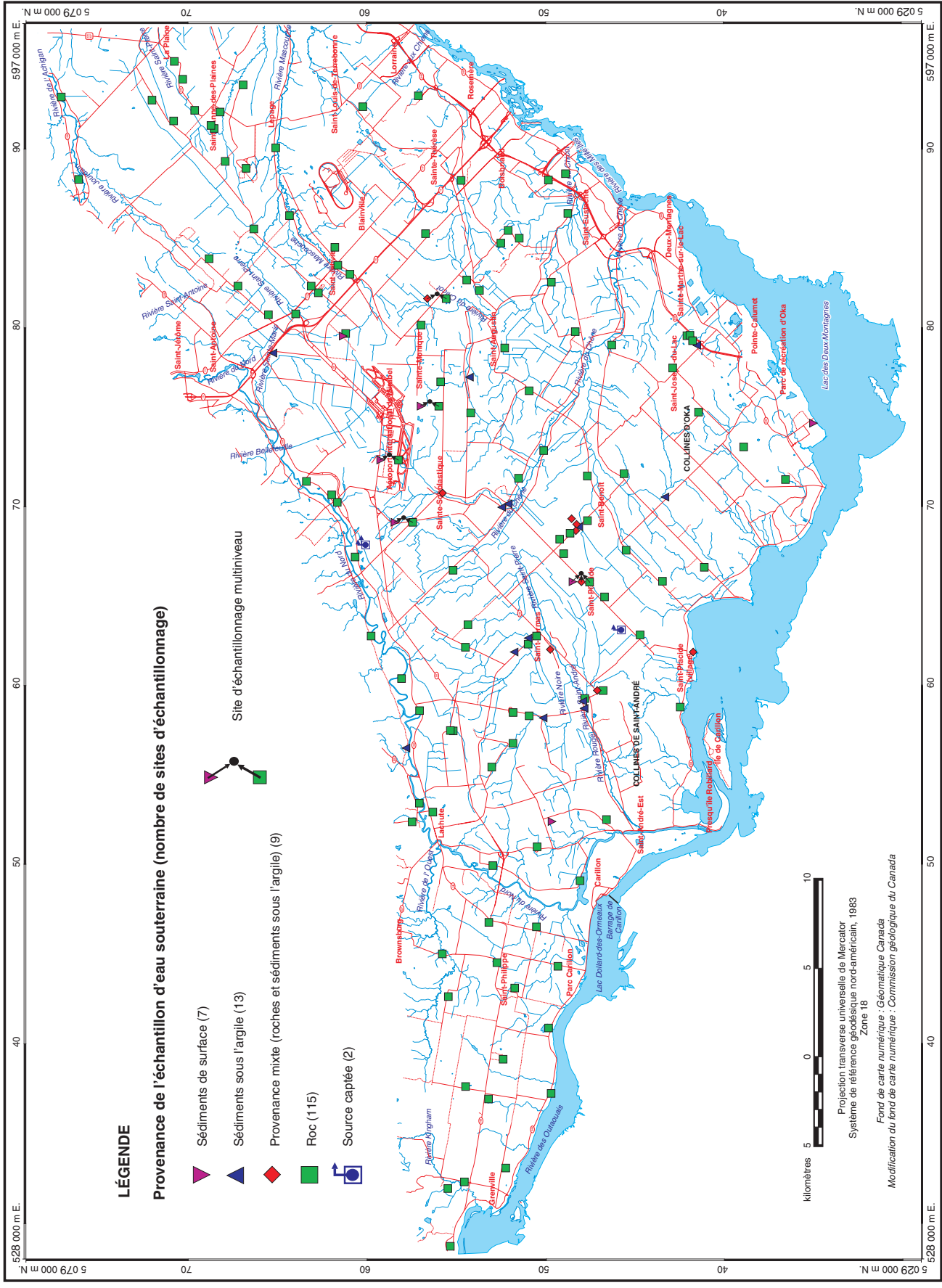


Figure 26. Distribution des sites d'échantillonnage. (Figure créée par É. Bourque et V. Cloutier.)

Tableau 6. Critères de qualité de l'eau pour les paramètres microbiologiques mesurés.

Paramètres microbiologiques	Critères de qualité de l'eau (nombre de dépassements du critère)				Nombre total de résultats d'analyses
	Norme ¹	Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada ²		Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement ³	
	Eau potable CM ⁴	Eau potable CMA ⁵	Irrigation	Abreuvement des animaux d'élevage	
Coliformes totaux	10/100 mL (12) ⁶	10/100 mL (12)	1000/100 mL (0)	aucune	80
Coliformes fécaux ou <i>Escherichia coli</i>	0/100 mL (0)	0/100 mL (0)	100/100 mL (0)	aucune	80

¹ Gouvernement du Québec (2001a)
² Sous-comité fédéral-provincial sur l'eau potable du Comité fédéral-provincial-territorial de l'hygiène du milieu et du travail (2001)
³ Conseil canadien des ministres de l'environnement (1999)
⁴ CM = concentration maximale
⁵ CMA = concentration maximale acceptable
⁶ Les nombres de dépassements observés pour les échantillons de l'étude régionale (1999-2000) sont indiqués entre parenthèses.

Concentrations chimiques et critères de qualité

Les figures 27 à 39 présentent la distribution des paramètres géochimiques. Des points de grosseur proportionnelle à la concentration d'un élément chimique présent dans l'eau sont situés à l'emplacement des sites d'échantillonnage, permettant de visualiser la variabilité de la concentration d'un paramètre. Les sites d'échantillonnage où il y a eu dépassement des critères de qualité (normes et objectifs esthétiques) sont représentés avec une couleur différente. La carte géologique des unités rocheuses (fig. 4) est utilisée comme fond, sauf à la figure 39, où une version simplifiée de la carte des contextes géologiques (fig. 16) a été employée. On peut distinguer des tendances particulières pour certaines zones pour la majorité des paramètres.

Des facteurs géologiques semblent être déterminants pour les paramètres suivants : le pH (fig. 27), le sulfate (fig. 28), le manganèse (fig. 29), le fer (fig. 30), le baryum (fig. 31), le sulfure (fig. 32), la dureté totale (valeurs élevées; fig. 33) et le fluorure (fig. 34). Les valeurs élevées et les dépassements obtenus pour le fluorure, le baryum, le sulfure et le pH sont concentrés dans la partie est de la zone d'étude, soit la région de Sainte-Anne-des-Plaines. Ces valeurs sont associées aux dolomies de la Formation de Carillon, ainsi qu'aux calcaires et argilites des groupes de Chazy, Black River et Trenton. Des teneurs élevées en fluorure ont également été trouvées dans la partie ouest de la zone d'étude, la région de Chatham (dolomies de la Formation de Carillon et calcaires du Groupe de Chazy), et les collines d'Oka. Les teneurs élevées en fer et en manganèse sont distribuées sur l'ensemble de la région. Les sources pourraient être les minéraux présents dans les sédiments de surface ou dans les fractures des roches sédimentaires. Les valeurs élevées de dureté totale sont aussi distribuées sur l'ensemble de la région. Les sources de ces

valeurs élevées sont les minéraux carbonatés présents dans les sédiments de surface, et les roches sédimentaires (dolomies, calcaires).

Le niveau de confinement de l'aquifère à l'endroit de l'échantillonnage, certains facteurs hydrogéologiques et la présence d'eau saline expliqueraient la distribution des concentrations du sodium (fig. 35), du chlorure (fig. 36) et des matières dissoutes totales (MDT; fig. 37) (voir aussi Cloutier et al., 2001). Les faibles valeurs de dureté totale (fig. 33) pourraient quant à elles être expliquées par des échanges eau-roche. Les teneurs élevées en nitrate (fig. 38) proviennent des zones en conditions de nappe libre. Ce paramètre permet de détecter une contamination possible par les activités agricoles (utilisation de fertilisants) ou par des installations septiques.

Le taux d'adsorption du sodium (TAS) exprime l'activité relative des ions sodium dans les réactions d'échange avec les ions calcium et magnésium adsorbés des sols argileux, échange qui cause des dommages à la structure du sol étant donné que le rayon ionique du sodium est moindre que celui du calcium ou du magnésium. Le TAS sert donc à déterminer si l'eau est appropriée aux fins d'irrigation agricole. Une carte des valeurs de TAS (fig. 39) permet d'identifier les zones où le TAS est élevé et où l'irrigation agricole peut être problématique. La carte des conditions hydrogéologiques adaptée de Hamel (2002) (fig. 16) est utilisée comme fond. La valeur de TAS au-delà de laquelle l'eau est moins appropriée à l'irrigation est fonction des types de sol et de culture.

Des calculs statistiques (moyenne, médiane, minimum, maximum et écart type) ont été effectués pour les échantillons d'eau provenant de différents types d'unités hydrogéologiques (sédiments de surface, sédiments enfouis sous l'argile, et formations rocheuses) afin de distinguer les particularités hydrogéochimiques de chacun des types d'unités (tableau 9). La variabilité de la qualité de l'eau relativement aux différents paramètres peut ainsi être évaluée.

Tableau 7. Critères de qualité de l'eau pour les paramètres physicochimiques analysés en laboratoire ou calculés.

Paramètres physicochimiques (unité = mg/L lorsque non spécifiée)	Critères de qualité de l'eau (nombre de dépassements du critère ¹)					Nombre total de résultats d'analyses
	Norme ²	Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada ³		Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement ⁴		
		Eau potable, CM ⁵	Eau potable, CMA ⁶ /CMAP ⁷	Eau potable, OE ⁸	Irrigation	
Paramètres analysés en laboratoire						
Alcalinité totale (mg/L CaCO ₃)						142
Ammoniac						144
Arsenic	0,025 (0) ⁹	CMAP : 0,025 (0)		0,1 (0)	0,025 (0)	132
Baryum	1 (2)	1 (2)				146
Bore	5 (0)	CMAP : 5,0 (0)		0,5-6,0 (9)	5,0 (0)	145
Bromure						144
Cadmium	0,005 (0)	0,005 (0)		0,0051 (0)	0,08 (0)	133
Calcium					1 000 (0)	146
Carbone organique dissous						143
Chlorure			≤ 250 (21)	100-700 (36)		146
Chrome	0,05 (0)	0,05 (0)				146
Cyanure	0,2 (0)	0,2 (0)				111
Fer			≤ 0,3 (47)	5,0 (2)		143
Fluorure	1,5 (10)	1,5 (10)		1,0 (9)	1,0-2,0 (6)	142
Magnésium						146
Manganèse			≤ 0,05 (48)	0,2 (18)		146
Mercure	0,001 (0)	0,001 (0)			0,003 (0)	127
Nitrate + nitrite (en N)	10 (1)	10,0 (1)			22 (0)	144
Phosphore total						141
Plomb	0,01 (0)	0,01 (0)		0,2 (0)	0,1 (0)	132
Potassium						146
Sélénium	0,01 (0)	0,01 (0)		0,02-0,05 (0)	0,05 (0)	122
Silice						146
Sodium			≤ 200 (25)			146
Strontium						145
Sulfate			≤ 500 (2)		1 000 (1)	144
Sulfure			≤ 0,05 (28)			142
Uranium	0,02 (0)	0,1 (0)		0,01 (4)	0,2 (0)	115
Paramètres calculés						
Dureté totale ¹⁰ (mg/L CaCO ₃)						146
Bicarbonate, HCO ₃ (à partir de l'alcalinité totale) ¹¹						146
MDT (matières dissoutes totales) ¹²			≤ 500 (43)	500-3 500 (43)	3 000 (2)	146
TAS (sans unité) (taux d'adsorption du sodium) ¹³						146

¹ Lorsque le critère est un intervalle, le nombre de dépassements est calculé à partir de la limite inférieure de l'intervalle et constitue donc un nombre de dépassements maximal.

² Gouvernement du Québec (2001a)

³ Sous-comité fédéral-provincial sur l'eau potable du Comité fédéral-provincial-territorial de l'hygiène du milieu et du travail (2001)

⁴ Conseil canadien des ministres de l'environnement (1999)

⁵ CM = concentration maximale

⁶ CMA = concentration maximale acceptable

⁷ CMAP = concentration maximale acceptable provisoire

⁸ OE = objectif esthétique

⁹ Les nombres de dépassements observés pour les échantillons de l'étude régionale (1999-2000) sont indiqués entre parenthèses.

¹⁰ Les concentrations de Ca et Mg permettent de calculer la dureté totale. La dureté est un paramètre ne faisant pas l'objet de recommandations. On considère qu'une eau dont le degré de dureté se situe entre 80 et 100 mg/L est acceptable, qu'une eau de dureté entre 200 et 500 mg/L est de qualité médiocre mais peut être tolérée par les consommateurs, et qu'une eau de dureté supérieure à 500 mg/L est inacceptable pour la plupart des usages domestiques (Sous-comité fédéral-provincial sur l'eau potable et du Comité fédéral-provincial-territorial de l'hygiène du milieu et du travail, 2001).

¹¹ La concentration de HCO₃ en mg/L = 1,219 x alcalinité totale en CaCO₃.

¹² La concentration de MDT est calculée à partir de la somme des concentrations des ions et du SiO₂ (Hounslow, 1995) et n'est qu'une approximation des MDT mesurées en laboratoire (résidus d'évaporation à une température donnée); l'objectif de 500 doit donc n'être considéré qu'à titre indicatif.

¹³ Le TAS est calculé à partir des concentrations de Na, Ca et Mg (voir la figure 39).

Tableau 8. Critères de qualité de l'eau pour les paramètres physicochimiques mesurés au site d'échantillonnage.

Paramètres mesurés au site d'échantillonnage	Critères de qualité de l'eau (nombre de dépassements du critère)					Nombre total de résultats d'analyses
	Norme ¹	Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada ²		Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement ³		
	Eau potable, CM ⁴	Eau potable, CMA ⁵ /CMAP ⁶	Eau potable, OE ⁷	Irrigation	Abreuvement des animaux d'élevage	
Température (°C)			≤15 °C			129
pH (sans unité)	6,5-8,5 (11) ⁸		6,5-8,5 (11)			146
Conductivité spécifique à 25 °C (mS/cm ⁹)						146
Potentiel d'oxydoréduction Eh (mV ¹⁰)						123
Oxygène dissous (mg/L)						129

¹ Gouvernement du Québec (2001a)
² Sous-comité fédéral-provincial sur l'eau potable du Comité fédéral-provincial-territorial de l'hygiène du milieu et du travail (2001)
³ Conseil canadien des ministres de l'environnement (1999)
⁴ CM = concentration maximale
⁵ CMA = concentration maximale acceptable
⁶ CMAP = concentration maximale acceptable provisoire
⁷ OE = objectif esthétique
⁸ Les nombres de dépassements observés pour les échantillons de l'étude régionale (1999-2000) sont indiqués entre parenthèses.
⁹ mS/cm = millisiemens/cm
¹⁰ mV = millivolt

Types d'eau

Il est fort utile de classer les eaux souterraines par type sur la base de leur composition chimique. Une façon de visualiser la variation régionale des types d'eau, présentée à la figure 40, est de représenter la composition chimique (ions majeurs) de l'eau à l'aide de diagrammes radiaux placés aux sites d'échantillonnage et d'utiliser la carte de la géologie du substratum rocheux (fig. 4) comme fond. Les diagrammes radiaux permettent de visualiser la distribution des différents types d'eau grâce à l'orientation des pointes du polygone, selon le principe d'une rose des vents.

La grosseur du cercle employé dans chaque diagramme radial est proportionnelle à la racine carrée de la concentration de MDT (matières dissoutes totales). Ceci permet de distinguer la minéralisation des eaux et de comparer celles-ci, même lorsque leurs concentrations de MDT sont très variables. Les types d'eau différents sont identifiés à l'aide de couleurs distinctes. Les informations présentées sur la carte des diagrammes radiaux expriment une partie de l'information illustrée sur la carte des secteurs de qualité relative de l'eau souterraine (fig. 41; voir la section suivante).

Les types d'eau se distinguent par leurs constituants chimiques dominants : Ca, Mg, Na, K, Cl, SO₄ et HCO₃ (milliéquivalents). On parle par exemple d'eau « chlorurée sodique » ou « bicarbonatée calcique » pour des eaux dont

le chlorure et le sodium, ou le bicarbonate et le calcium, sont respectivement les ions majeurs. Les types d'eau fournissent des informations générales, des indices quant à la compréhension du contexte hydrogéologique et du système d'écoulement de l'eau souterraine.

Le type d'eau le plus important est Ca-HCO₃ (67 échantillons). Ces sites d'échantillonnage sont concentrés dans les zones en conditions de nappe libre (zones préférentielles de recharge). Le type d'eau Mg-HCO₃ (8 échantillons) est aussi associé aux zones préférentielles de recharge. Le second type d'eau en importance est Na-HCO₃ (42 échantillons). Ce type d'eau caractérise les zones en conditions de nappe captive, particulièrement la région de Sainte-Anne-des-Plaines. Ce type d'eau pourrait être le résultat de processus géochimiques (échange ionique, précipitation de minéraux). Le troisième type d'eau en importance est Na-Cl (25 échantillons). Ce type d'eau caractérise les vallées en conditions captives, particulièrement la région de Saint-Benoît. La source de cette salinité est le mélange, en différentes proportions, d'eau souterraine nouvellement rechargée avec de l'eau de la Mer de Champlain (Savard et al., 2004). On trouve aussi quelques sites à type d'eau Na-Cl dans des zones en conditions de nappe libre. Pour ces sites, une contamination anthropique, comme l'utilisation de sels de déglacage, pourrait être la cause des concentrations élevées de sodium et de chlorure.

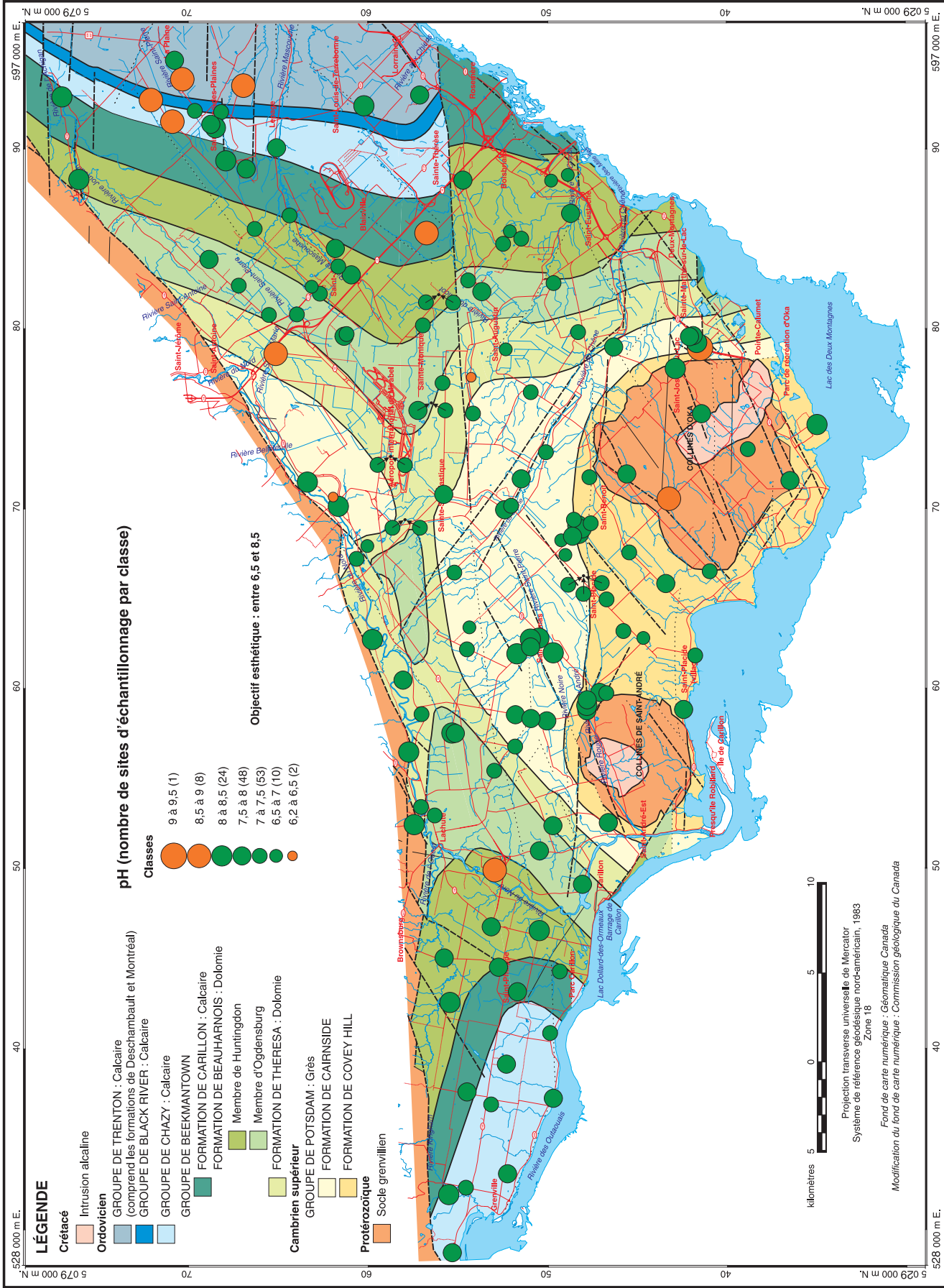


Figure 27. Distribution du pH. (Figure créée par É. Bourque et V. Cloutier.)

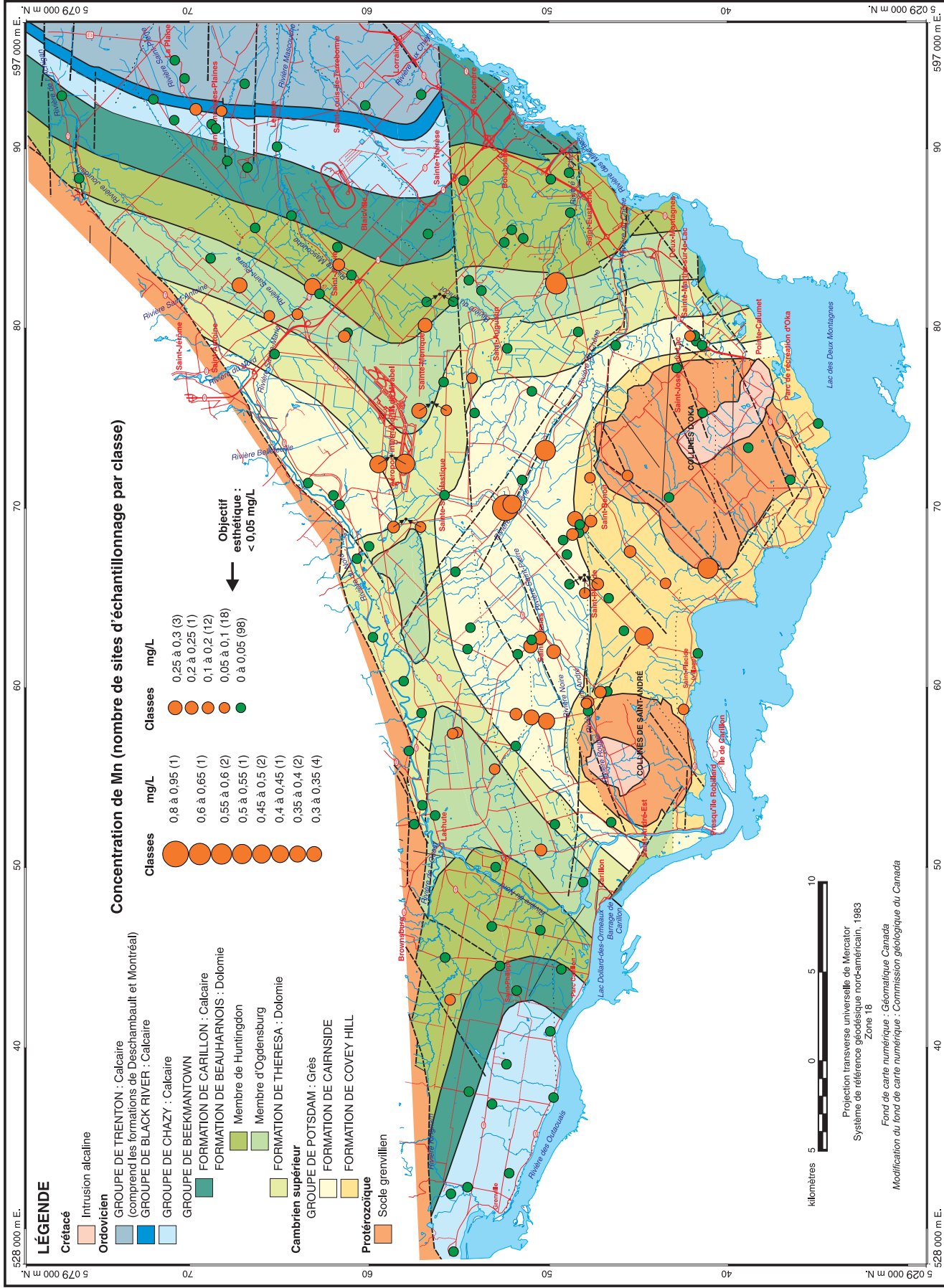


Figure 29. Concentration de manganèse, Mn. (Figure créée par É. Bourque et V. Cloutier.)

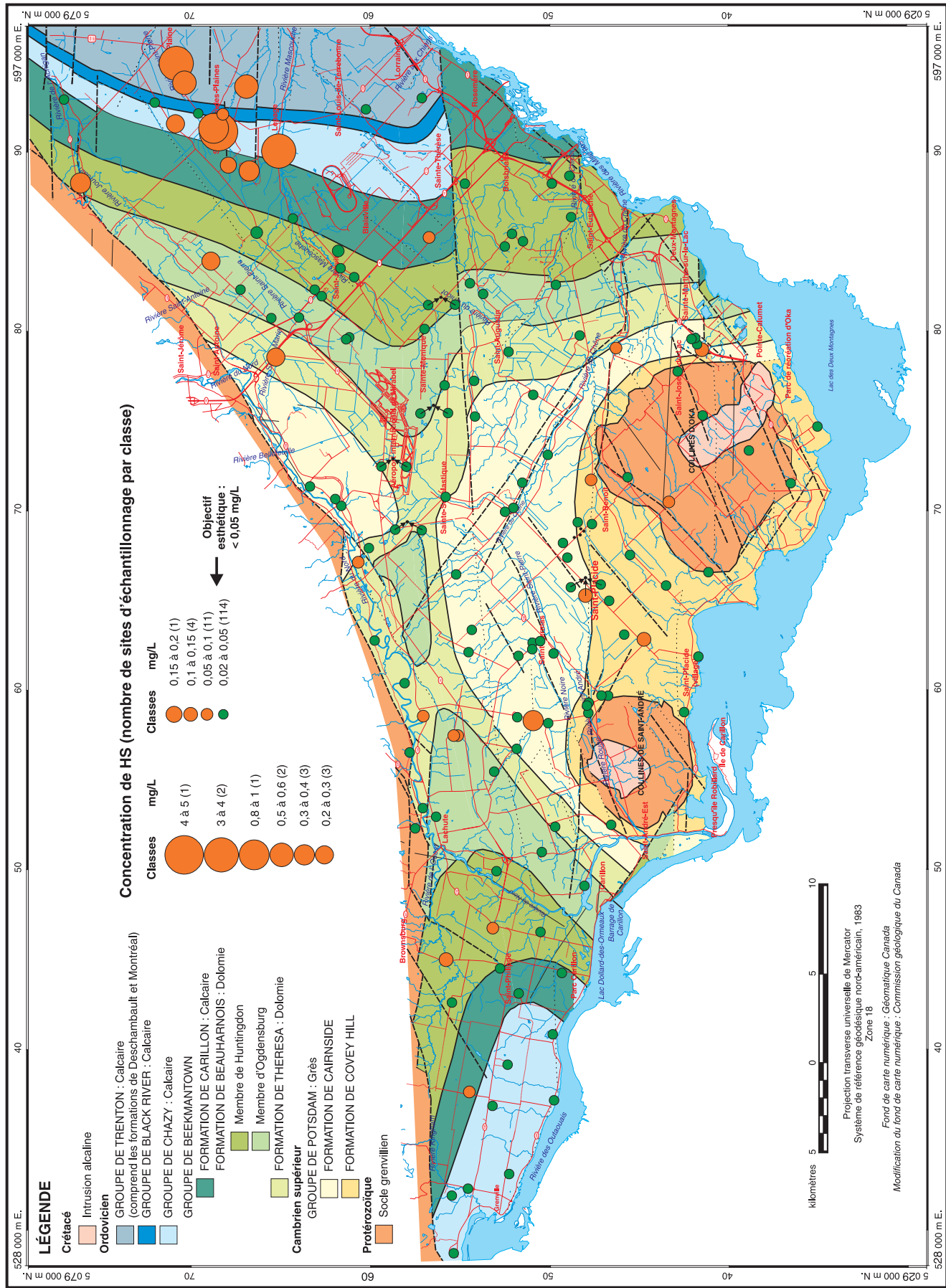


Figure 32. Concentration de sulfure, HS. (Figure créée par É. Bourque et V. Cloutier.)

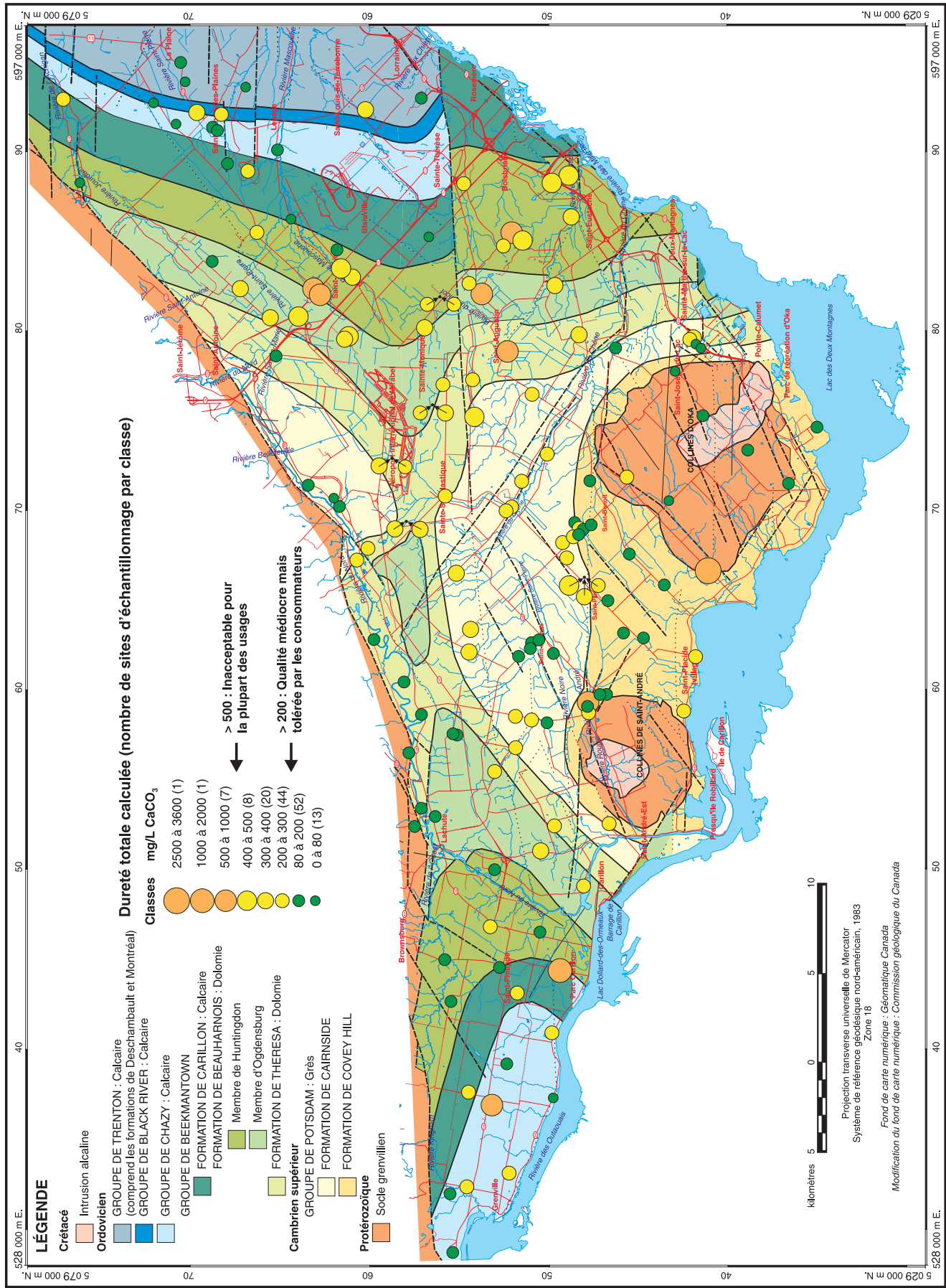


Figure 33. Distribution de la dureté totale. (Figure créée par É. Bourque et V. Cloutier.)

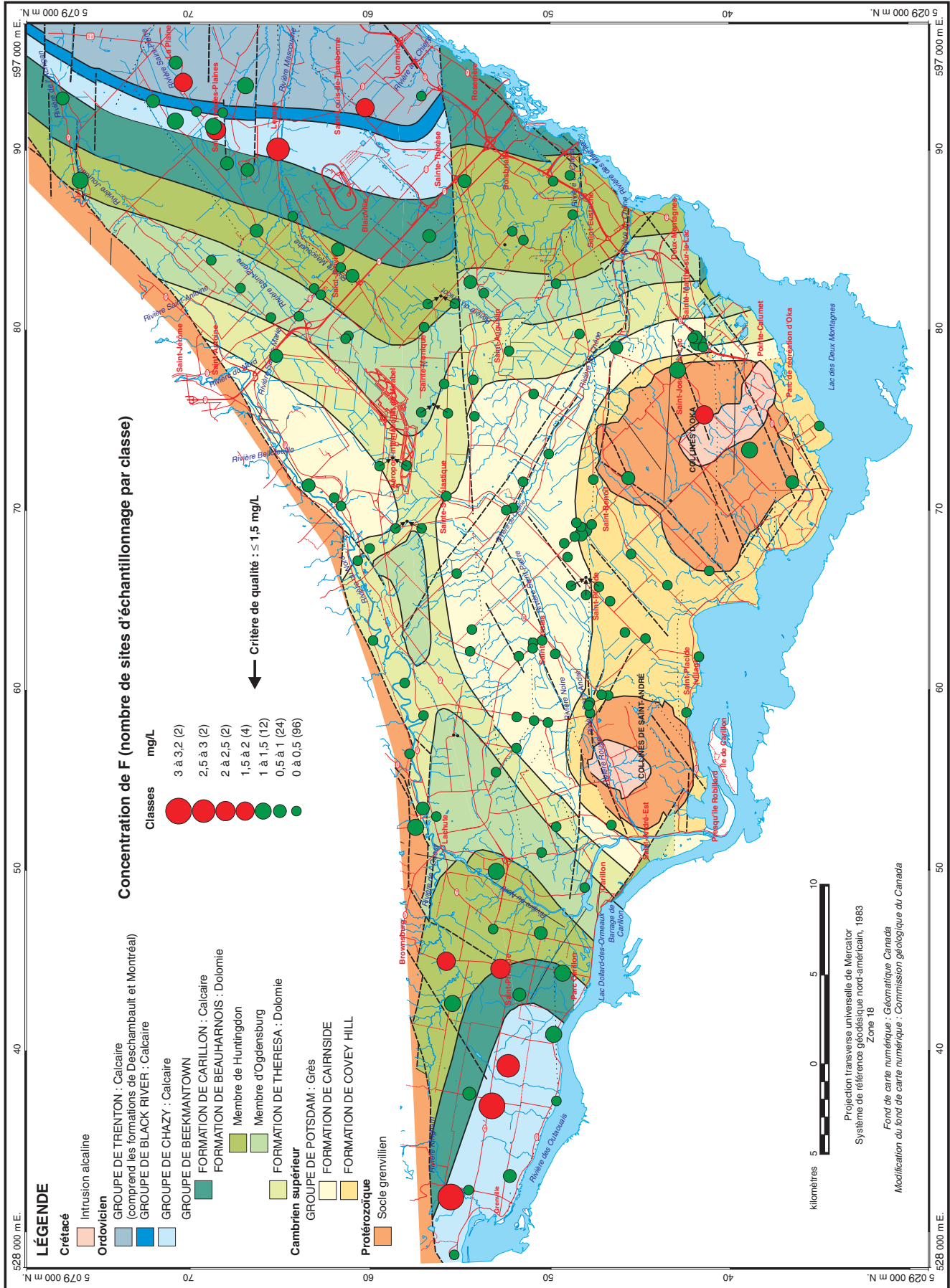


Figure 34. Concentration de fluorure, F. (Figure créée par É. Bourque et V. Cloutier.)

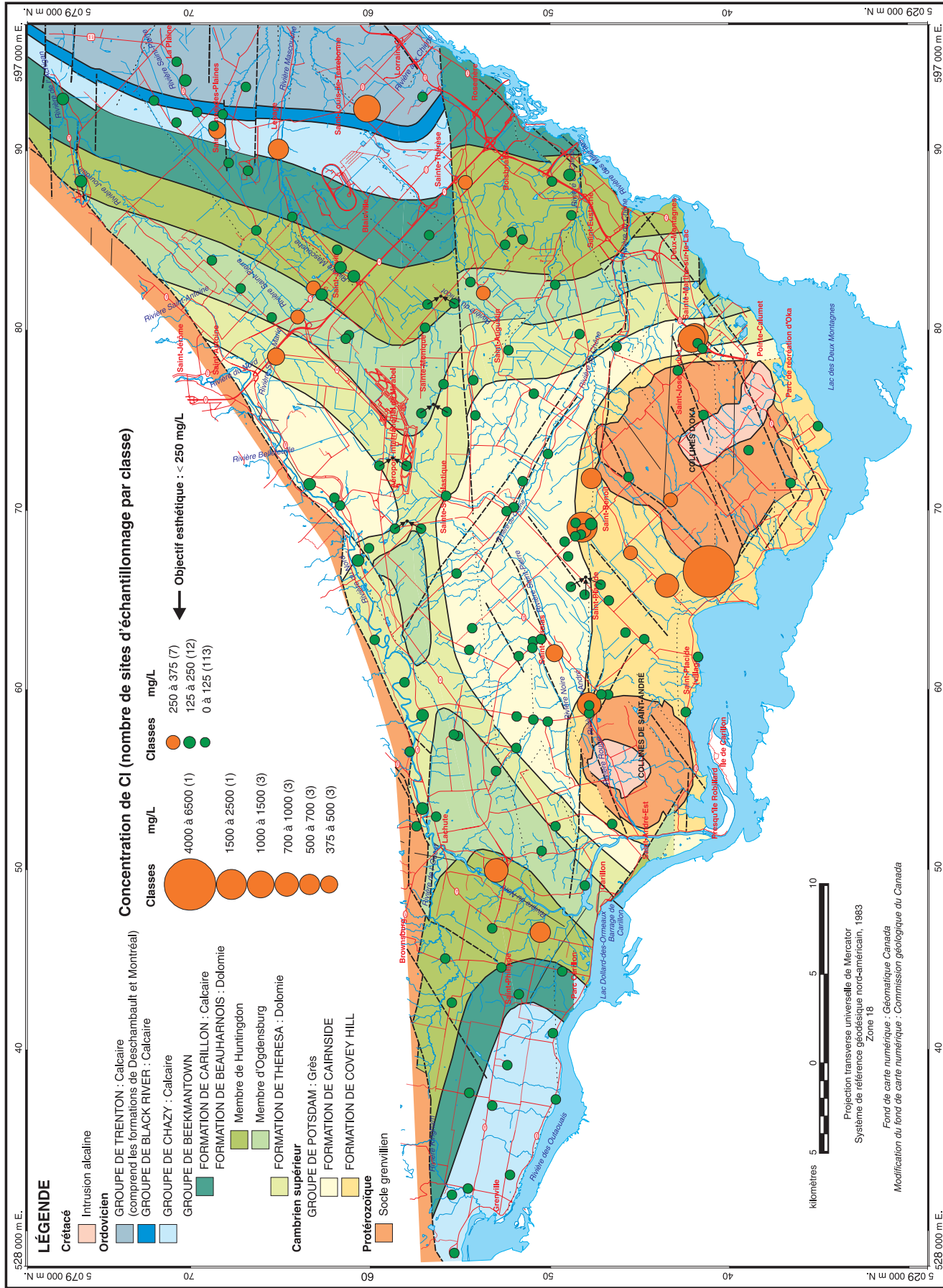


Figure 36. Concentration de chlorure, Cl. (Figure créée par É. Bourque et V. Cloutier.)

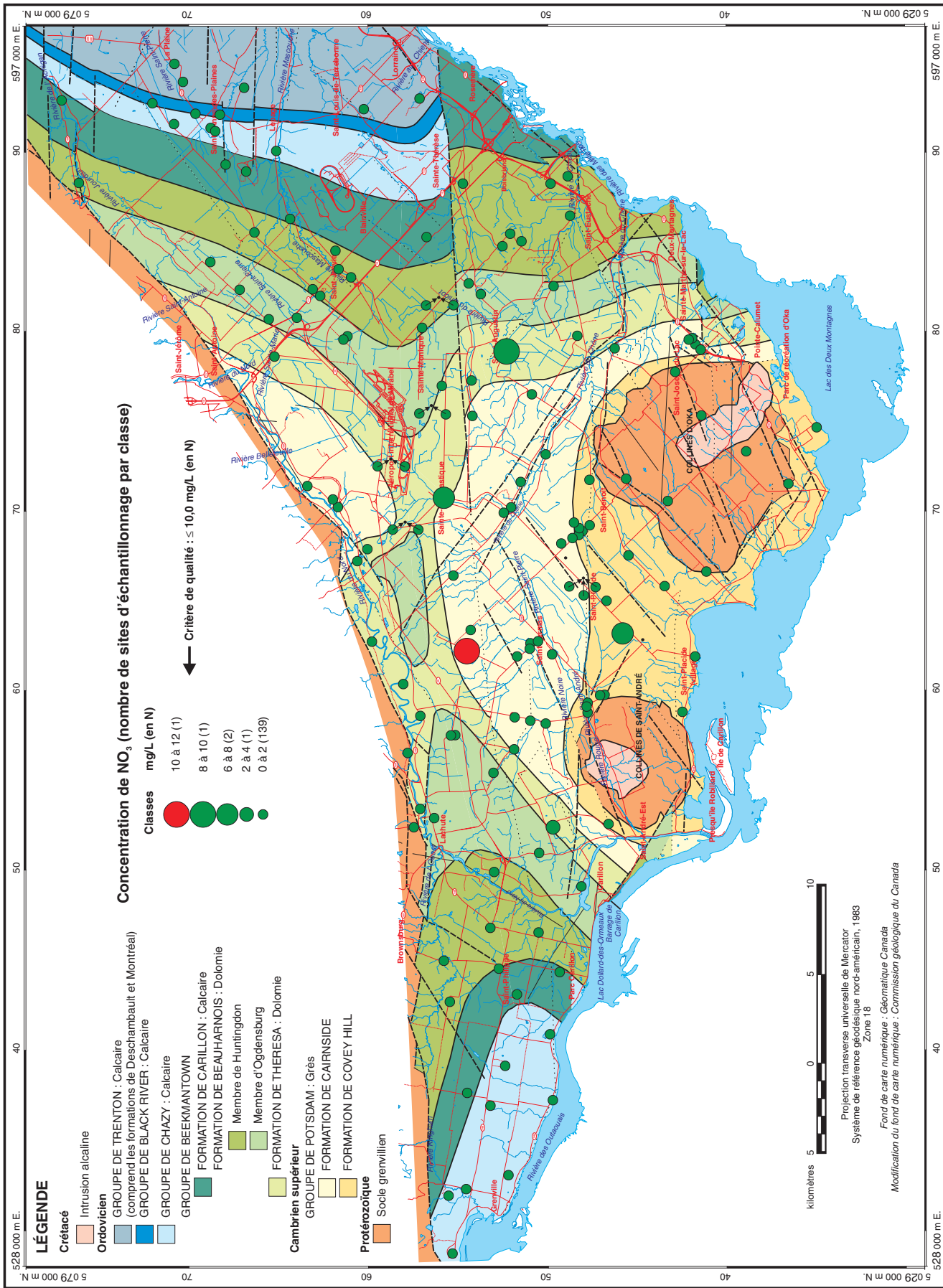


Figure 38. Concentration de nitrate, NO₃. (Figure créée par É. Bourque et V. Cloutier.)

Tableau 9. Statistiques physicochimiques des différents types d'unités hydrogéologiques.

Paramètres (unité = mg/L lorsque non spécifiée)	Sédiments de surface (7 sites)						Sédiments sous l'argile (13 sites)						Formations rocheuses et mixtes (124 sites)					
	Nombre de résultats	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum	Ecart type	Nombre de résultats	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum	Ecart type	Nombre de résultats	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum	Ecart type
Conductivité spécifique (mS/cm)	7	0,573	0,65	0,279	0,803	0,197	13	0,811	0,678	0,34	1,952	0,457	124	1,144	0,68	0,265	18,53	1,837
Couleur (UCV : unité de couleur vraie)	4	7	7	6	10	2	10	6	1	1	43	13	88	7	2	0	94	14
Potentiel d'oxydoréduction, Eh (mV)	5	+ 47	+ 46	- 30	+ 94	48	11	- 46	- 50	- 150	+ 159	82	105	- 15	+ 12	- 223	+ 196	104
Oxygène dissous	5	2,95	1,96	0,26	8,95	3,45	12	2,83	1,97	0,85	8,46	2,18	110	2,94	2,1	0,12	11,48	2,59
pH (sans unité)	7	7,48	7,50	7,14	8	0,28	13	8	8,01	6,3	9,26	0,76	124	7,6	7,59	6,4	8,85	0,46
Température (°C)	5	11,1	10,5	8,2	16,3	3,1	12	9,1	8,8	8,1	10,5	0,8	110	9,5	9,1	7,6	16,9	1,6
Alcalinité totale (mg/L CaCO ₃)	7	271	310	96	430	117	13	260	250	140	500	97	120	267	260	33	810	99
Ag	4	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0	12	0,0003	0,0003	0,0002	0,0003	0	114	0,0003	0,0003	0,0001	0,0023	0,0002
Al	7	0,011	0,007	0,007	0,02	0,006	13	0,012	0,01	0,007	0,03	0,009	122	0,024	0,008	0,007	0,7	0,068
As	4	0,001	0,001	0,001	0,001	0	12	0,001	0,001	0,001	0,002	0,0004	114	0,001	0,001	0,001	0,005	0,0004
B	7	0,006	0,002	0,002	0,02	0,007	13	0,015	0,1	0,02	0,57	0,17	123	0,159	0,07	0,002	1,40	0,22
Ba	7	0,07	0,06	0,01	0,22	0,07	13	0,15	0,14	0,008	0,32	0,08	124	0,198	0,14	0,001	1,1	0,2
Br	6	0,014	0,01	0,008	0,026	0,007	13	0,41	0,15	0,1	1,5	0,5	123	0,864	0,04	0,002	23	2,89
Ca	7	69,1	81	31	95	24,9	13	31,7	32	1,2	61	19,8	124	59,4	44,5	0,2	790	83,8
Cd	4	0,0012	0,0013	0,0006	0,0018	0,0005	13	0,0008	0,0006	0,0003	0,0014	0,0004	114	0,0012	0,0012	0,0003	0,005	0,001
Cl	7	12,6	6,1	0,6	49	16,9	13	110	35	2,5	430	137	124	192	37	0,1	6,500	639
CN	2	0,003	0,003	0,003	0,003	0	11	0,004	0,003	0,003	0,008	0,001	97	0,004	0,003	0,003	0,03	0,003
Cr	7	0,0017	0,002	0,0009	0,003	0,0008	13	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	124	0,002	0,001	0,001	0,03	0,003
Cu	7	0,001	0,001	0,001	0,002	0,0004	13	0,001	0,001	0,001	0,003	0,001	124	0,002	0,001	0,001	0,03	0,005
Carbone inorganique dissous	7	68	76	23	110	30	12	63	58	33	110	22	110	65	62	0	180	24
Carbone organique dissous	7	1,6	1,5	0,3	4	1,2	13	1,6	0,8	0,2	7,4	2,1	121	2,6	1,3	0,2	16,2	3
Dureté totale (mg/L CaCO ₃)	7	296	344	122	423	109	13	162	172	9	280	84	124	270	221	0,7	3,575	343
F	7	0,15	0,12	0,04	0,34	0,1	12	0,38	0,34	0,13	0,83	0,19	121	0,59	0,35	0,05	3,2	0,63
Fe	7	0,5197	0,34	0,0007	1,4	0,52	12	0,14	0,097	0,002	0,57	0,16	122	0,527	0,13	0,001	15	1,57
HCO ₃ (calculé)	7	330	378	117	524	143	13	317	305	171	610	119	124	322	305	40	987	121
Hg	2	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0	12	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0	111	0,0001	0,0001	0,0001	0,0003	0,00003
I	4	0,1	0,1	0,1	0,10	0	12	0,1	0,1	0,1	0,3	0,06	114	0,1	0,1	0,1	0,6	0,06
K	7	4,02	3,7	0,76	13	4,2	13	6,7	5,7	2,7	16,5	4,4	124	8,1	6	0,13	34	6,7
Li	5	0,004	0,004	0,001	0,009	0,003	11	0,01	0,01	0,001	0,02	0,006	112	0,017	0,01	0,001	0,4	0,04
MDT (calculées)	7	361	392	218	455	93	13	407	326	191	944	223	124	647	369	138	11,356	1,108
Mg	7	30,1	26	10,9	47	12,8	13	20,2	23	1,4	31	9,7	124	29,6	26	0,04	390	35,5
Mn	7	0,1485	0,13	0,0003	0,44	0,1678	13	0,16	0,05	0,0003	0,93	0,28	124	0,0703	0,017	0,0003	0,64	0,126
N total	7	0,7	0,2	0,1	3,7	1,3	13	0,39	0,31	0,10	1,25	0,32	120	0,79	0,35	0,03	11,7	1,58
Na	7	10	7	3	26	8	13	119	73	12,6	400	120	124	147	48	1,6	3,100	334
NH ₄	7	0,04	0,02	0,02	0,11	0,03	13	0,3	0,22	0,02	1,25	0,34	122	0,35	0,1	0,02	7	0,74
Ni	7	0,0029	0,002	0,0008	0,007	0,0023	13	0,001	0,001	0,001	0,006	0,001	122	0,002	0,001	0,001	0,02	0,003
NO ₃ (en N)	7	0,57	0,02	0,02	3,7	1,38	13	0,07	0,02	0,02	0,6	0,16	122	0,37	0,02	0,02	11,7	1,45
P total dissous	7	0,02	0,02	0,01	0,03	0,01	12	0,08	0,03	0,01	0,33	0,1	120	0,16	0,02	0,01	2,2	0,38
Pb	4	0,004	0,004	0,004	0,004	0	12	0,004	0,004	0,004	0,004	0	114	0,004	0,004	0,004	0,04	0,003
PO ₄	7	0,02	0,01	0,01	0,04	0,01	13	0,11	0,04	0,01	0,4	0,13	122	0,18	0,02	0,01	2,1	0,43
HS	7	0,03	0,02	0,02	0,05	0,01	12	0,05	0,03	0,02	0,2	0,05	121	0,16	0,02	0,02	4,7	0,62
Se	4	0,001	0,001	0,001	0,001	0	11	0,001	0,001	0,001	0,001	0	105	0,001	0,001	0,001	0,001	0
SiO ₂	7	13,2	11,9	9,3	20	3,6	13	13	11,5	9,3	18,1	3	124	12,9	12,2	5,5	24	3,7
SO ₄	7	41	49	15	75	21	13	17,5	16	0,5	43	11,8	122	61,8	33,5	0,5	1,200	128,4
Sr	7	0,18	0,14	0,06	0,42	0,12	12	0,52	0,33	0,09	1,7	0,49	124	1,948	0,5	0,005	29	4,46
TAS (calculé)	7	0,25	0,21	0,09	0,6	0,18	13	6,79	2,08	0,33	33,82	9,86	124	5,36	1,29	0,05	80,1	10,32
U	2	0,005	0,005	0,005	0,005	0	11	0,006	0,005	0,005	0,01	0,001	100	0,006	0,005	0,005	0,01	0,002
Zn	7	0,015	0,005	0,005	0,078	0,028	13	0,022	0,005	0,005	0,096	0,03	124	0,034	0,005	0,005	1,2	0,117

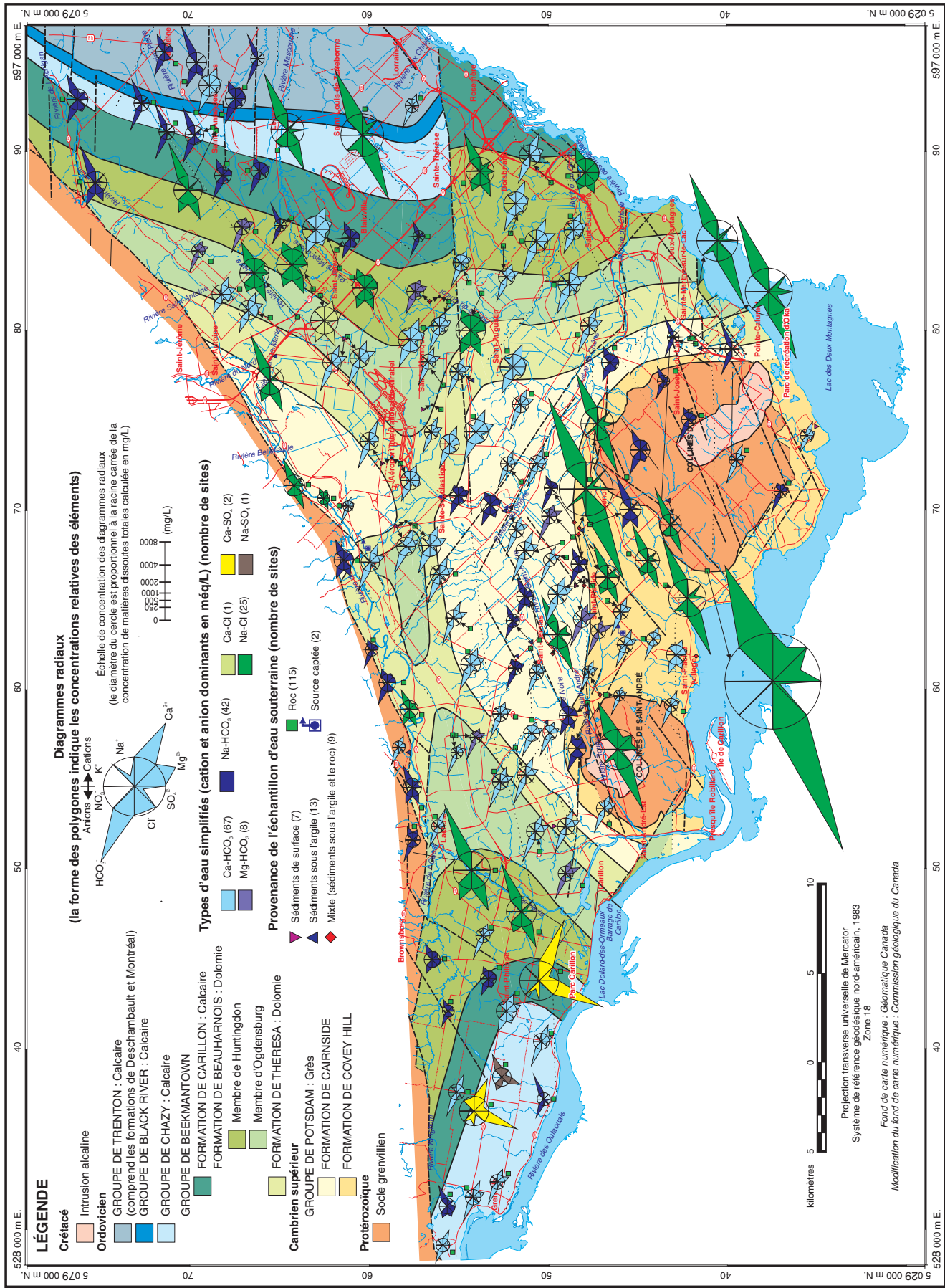


Figure 40. Diagrammes radiaux et types d'eau. (Figure créée par É. Bourque et V. Cloutier.)

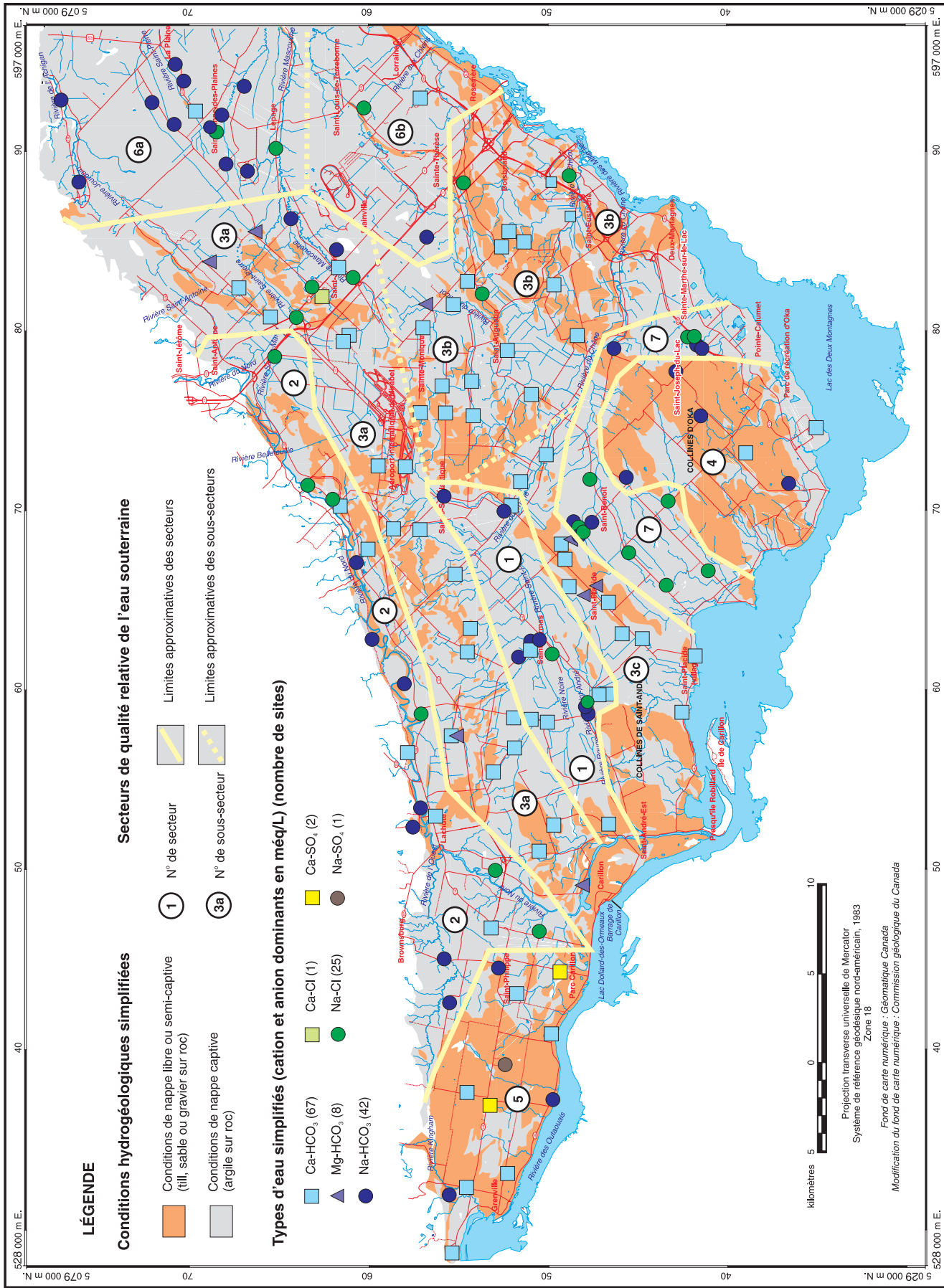


Figure 41. Secteurs de qualité relative de l'eau souterraine. (Figure créée par V. Cloutier et É. Bourque.)

Secteurs de qualité relative de l'eau souterraine

Classification par secteur

La région étudiée a été divisée en sept secteurs selon une échelle de qualité relative de l'eau souterraine : le secteur 1 (Saint-Hermas), le secteur 2 (rivière du Nord), le secteur 3 (constitué des sous-secteurs 3a, Lachute/Saint-Janvier; 3b, Sainte-Monique/Saint-Eustache; et 3c, côte Saint-Vincent), le secteur 4 (collines d'Oka), le secteur 5 (Grenville/Chatham), le secteur 6 (constitué des sous-secteurs 6a, Sainte-Anne-des-Plaines, et 6b, Sainte-Thérèse), et le secteur 7 (Saint-Benoît/Saint-Joseph-du-Lac). La distribution des secteurs est présentée à la figure 41. Une version simplifiée de la carte des contextes hydrogéologiques (fig. 16) est utilisée comme fond, et chaque site d'échantillonnage est représenté par son type d'eau respectif (voir la section « Types d'eau » ci-dessus). Afin de visualiser la variabilité régionale de la composition chimique de l'eau, les types d'eau simplifiés (cation et anion dominants) sont présentés à l'aide de symboles différents à la figure 41. Le tableau 10 présente pour chacun des secteurs une synthèse hydrogéochimique qui comprend le type d'eau dominant, le pourcentage de puits échantillonnés dépassant les recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada (Sous-comité fédéral-provincial sur l'eau potable du Comité fédéral-provincial-territorial de l'hygiène du milieu et du travail, 2001), les conditions hydrogéologiques, ainsi que les contrôles et processus hydrogéochimiques importants. Les étapes suivies pour définir les secteurs sont résumées ci-dessous.

En première étape, une méthode d'analyse par classification automatique hiérarchique (analyse de grappes (*cluster analysis*), méthode hiérarchique) a été utilisée pour classer les sites d'échantillonnage (Davis, 1986). Cette classification a été réalisée pour les échantillons d'eau souterraine par rapport à 14 paramètres chimiques (Ca, Mg, Na, K, Cl, SO_4 , HCO_3 , Fe, Mn, Br, Sr, F, Ba, HS). Cette méthode de classification groupe les échantillons selon un critère de similarité. Les résultats de cette analyse ont permis de diviser les sites d'échantillonnage en six groupes ayant des caractéristiques géochimiques distinctes. Géographiquement, la distribution de ces groupes suit les contextes hydrogéologiques. Les résultats de l'analyse par classification automatique hiérarchique, combinés aux informations tirées des cartes de distribution des paramètres géochimiques (fig. 27 à 39), de la carte des diagrammes radiaux et des types d'eau (fig. 40), de la carte d'épaisseur des sédiments (fig. 15) et de la carte des contextes hydrogéologiques (fig. 16), ont été utilisés pour établir la carte des secteurs de qualité relative de l'eau souterraine (fig. 41).

Les secteurs ont été classés selon une échelle de qualité relative de l'eau souterraine, allant de 1 (meilleure qualité) à 7 (qualité inférieure). Les caractéristiques hydrogéochimiques de chacun des sept secteurs, présentées au tableau 10, montrent qu'il y a des différences hydrogéochimiques

importantes entre tous les secteurs (fig. 41). Ce tableau fournit des informations sur la qualité générale de l'eau souterraine que l'on peut s'attendre à trouver dans un secteur donné. Il doit être utilisé à titre indicatif de la qualité de l'eau d'un secteur. En effet, les zones de transition entre les secteurs, la complexité des conditions hydrogéologiques, et la variété des unités géologiques et des effets locaux (contamination anthropique et profondeur des puits) font qu'il est toujours possible de rencontrer des exceptions dans chacun des secteurs. L'évaluation de la qualité de l'eau souterraine d'un site doit toujours être accompagnée de l'évaluation des conditions hydrogéologiques de ce site, de la vulnérabilité, et des contrôles géochimiques possibles. Les caractéristiques hydrogéochimiques importantes de chacun des secteurs sont résumées dans les paragraphes suivants.

Description des secteurs de qualité relative de l'eau

Le secteur 1 (Saint-Hermas), dont le type d'eau dominant est Na-Ca-Mg- HCO_3 (mixte- HCO_3), possède la meilleure qualité relative d'eau souterraine de la région. Aucun des puits échantillonnés n'a de dépassements de critères de qualité pour l'eau potable. Par contre, 63 % des sites d'échantillonnage dans ce secteur montrent des dépassements d'objectifs esthétiques pour le manganèse; les pourcentages de dépassement sont calculés en fonction du nombre de puits échantillonnés dans le secteur. Trente-huit pour cent (38 %) des échantillons de ce secteur ont une dureté totale supérieure à 200 mg/L, et 6 %, supérieure à 500 mg/L. Localement, des problèmes de salinité ont été observés dans ce secteur, causant des dépassements d'objectifs esthétiques pour le sodium (13 %) et le chlorure (13 %). Les sites d'échantillonnage ayant des dépassements pour ce secteur ou les secteurs suivants peuvent être visualisés sur les cartes de distribution des paramètres géochimiques (fig. 27 à 39). Le secteur de Saint-Hermas, dominé par des conditions de nappe captive, a une vulnérabilité faible et présente une bonne protection pour la qualité des eaux souterraines. En outre, ce secteur est dominé par une unité géologique peu réactive (grès de la Formation de Cairnside), limitant ainsi les processus d'interaction eau-roche pouvant dégrader la qualité de l'eau souterraine.

Le secteur 2 (rivière du Nord), de type d'eau dominant Na- HCO_3 , présente quelques problèmes de dépassements en fluorure, principalement dans la partie ouest de la vallée. Ce secteur est caractérisé par des dépassements d'objectifs esthétiques moyennement fréquents pour le fer (22 % des échantillons) et le sulfure (28 %). Localement, des problèmes de salinité ont été observés, causant des dépassements d'objectifs esthétiques pour le sodium et le chlorure. Cette vallée, bien que dominée par des conditions de nappe captive, présente des conditions de nappe libre locales et non continues. La vulnérabilité de l'eau souterraine pour ce secteur varie selon les conditions hydrogéologiques.

Tableau 10. Synthèse hydrogéochimique de chaque secteur (groupe de sites d'échantillonnage possédant des conditions hydrogéologiques et des compositions chimiques de l'eau souterraine qui sont similaires).

N° de secteur	Secteurs et sous-secteurs	Nombre de puits	Type d'eau dominant ⁷	Pourcentage des puits échantillonnés dépassant les recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada ²														
				Critères de qualité ³				Objectifs esthétiques ³							Dureté totale ⁶			
				Ba	F	NO ₃	Fe	Mn	Na	Cl	SO ₄	HS	pH ¹	MDT ⁵	> 200	> 500		
1	Saint-Hermas	16	Mixte-HCO ₃	1	1,5	10 (en N)	≤ 0,3	≤ 0,05	≤ 200	≤ 0,05	≤ 500	6 %	63 %	13 %	13 %	6 %	38 %	6 %
2	Rivière du Nord	18	Na-HCO ₃	6 %			22 %	6 %	17 %			28 %	17 %			17 %		
3	Lachute/Saint-Janvier (3a) Sainte-Monique/Saint-Eustache (3b) Côte Saint-Vincent (3c)	62 ⁸	Ca-Mg-HCO ₃	2 %		2 %	38 %	38 %	4 %	7 %		7 %	2 %	29 %		76 %		7 %
4	Collines d'Oka	6	Na-HCO ₃	17 %			17 %	17 %								17 %		
5	Grenville/Chatham	12	Ca-HCO ₃	33 %			25 %			17 %	8 %			25 %		42 %		17 %
6	Sainte-Anne-des-Plaines (6a) Sainte-Thérèse (6b)	17	Na-HCO ₃	6 % 24 %			24 %	12 %	41 %	18 %		71 %	29 %	47 %		29 %		
7	Saint-Benoît/Saint-Joseph-du-Lac	15	Na-Cl				47 %	53 %	73 %	60 %		27 %	13 %	67 %		20 %		7 %

N° de secteur	Secteurs et sous-secteurs	Conditions hydrogéologiques	Contrôles et processus hydrogéochimiques; autres commentaires
1	Saint-Hermas	<ul style="list-style-type: none"> 94 % des puits échantillonnés en conditions de nappe captive Conditions de nappe libre à proximité des collines de Saint-André 	<ul style="list-style-type: none"> 44 % des puits échantillonnés sont artésiens (puits jaillissants) 63 % des puits exploitent l'interface dépôts sous argile/roc fracturé Problèmes de salinité possibles dans le centre de la vallée
2	Rivière du Nord	<ul style="list-style-type: none"> 71 % des puits échantillonnés en conditions de nappe captive Conditions de nappe libre non continues le long de la vallée 	<ul style="list-style-type: none"> Problèmes de salinité possibles Possibilité de contamination anthropique
3	Lachute/Saint-Janvier (3a) Sainte-Monique/Saint-Eustache (3b) Côte Saint-Vincent (3c)	<ul style="list-style-type: none"> 60 % des puits échantillonnés en conditions de nappe libre Conditions de nappe captive locales et non continues Zones de recharge régionale et locale 	<ul style="list-style-type: none"> Seils déglaçants (Na, Cl) Fertilisants chimiques ou organiques (NO₃)
4	Collines d'Oka	<ul style="list-style-type: none"> 60 % des puits échantillonnés en conditions de nappe libre Conditions de nappe captive locales et non continues Zone de recharge 	<ul style="list-style-type: none"> 83 % des puits échantillonnés sont installés dans les roches de la Province de Grenville Problématique environnementale d'exposition au radon résidentiel⁹ Possibilité de contamination anthropique
5	Grenville/Chatham+	<ul style="list-style-type: none"> 73 % des puits échantillonnés en conditions de nappe libre Conditions de nappe captive locales et non continues Zone de recharge 	<ul style="list-style-type: none"> Influence géologique sur la qualité de l'eau souterraine : <ul style="list-style-type: none"> Formation de Carillon, Groupe de Chazy Concentrations élevées de F, Sr Possibilité de contamination anthropique
6	Sainte-Anne-des-Plaines (6a) Sainte-Thérèse (6b)	<ul style="list-style-type: none"> 100 % des puits échantillonnés en conditions de nappe captive Conditions de nappe libre locales et non continues (Blainville) Qualité de l'eau souterraine diminue avec la profondeur dans le roc (Sainte-Anne-des-Plaines) 	<ul style="list-style-type: none"> Influence géologique sur la qualité de l'eau souterraine : <ul style="list-style-type: none"> Formation de Carillon, groupes de Chazy, Black River et Trenton Concentrations élevées de F, Ba, HS, Sr, PO₄ Le sous-secteur de Sainte-Thérèse a peu de puits de particuliers Problèmes de salinité importants (mélange en différentes proportions d'eau souterraine, nouvellement rechargée, avec de l'eau de la Mer Champlain)
7	Saint-Benoît/Saint-Joseph-du-Lac	<ul style="list-style-type: none"> 100 % des puits échantillonnés en conditions de nappe captive 	

¹ Le type d'eau dominant est déterminé à partir des médianes des cations et anions majeurs pour chaque secteur (concentrations en méq/L). Les éléments majeurs représentant 20 % (méq/L) du total des cations et anions définissent le type d'eau (UNESCO, 1975).

² Sous-comité fédéral-provincial sur l'eau potable du Comité fédéral-provincial-territorial de l'hygiène du milieu et du travail (2001)

³ Unités en mg/L lorsque non spécifiées

⁴ Sans unité

⁵ MDT = matières dissoutes totales, calculées en mg/L

⁶ La dureté totale est la somme des concentrations de Ca²⁺ et Mg²⁺ exprimées en mg/L de CaCO₃. La dureté est un paramètre ne faisant pas l'objet de recommandations. On considère qu'une eau dont le degré de dureté se situe entre 80 et 100 mg/L est acceptable, qu'une eau de dureté entre 200 et 500 mg/L est de qualité médiocre mais peut être tolérée par les consommateurs, et qu'une eau de dureté supérieure à 500 mg/L est inacceptable pour la plupart des usages domestiques (Sous-comité fédéral-provincial-territorial de l'hygiène du milieu et du travail, 2001).

⁷ Un type d'eau est mixte lorsqu'il n'y a pas de cations dominants. Les valeurs (méq/L en %) des cations majeurs (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺) sont du même ordre.

⁸ Sept des 62 puits ont des niveaux d'échantillonnage multiples. Ces sept puits ne sont pas utilisés pour les calculs de pourcentages de ce secteur.

⁹ Référence sur l'exposition au radon résidentiel à Oka (Savard et al., 1998)

Le secteur 3 est le plus étendu des secteurs. Il a été divisé en trois sous-secteurs : les axes de Lachute/Saint-Janvier (3a), de Sainte-Monique/Saint-Eustache (3b), et de la côte Saint-Vincent (3c). Le type d'eau dominant, Ca-Mg-HCO₃, est représentatif d'une eau souterraine d'une zone de recharge. Cette information est confirmée par des conditions dominantes de nappe libre. Ce secteur est donc vulnérable à la contamination anthropique, telle que l'utilisation de sels déglaçants et de fertilisants chimiques et organiques. Les cas de contamination anthropique sont reliés à l'utilisation du territoire. Près de 40 % des puits échantillonnés montrent des dépassements d'objectifs esthétiques pour le fer et le manganèse, alors que 76 % des échantillons ont une dureté totale supérieure à 200 mg/L, et 9 %, supérieure à 500 mg/L.

Le secteur 4 (collines d'Oka), dont la majorité des puits échantillonnés sont situés dans les roches de la Province de Grenville, est de type d'eau dominant Na-HCO₃. La densité de puits échantillonnés est moins importante dans ce secteur, car le projet porte sur les aquifères sédimentaires rocheux fracturés. Un seul puits montre un dépassement en fluorure. Les collines d'Oka sont dominées par des conditions de nappe libre, avec présence locale de nappes captives. Ce secteur est donc vulnérable à la contamination anthropique. Une problématique environnementale importante pour le secteur des collines d'Oka est l'exposition domiciliaire au radon (Savard et al., 1998). Le radon est généré par la désintégration de l'uranium 238 présent dans les roches de l'intrusion alcaline d'âge Crétacé (fig. 4). Par contre, seulement une faible proportion — généralement de 0 à 36 % — du radon présent dans l'air des maisons est issue de l'eau souterraine (Hess et al., 1987). Aucun des puits échantillonnés dans le cadre du projet régional n'a été foré dans l'intrusion. Les échantillons d'eau souterraine de cinq puits forés dans les roches du socle grenvillien qui entourent l'intrusion ont des concentrations d'uranium inférieures à la limite de détection (< 0,005 mg/L). Aucune analyse du gaz radon n'a été effectuée dans l'eau souterraine du secteur dans le cadre de ce projet.

Le secteur 5 (Grenville/Chatham), situé à l'extrême ouest de la région étudiée, est caractérisé par le type d'eau dominant Ca-HCO₃. Ce secteur, dominé par des conditions de nappe libre, constitue une zone de recharge. Le problème de qualité le plus important pour ce secteur est relié aux concentrations élevées de fluorure. En effet, 33 % des puits échantillonnés ont des dépassements du critère de qualité pour le fluorure. Les unités géologiques (dolomies de la Formation de Carillon et calcaires du Groupe de Chazy) semblent influencer la géochimie des eaux souterraines. Des dépassements d'objectifs esthétiques moyennement fréquents pour le fer (25 %) et le sulfate (17 %) ont été dénombrés. Quarante-deux pour cent (42 %) des échantillons ont une dureté totale supérieure à 200 mg/L, et 17 %, supérieure à 500 mg/L. Des conditions de nappe libre dominant dans ce secteur, le rendant vulnérable à la contamination anthropique.

Le secteur 6, situé à l'extrême est de la région étudiée, est divisé en deux sous-secteurs : Sainte-Anne-des-Plaines (6a) et Sainte-Thérèse (6b). Le secteur 6 est dominé par le type d'eau Na-HCO₃. Des dépassements des critères de qualité pour le fluorure (24 %) et le baryum (6 %) y ont été notés. On y compte aussi un bon nombre de dépassements d'objectifs esthétiques : 71 % pour le sulfure, 47 % pour les MDT (matières dissoutes totales), 41 % pour le sodium, 29 % pour le pH, et 24 % pour le fer. Vingt-neuf pour cent (29 %) des échantillons ont une dureté totale supérieure à 200 mg/L. Les dolomies de la Formation de Carillon, ainsi que les calcaires et les argilites des groupes de Chazy, Black River et Trenton, ont une influence sur la qualité des eaux souterraines de ce secteur. Des processus d'échange ionique Na-Ca sont probablement la cause des concentrations élevées de sodium et faibles de calcium. L'aquifère rocheux de la plaine argileuse du sous-secteur de Sainte-Anne-des-Plaines (6a) est en conditions de nappe captive. La vulnérabilité de ce secteur est donc faible. Enfin, les résultats sur deux puits échantillonnés à différentes profondeurs dans le cadre de ce projet, et des études effectuées pour la municipalité de Sainte-Anne-des-Plaines, ont montré que la qualité des eaux souterraines de ce secteur diminue rapidement avec la profondeur (augmentation de la salinité et des concentrations de sulfure). Il est donc possible d'envisager que le pompage excessif d'un puits puisse causer une dégradation de la qualité de l'eau par la venue d'eau de moins bonne qualité provenant de zones plus profondes. Le sous-secteur de Sainte-Thérèse (6b) compte peu de puits de particuliers par comparaison avec les autres secteurs; il n'était donc pas un secteur prioritaire pour le projet de caractérisation. Ce sous-secteur ayant des similarités avec celui de Sainte-Anne-des-Plaines (conditions de nappe captive et même unités géologiques), il est possible d'estimer que la qualité de l'eau souterraine y serait similaire.

Enfin, le secteur 7 (Saint-Benoît/Saint-Joseph-du-Lac), dont le type d'eau dominant est Na-Cl, affiche la moins bonne qualité relative d'eau souterraine de la région. Le problème de qualité le plus important pour ce secteur est la salinité. La valeur médiane de conductivité spécifique des échantillons de ce secteur est de 1,4 mS/cm. Cette valeur, la plus élevée des sept secteurs, s'explique par des concentrations élevées de sodium (73 % de dépassements) et de chlorure (60 % de dépassements). La source de cette salinité est le mélange, en différentes proportions, d'eau souterraine nouvellement rechargée avec de l'eau de l'ancienne Mer de Champlain. Pour le puits le plus salin échantillonné, la conductivité spécifique de 18,5 mS/cm rend l'eau souterraine inapte à la consommation. Le secteur 7 présente des dépassements pour d'autres d'objectifs esthétiques, dont les matières dissoutes totales (MDT; 67 %), le manganèse (53 %), le fer (47 %) et le sulfure (27 %). Vingt pour cent (20 %) des échantillons ont une dureté totale supérieure à 200 mg/L, et 7 %, supérieure à 500 mg/L. La distribution des secteurs ayant une eau souterraine à salinité plus élevée que la moyenne est difficile à prévoir. Il est donc possible d'envisager que le

pompage excessif d'un puits puisse causer une dégradation de la qualité de l'eau par la venue d'eau plus salée provenant de zones adjacentes.

Implications pour la consommation de l'eau

La qualité de l'eau souterraine peut être qualifiée de bonne sur l'ensemble des territoires groupés des quatre MRC impliquées puisqu'elle répond toujours, à l'exception de 12 échantillons sur 146, aux exigences des critères de qualité établis pour protéger la santé des consommateurs. Mais lorsque l'on considère les objectifs esthétiques, la qualité de l'eau sur le territoire étudié est plutôt variable. En effet, 99 des 146 échantillons ne répondent pas aux objectifs esthétiques pour au moins l'un des paramètres suivants: Fe, Mn, HS, SO₄, Na, Cl, MDT (matières dissoutes totales) et pH. De plus, 72 des 146 échantillons ont une dureté supérieure à 200 mg/L, et 9 des 146 échantillons ont une dureté supérieure à 500 mg/L. On considère que lorsque sa dureté est supérieure à 200 mg/L, l'eau est de qualité médiocre mais peut être tolérée par les consommateurs, et que lorsque sa dureté est supérieure à 500 mg/L, l'eau est inacceptable pour la plupart des usages domestiques. Toutefois, tous les dépassements de critères esthétiques mentionnés ici sont remédiables par divers traitements de l'eau disponibles commercialement.

Un problème de salinité de l'eau a été identifié dans le secteur de Saint-Benoît tout particulièrement; il fait l'objet d'une étude locale (Savard et al., 2002b). Pour ce qui est des critères de qualité de l'eau pour les paramètres microbiologiques, 12 échantillons sur 80 montrent des dépassements en coliformes totaux. Les causes de ces dépassements ne sont pas identifiées, mais elles pourraient être reliées à des situations locales, par exemple à la contamination à partir de fosses septiques.

Les représentations cartographiques de différents paramètres géochimiques (fig. 27-39) démontrent que la qualité naturelle des eaux souterraines varie en fonction des

contextes géologiques et hydrogéologiques. Les résultats documentés dans ce rapport présentent un portrait régional de la qualité de l'eau, qui sera nécessaire au suivi ultérieur de cette qualité et à la détection d'une éventuelle détérioration.

ÉVALUATION DE LA RECHARGE

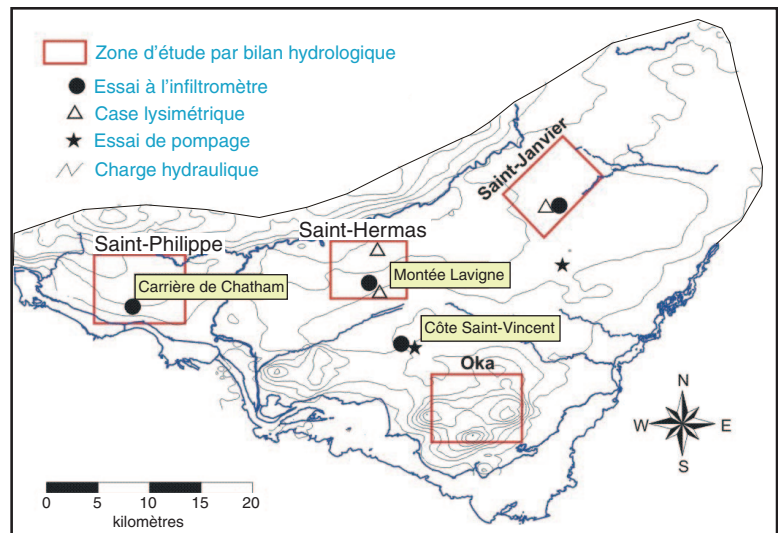
Infiltration des précipitations

Les dépôts marins d'argile peu perméable couvrent approximativement 73 % du territoire et réduisent l'infiltration directe des précipitations vers l'aquifère régional. Les couches superficielles de sable drainent l'eau infiltrée localement vers les dépressions topographiques, où l'eau souterraine est habituellement évacuée du système d'écoulement souterrain par suintement vers les cours d'eau. L'infiltration des précipitations vers l'aquifère régional s'opère par les zones de recharge que constituent les fenêtres de matériaux plus grossiers ou d'affleurements rocheux dans la couche d'argile.

La recharge du système aquifère du sud-ouest du Québec a été estimée à deux échelles (Hamel, 2002). À l'échelle locale, l'étude des bilans hydrologiques, la prise de mesures par lysimètres et le suivi des niveaux d'eau de puits d'observation ont été utilisés dans les zones de recharge (fig. 42).

- *Bilans hydrologiques.* Les bilans hydrologiques ont été réalisés sur quatre zones de recharge à l'aide de l'équation de la conservation de masse, selon laquelle l'infiltration est égale à la somme de la précipitation, du ruissellement de surface, de l'évapotranspiration et du changement dans l'emmagasinement. Le ruissellement et le changement de l'emmagasinement ont été calculés selon la méthode SCS (Steenhuis et al., 1995), tandis que l'évapotranspiration a été calculée par la méthode de Thornthwaite. Ces méthodes nécessitent l'estimation de paramètres tels que la pente du terrain, le type de sol, le type de culture, l'utilisation du sol et la qualité

Figure 42. Distribution des sites d'étude de la recharge. (Figure modifiée de Hamel, 2002).



du drainage. La recharge moyenne annuelle estimée est de 186 mm à Saint-Hermas, de 183 mm à Saint-Janvier, de 152 mm dans les collines d'Oka, et de 195 mm à Saint-Philippe.

- *Mesures directes à travers la matrice de till à l'aide de lysimètres.* Les quatre mêmes sites ont été instrumentés à l'aide de cases lysimétriques. Ces cases consistaient en une plaque métallique rectangulaire de 1 m par 0,5 m installée sous la zone racinaire à une profondeur allant jusqu'à 0,8 m. Les quantités d'eau infiltrée ont été notées périodiquement sur une période d'un an. Les résultats montrent une infiltration annuelle de 219 mm à Saint-Hermas et de 194 mm à Saint-Janvier.
- *Interprétation de la variation des niveaux d'eau dans des puits d'observation.* Les fluctuations des niveaux d'eau dans six puits en zone de nappe libre ont été interprétées pour la période allant de 1975 à 2000. La recharge en hauteur d'eau a été obtenue en multipliant les fluctuations des niveaux d'eau par la porosité des sédiments ou des roches fracturées. La recharge annuelle ainsi obtenue varie entre 90 et 327 mm.

À l'échelle régionale, l'approche de Darcy a été appliquée. La distribution de la recharge a été évaluée en tenant compte des flux estimés à travers les dépôts quaternaires. Le calcul de ces flux tient compte de la carte des types de sol, de la conductivité hydraulique des dépôts quaternaires et de la carte des gradients hydrauliques verticaux (fig. 43), soit la différence entre le niveau d'eau dans les dépôts et dans l'aquifère régional. Les résultats permettent de définir les zones d'infiltration et d'émergence ainsi que de quantifier la recharge. La distribution régionale de la recharge est montrée à la figure 44.

La valeur de la recharge moyenne estimée par l'approche de Darcy est de 45 mm/a, et au total $61,1 \times 10^6 \text{ m}^3$ d'eau s'infiltrent annuellement dans la région (tableau 11). En pourcentage, 68 % du territoire contribue à la recharge, 8,6 % du territoire montre un gradient hydraulique nul, signifiant qu'aucune recharge n'y prend place, et 23,3 % de la superficie représente les zones de résurgence de la nappe. Les zones où les roches sédimentaires et le till affleurent, ou sont enfouis à faible profondeur, contribuent à 80 % de la recharge en termes de volume; ce sont les principales zones de recharge du territoire (fig. 45).

Résurgence — débit de base des rivières

Les formes de résurgence sont l'extraction humaine de l'eau souterraine et le débit de base des rivières, c'est-à-dire l'écoulement de l'eau souterraine à la base des rivières. Dans la présente section, la discussion portera seulement sur le débit de base des rivières, puisque l'utilisation anthropique de l'eau est traitée dans la partie II.

Dans la région étudiée, le débit de base des rivières est constitué de deux composantes : celle de l'aquifère régional rocheux et celle des formations aquifères superficielles. La

contribution relative de ces deux composantes ne peut être évaluée avec précision puisqu'elle dépend de la succession hydrostratigraphique et des contacts hydrauliques entre les diverses unités d'une localité donnée. S'ajoutent à cela les fluctuations naturelles saisonnières du taux de résurgence, et les modifications de la direction et du taux de l'écoulement souterrain provoquées par diverses opérations humaines comme le drainage des sols agricoles, le pompage dans les carrières, l'alimentation des réseaux d'aqueducs, etc.

On détermine le débit de base et le ruissellement de surface par l'étude des hydrogrammes des rivières. Au total, 14 stations de jaugeage mesurent le débit des rivières dans la région (fig. 3). La séparation des hydrogrammes a été effectuée par la méthode du minimum local (Hamel, 2002). Aucun changement de l'emménagement de l'eau souterraine n'a été considéré lors du calcul. Au tableau 12, les valeurs moyennes annuelles de l'évapotranspiration, du débit des rivières, du débit de base, et du ruissellement de surface sont comparées aux valeurs de précipitation moyenne annuelle pour les années visées. À des fins de comparaison, les résultats en mm/a sont normalisés pour la superficie du bassin versant en amont de la station de jaugeage.

Le tableau 12 montre que la précipitation annuelle sur le territoire s'évacue à environ 40 % par évaporation ou par transpiration par les plantes, et que le reste contribue au débit moyen des rivières. Le tableau montre également que quelque 36 % du débit moyen des rivières provient de l'écoulement souterrain (aquifères de surface et rocheux), tandis que 64 % de ce débit moyen représente le ruissellement de surface au sens strict.

Recharge du système aquifère régional et bilan hydrologique

À l'échelle locale, la recharge annuelle du système aquifère rocheux varie de 90 à 327 mm, selon l'estimation obtenue par l'étude des bilans hydrologiques, la prise de mesures par lysimètres et le suivi des niveaux d'eau dans des puits d'observation. À l'échelle régionale, la méthode du bilan global suggère une recharge annuelle entre 84 et 376 mm, et celle de Darcy suggère un taux entre 8 et 301 mm selon le type de dépôts quaternaires en surface (tableau 11), les taux de recharge les plus faibles étant associés aux argiles. Avec cette dernière approche, la moyenne de la recharge répartie sur l'ensemble du territoire se situe à environ 45 mm/a.

La précipitation annuelle moyenne sur le territoire étudié s'élève à 1047 mm. De ce total, environ 40 % s'évapore ou est utilisé par les plantes, et 60 % s'écoule par les rivières (38 % provenant du ruissellement de surface, et 22 % issu des aquifères granulaires de surface et de l'aquifère régional rocheux). Puisque nous avons évalué la recharge annuelle du système aquifère rocheux à environ 45 mm, nous estimons que 4 % de la précipitation annuelle s'infiltrer vers l'aquifère régional.

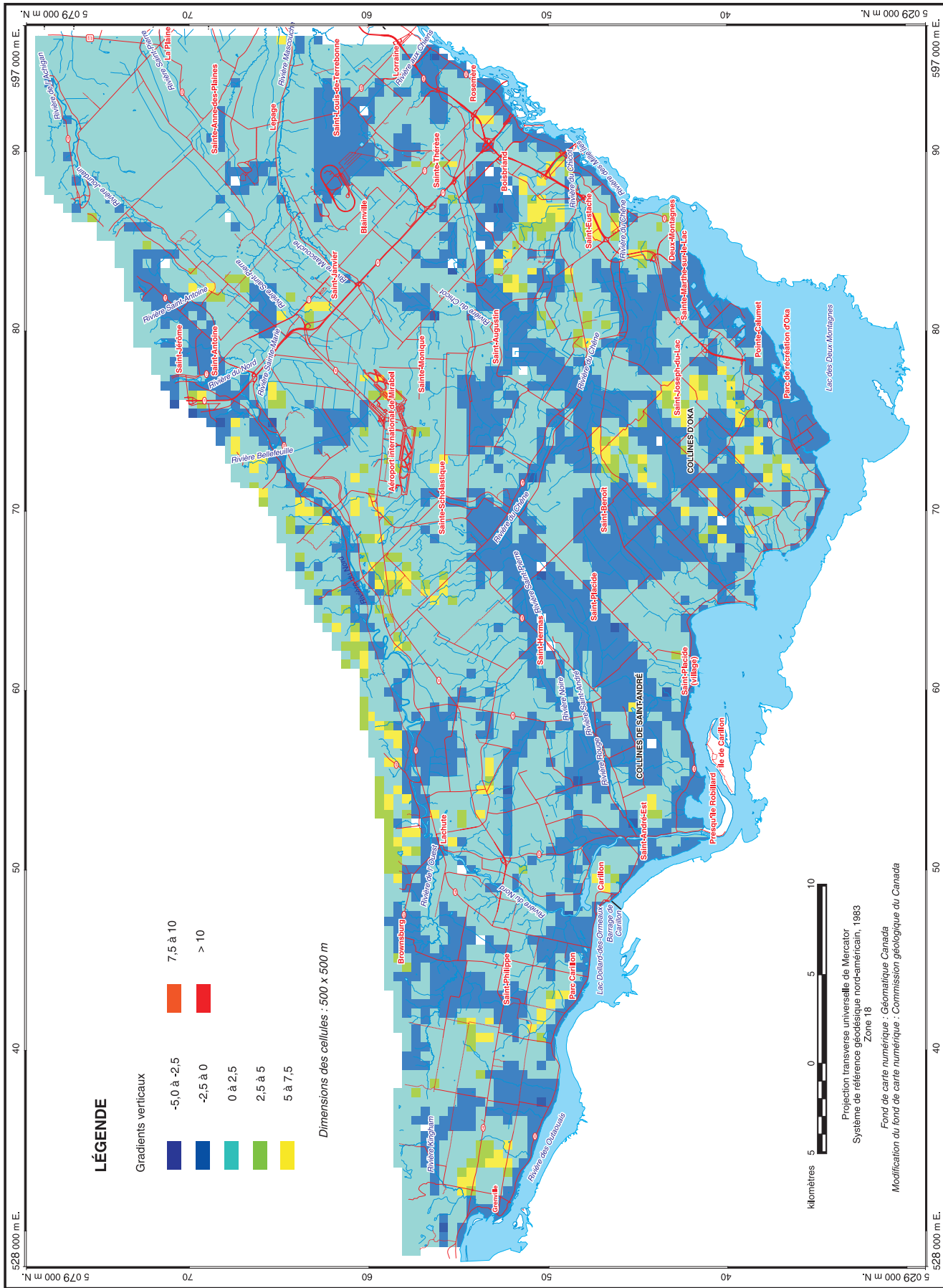


Figure 43. Gradients hydrauliques verticaux. (Figure créée par A. Hamel.)

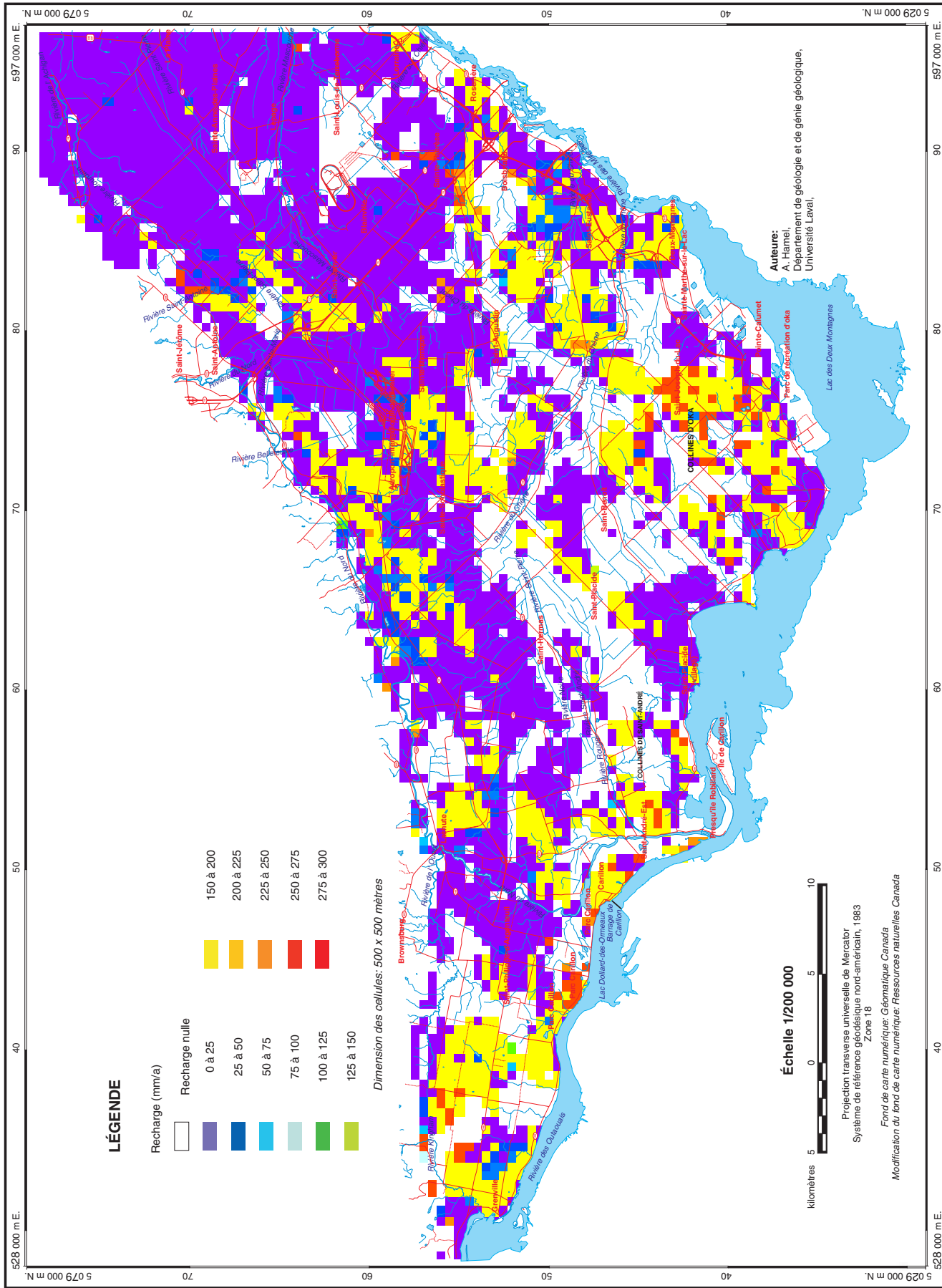


Figure 44. Distribution de la recharge de l'aquifère rocheux (approche de Darcy). (Figure créée par A. Hamel.)

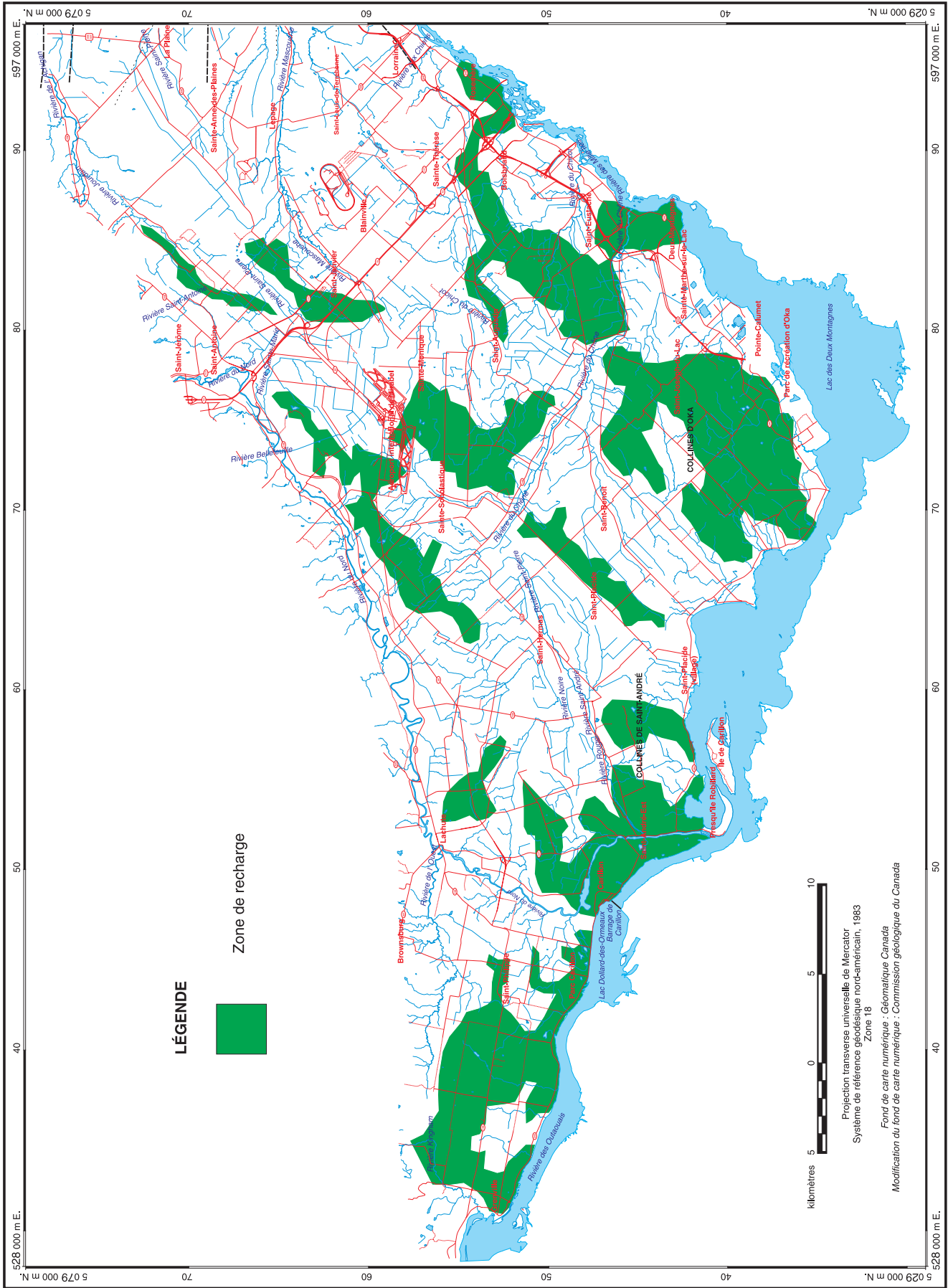


Figure 45. Principales zones de recharge de l'aquifère rocheux. (Figure créée par D. Paradis à partir de données fournies par le Département de géologie et de génie géologique de l'Université Laval.)

Tableau 11. Sommaire des données sur la recharge régionale obtenues par l'approche de Darcy.

Type de matériau à la surface	Superficie affleurante (km ²)				Recharge		%
	totale	gradient +	gradient -	gradient 0	moyenne (mm)	totale (x 10 ⁶ m ³)	
Roches	0,5	0,5	0	0	300	0,15	0,2
Gravier	26,5	19,3	5,6	1,6	301	5,809	9,5
Sable	19,7	6,0	3,2	10,5	241	1,446	2,4
Till	322,7	245,3	32,3	45,3	198	48,569	79,5
Argile	972,0	641,5	272,2	58,3	8	5,132	8,4
Total	1 341,6	912,6	313,3	115,7	45,5	61,107	100

Tableau 12. Valeurs annuelles moyennes de l'évapotranspiration, du débit des rivières, du débit de base et du ruissellement de surface pour les stations de jaugeage, et valeurs de précipitation moyenne annuelle pour les années correspondantes.

Station ¹	Période (années)	Superficie ² (m ²)	Précipitation (mm)	EVT ³ (mm)	Valeurs annuelles moyennes					
					Débit		Débit de base		Ruissellement	
					(mm)	(% ⁴)	(mm)	(% ⁵)	(mm)	(% ⁵)
Bassin versant de la rivière du Chêne										
02OA025 à Sainte-Scholastique	1972-88	28 337 733	1 067	408,0	659,0	61,8	237,0	36,0	422,0	64,0
02OA028 au sud de Belle-Rivière	1972-85	54 175 078	1 087,9	358,8	729,1	67,0	267,4	36,7	461,7	63,3
02OA078 à Belle-Rivière	1973-75	41 316 124	1 191	488,0	703,0	59,0	293,0	41,7	410,0	58,3
02OA079 La Petite Rivière	1973	80 516 136	1 204	502,0	702,0	58,3	157,0	22,4	545,0	77,6
02OA080 près de La Fresnière	1972-79	194 137 100	1 114	487,0	627,0	56,3	197,0	31,4	430,0	68,6
02OA081 près de l'embouchure	1973-76	211 548 941	1 116	472,0	644,0	57,7	239,0	37,1	405,0	62,9
02OA092 à l'embouchure	1980-84	208 923 093	1 054	554,0	500,0	47,4	217,0	43,4	283,0	56,6
Moyennes pour le bassin versant			1 119	467,1	652,0	58,2	229,6	35,5	422,4	64,5
Bassin versant de la rivière du Nord										
02LC008 à Saint-Jérôme	1971-96	1,235 x 10 ⁹	1 040	396,0	644,0	61,9	268,0	41,6	376,0	58,4
02LC020 à Lachute	1977-78	1,647 x 10 ⁹	1 058	406,0	652,0	61,6	297,0	45,5	355,0	54,4
02LC022 à Saint-André-Est	1972-78	2,065 x 10 ⁹	1 146	423,0	723,0	63,1	316,0	43,7	407,0	56,3
Moyennes pour le bassin versant			1 081	408,3	673,0	62,2	293,7	43,6	379,3	56,4
Bassin versant de la rivière Mascouche										
02OA030 près de Saint-Janvier	1972-89	20 803 941	1 103	295,0	808,0	73,2	252,0	31,2	556,0	68,8
02OA083 Rivière Mascouche	1974-75	282 693 582	993	251,0	742,0	74,7	234,0	31,5	508,0	68,5
Moyennes pour le bassin versant			1 048	273,0	775,0	74,0	243,0	31,4	532,0	68,6
Bassin versant de la rivière du Chicot										
02OA031 près de Sainte-Monique	1973-74	9 355 603	1 167	384,0	783,0	67,1	202,0	25,8	581,0	74,2
Bassin versant de la rivière aux Chiens										
02OA032 près de Boisbriand	1986-90	13 627 722	1 121	570,0	551,0	49,1	227,0	41,2	324,0	58,8
Moyennes globales			1 104	428,2	676,2	61,3	243,1	36,4	433,1	63,6

¹ L'emplacement des stations de jaugeage est montré à la figure 3.
² Superficie du bassin versant en amont de la station de jaugeage
³ EVT = évapotranspiration
⁴ Pourcentage de la précipitation annuelle moyenne
⁵ Pourcentage du débit annuel moyen

VULNÉRABILITÉ DU SYSTÈME AQUIFÈRE RÉGIONAL À LA CONTAMINATION

Approche : méthode DRASTIC

Plusieurs méthodes existent pour évaluer la vulnérabilité, la plus répandue étant la méthode DRASTIC (Aller et al., 1987; Murat, 2000). Cette méthode est présentée comme norme pour la caractérisation des systèmes

aquifères par le gouvernement du Québec (2001b, c). Il faut mentionner ici que les zones délimitées sur la base des indices obtenus par la méthode DRASTIC peuvent servir de guide pour la protection de l'aquifère, mais que les limites entre ces zones sont artificielles et imprécises, et n'ont donc aucune validité à l'échelle locale. Dans le cadre du projet « Caractérisation hydrogéologique régionale et intégrée du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec », il a été décidé d'appliquer la méthode DRASTIC afin d'assurer la cohérence des produits de la caractérisation hydrogéologique régionale avec ceux de la cartographie

systematique du territoire québécois prévue par le ministère de l'Environnement du Québec. Cette approche permet de présenter une vue régionale des zones à protéger contre la contamination provenant de la surface du sol, et ce, dans l'optique de l'aménagement du territoire.

La méthode DRASTIC se base sur l'évaluation de sept paramètres, auxquels sont attribuées des cotes de 1 à 10, qui sont pondérées de 1 à 5 en fonction de leur importance pour l'évaluation de la vulnérabilité :

- D : profondeur à la nappe; son poids est de 5 et les cotes qui lui sont attribuées correspondent à des valeurs de référence allant de 0 à 30 m;
- R : recharge; son poids est de 4 et les cotes qui lui sont attribuées correspondent à des valeurs de référence allant de 0 à 250 mm/a;
- A : type d'aquifère; son poids est de 3 et les cotes qui lui sont attribuées sont fonction de terminologies spécifiques;
- S : type de sol; son poids est de 2 et les cotes qui lui sont attribuées sont fonction de terminologies spécifiques;
- T : topographie; son poids est de 1 et les cotes qui lui sont attribuées sont fonction du pourcentage de pente (0 à 18 %);
- I : influence de la zone vadose; son poids est de 5 et les cotes qui lui sont attribuées sont fonction de terminologies spécifiques; et
- C : conductivité hydraulique; son poids est de 3 et les cotes qui lui sont attribuées correspondent à des valeurs de référence allant de 1 à 81 m/d.

Chacun de ces paramètres peut donc prendre des valeurs de 1 à 10, correspondant à des cotes assignées soit à des intervalles de valeurs numériques (dans le cas des paramètres suivants : profondeur à la nappe, recharge, topographie et conductivité hydraulique) ou à des types de sol, de sédiments ou de roche (dans le cas des autres paramètres, c'est-à-dire type d'aquifère, type de sol et influence de la zone vadose). Plus la cote est élevée, plus les conditions favorisent une vulnérabilité élevée.

La méthode produit pour chaque fragment de territoire analysé un indice de vulnérabilité (I_{DRASTIC}) obtenu en additionnant les contributions respectives de chacun des sept paramètres, la contribution de chaque paramètre étant d'abord calculée en multipliant son poids par la cote applicable à ce paramètre pour le fragment de territoire visé :

$$I_{\text{DRASTIC}} = D_w D_r + R_w R_r + A_w A_r + S_w S_r + T_w T_r + I_w I_r + C_w C_r \quad (1)$$

où $D_w, R_w, A_w, S_w, T_w, I_w$ et C_w désignent respectivement le poids affecté à chaque paramètre et $D_r, R_r, A_r, S_r, T_r, I_r$ et C_r désignent respectivement la cote attribuée à chacun des paramètres pour le fragment de territoire visé. Puisque les poids affectés aux paramètres sont des constantes, on peut remplacer leurs symboles par des valeurs numériques dans cette équation :

$$I_{\text{DRASTIC}} = 5D_r + 4R_r + 3A_r + 2S_r + 1T_r + 5I_r + 3C_r \quad (2)$$

Pour cette étude, les zones où l'aquifère est captif n'ont pas été évaluées. En effet, ces zones sont considérées très peu vulnérables puisqu'une couverture de plus de 3 m d'argile permet a priori une protection efficace de l'aquifère. Cependant, dans les zones où l'argile n'est pas recouverte par d'autres sédiments, elle peut présenter des altérations pouvant atteindre une profondeur de 3 m, ce qui la rend alors perméable (Desaulniers et Cherry, 1989). En conséquence, l'évaluation de la vulnérabilité s'est limitée aux zones où l'aquifère est à nappe libre ou semi-captive. Le découpage des zones à évaluer a été fait en conservant une épaisseur limite d'argile de 3 m, sauf dans les zones où l'argile est possiblement altérée, pour lesquelles une limite de 6 m a été utilisée. Le découpage des zones à évaluer s'est aussi basé sur la connaissance de l'hydrostratigraphie (p. ex. mise en évidence des terrasses) et sur les cartes des formations superficielles et de l'épaisseur des sédiments (fig. 13, 15; voir la section « Géologie du territoire » plus haut).

Chacun des sept paramètres évalués est représenté sur une carte matricielle, à cellules de 500 m sur 500 m, où sont illustrées les cotes applicables à chacune des cellules pour ce paramètre; les cotes varient de 1 à 10 en ordre croissant de vulnérabilité (fig. 46-52). Les dimensions des cellules sont imposées par le degré de précision des données. Bien que l'intérêt premier ait été de produire une carte de vulnérabilité combinant tous les paramètres, il n'en demeure pas moins que les cartes des paramètres individuels constituent elles-mêmes des sources d'information quant aux caractéristiques du territoire étudié.

Carte de vulnérabilité DRASTIC

L'ensemble de l'évaluation par la méthode DRASTIC a produit une carte où figurent sporadiquement des zones modérément à non vulnérables, c'est-à-dire dont l'indice de vulnérabilité est inférieur à 100 (fig. 53). Cette valeur limite est prescrite par les règles d'évaluation qui prévalent au Québec (Gouvernement du Québec, 2001a, b, c). Les cellules évaluées comme étant peu vulnérables sont situées là où l'argile est mince; elles s'agglomèrent en domaines uniformes là où s'étendent les séquences argileuses plus épaisses, considérées non vulnérables (et donc non évaluées par la méthode). Environ 65 % de la superficie du territoire étudié se trouve dans des zones naturellement protégées, considérées comme modérément ou non vulnérables. Les zones à vulnérabilité élevée s'étendent sur le reste du territoire (35 %), y compris les zones de recharge où il y a présence de sable-gravier (ou de till remanié) près de la surface, ou de roches fracturées affleurantes ou enfouies à faible profondeur.

On remarque que l'ensemble de la carte montre un découpage d'indices de vulnérabilité assez fin pour une carte d'échelle régionale. Ainsi, même si les limites des domaines

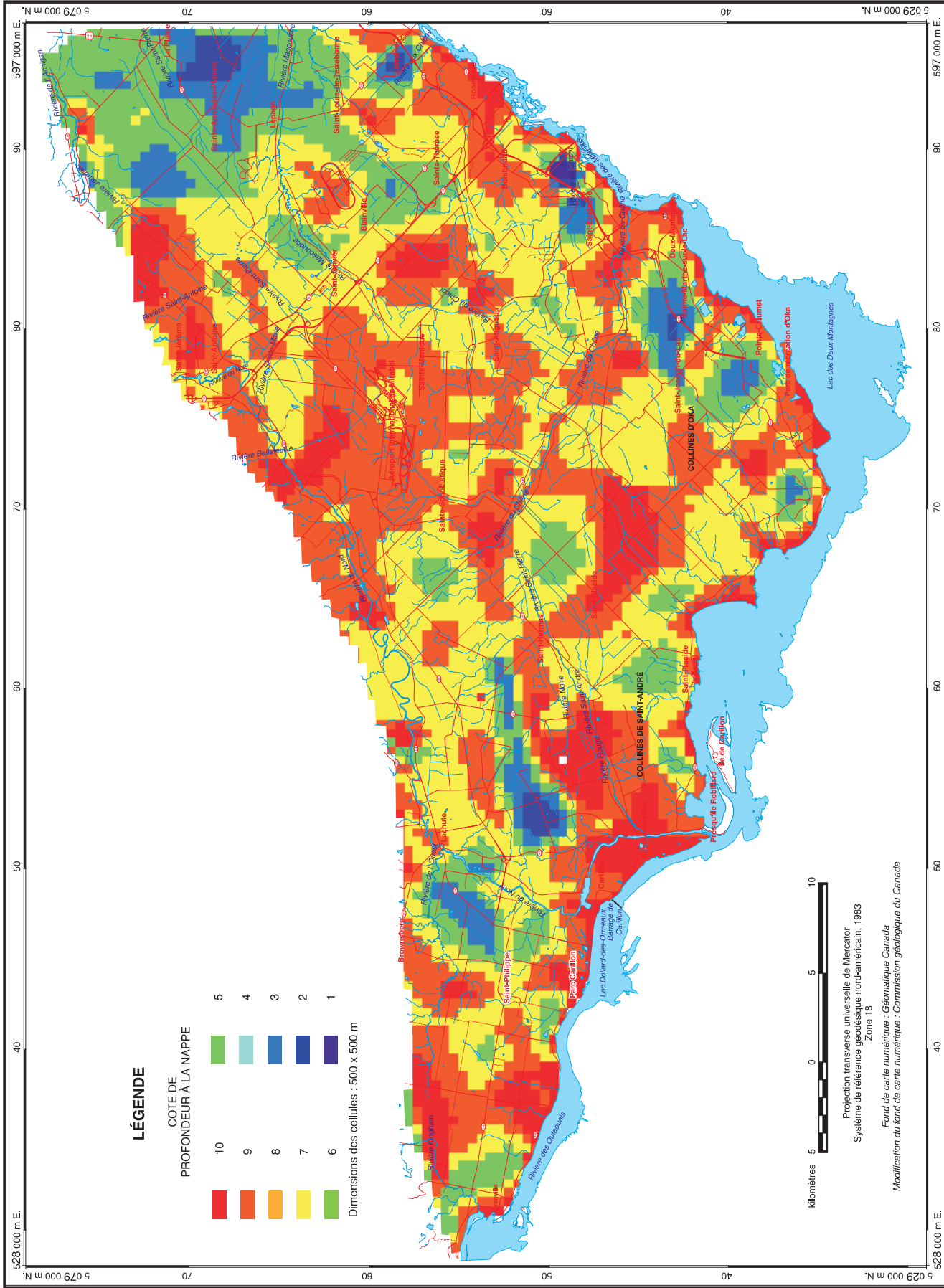


Figure 46. Méthode DRASTIC : profondeur à la nappe. (Figure créée par V. Murat à partir de données fournies par la Commission géologique du Canada.)

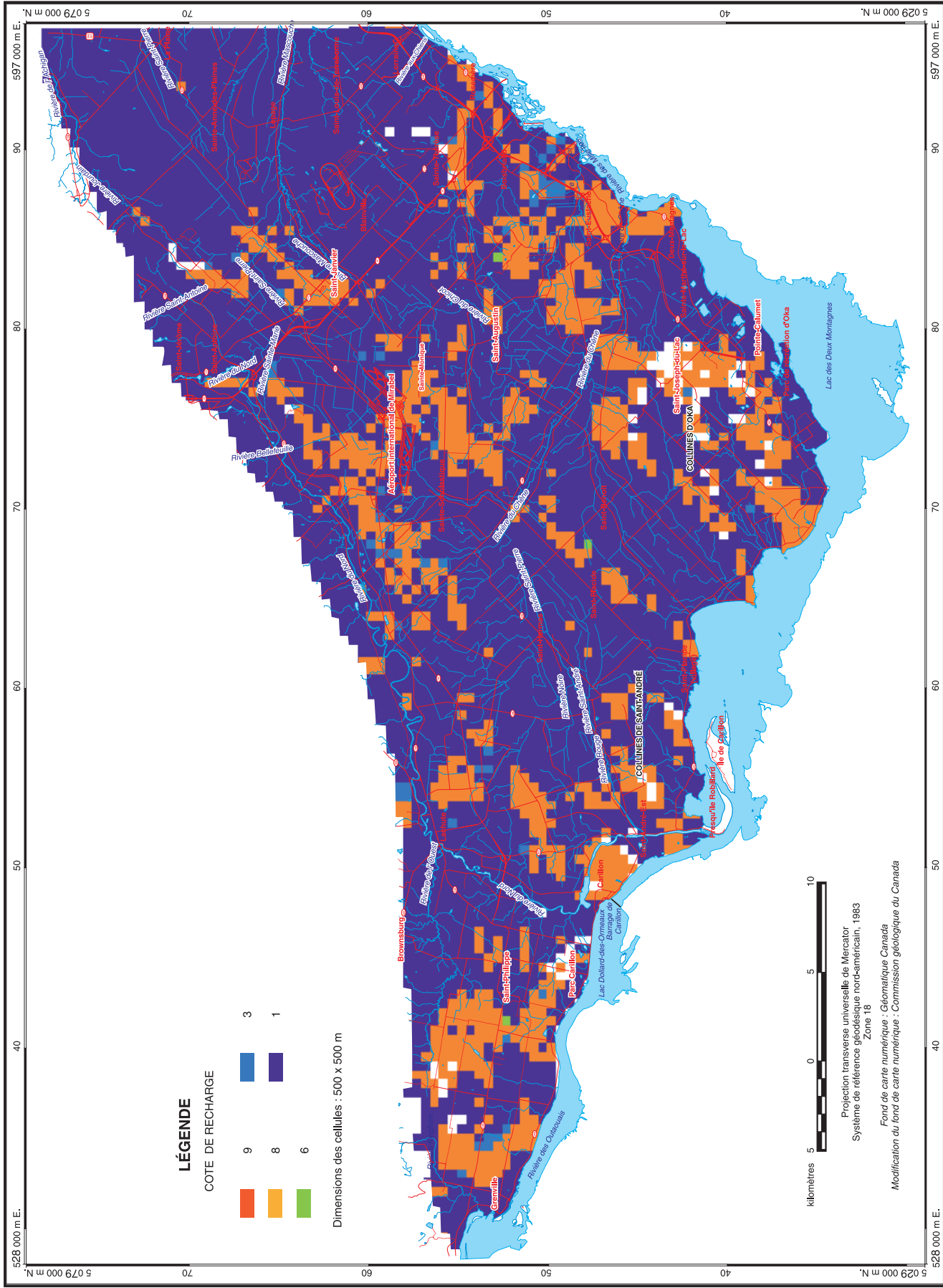


Figure 47. Méthode DRASTIC : recharge. (Figure créée par V. Murat à partir de données fournies par le Département de géologie et de génie géologique de l'Université Laval.)

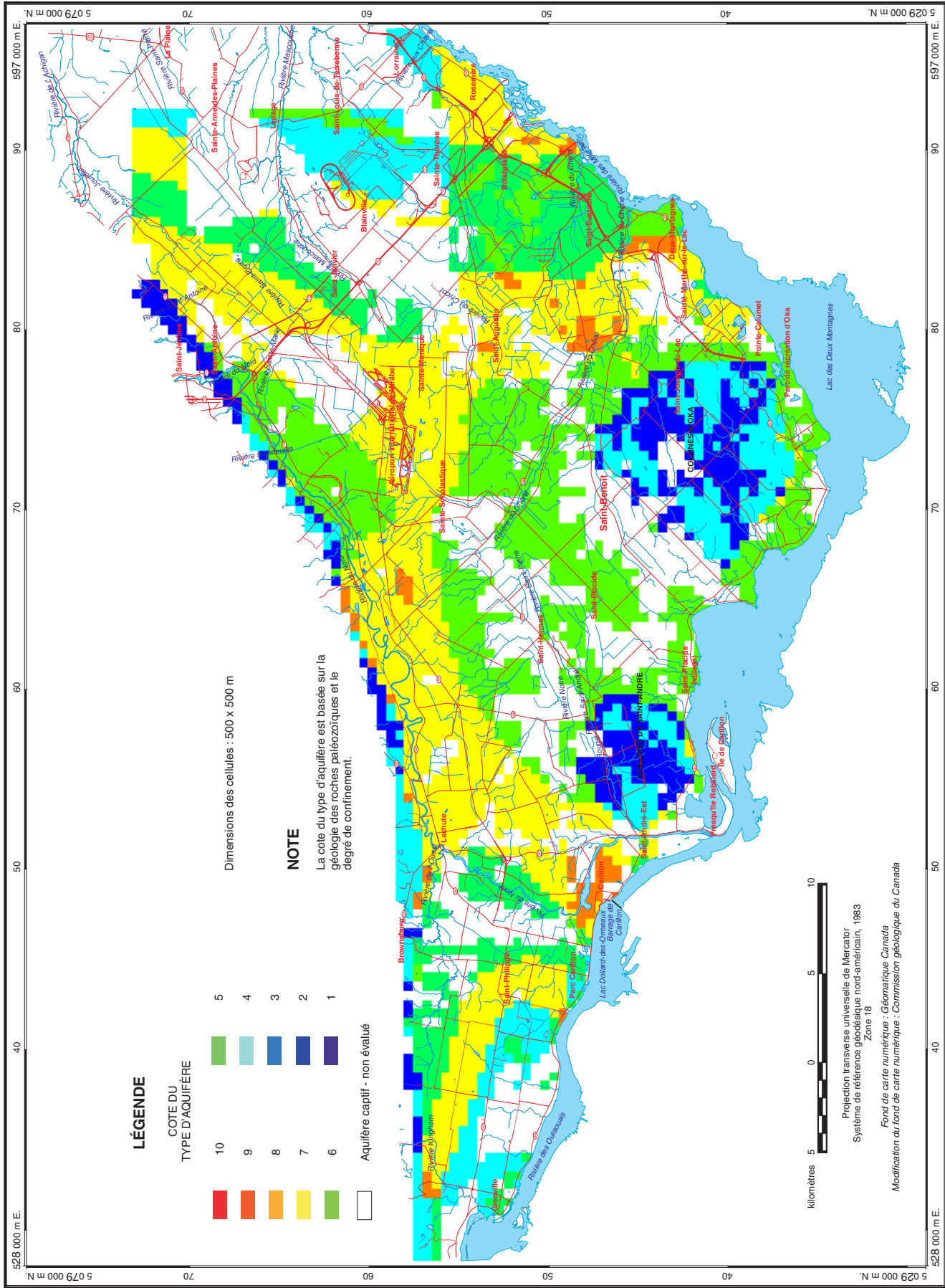


Figure 48. Méthode DRASTIC : type d'aquifère. (Figure créée par V. Murat.)

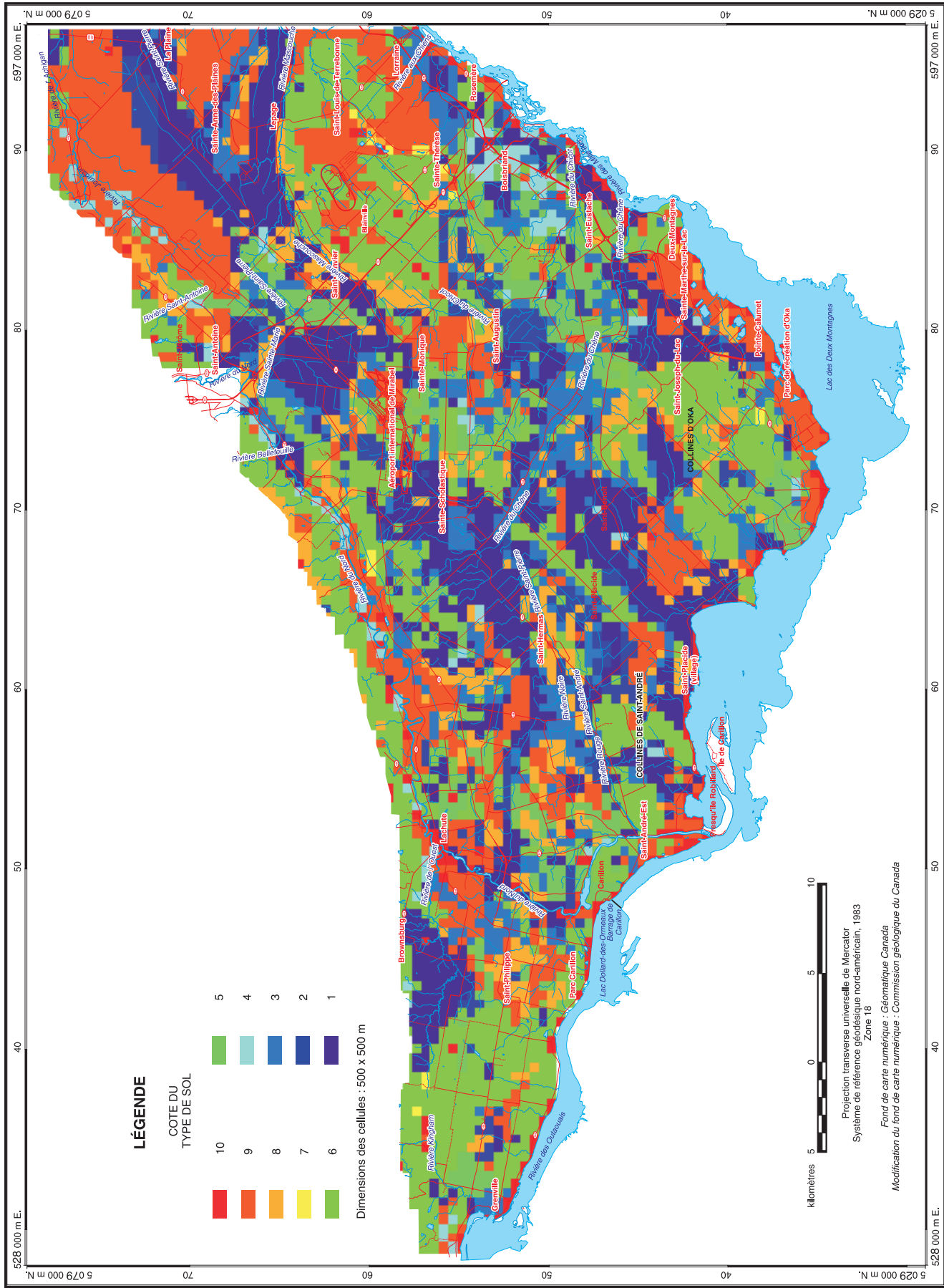


Figure 49. Méthode DRASTIC : type de sol. (Figure créée par V. Murat à partir des données de la carte des sols de l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (2000).)

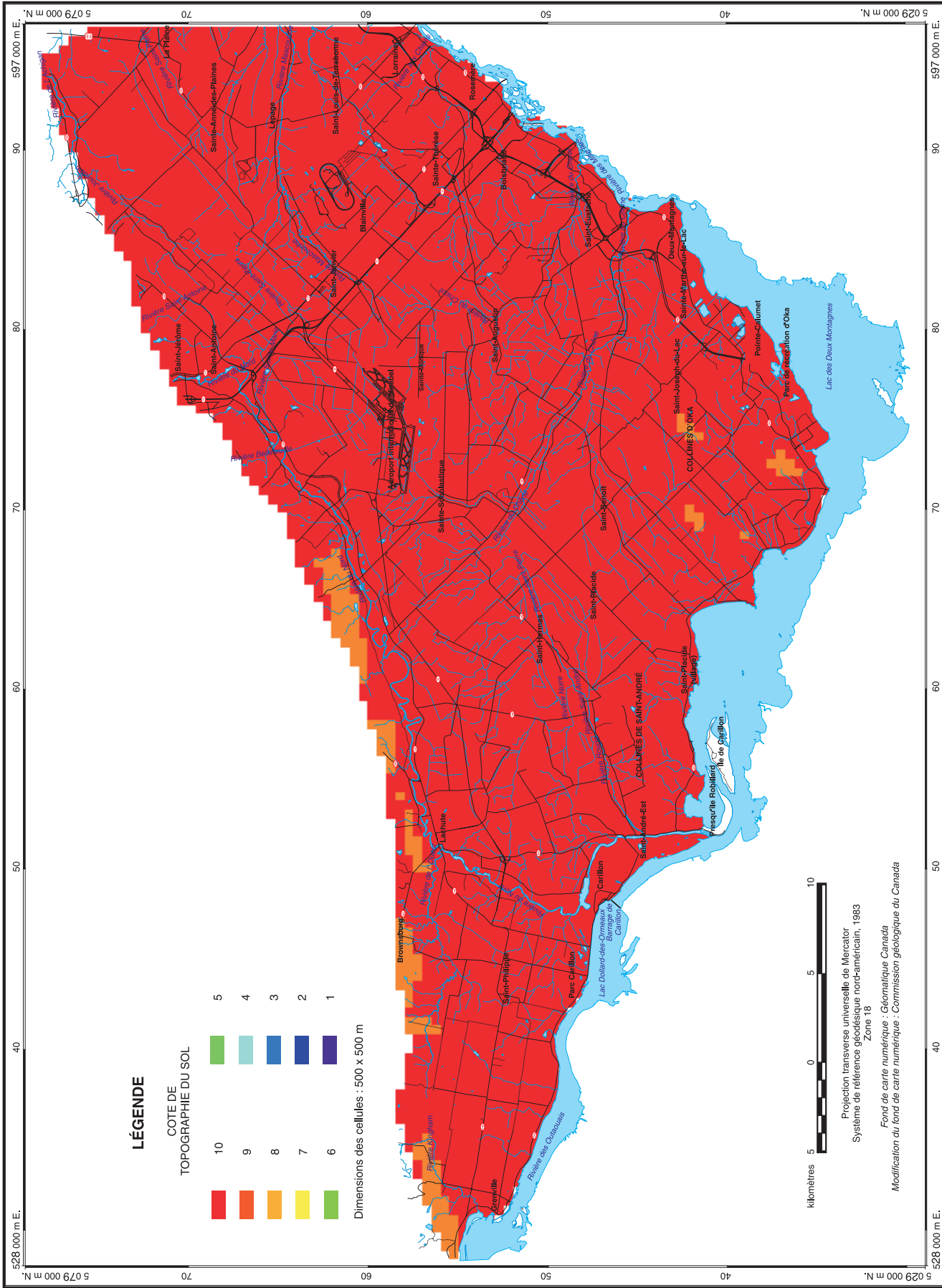


Figure 50. Méthode DRASTIC : topographie du sol. (Figure créée par V. Murat à partir d'un modèle numérique de terrain de la Commission géologique du Canada.)

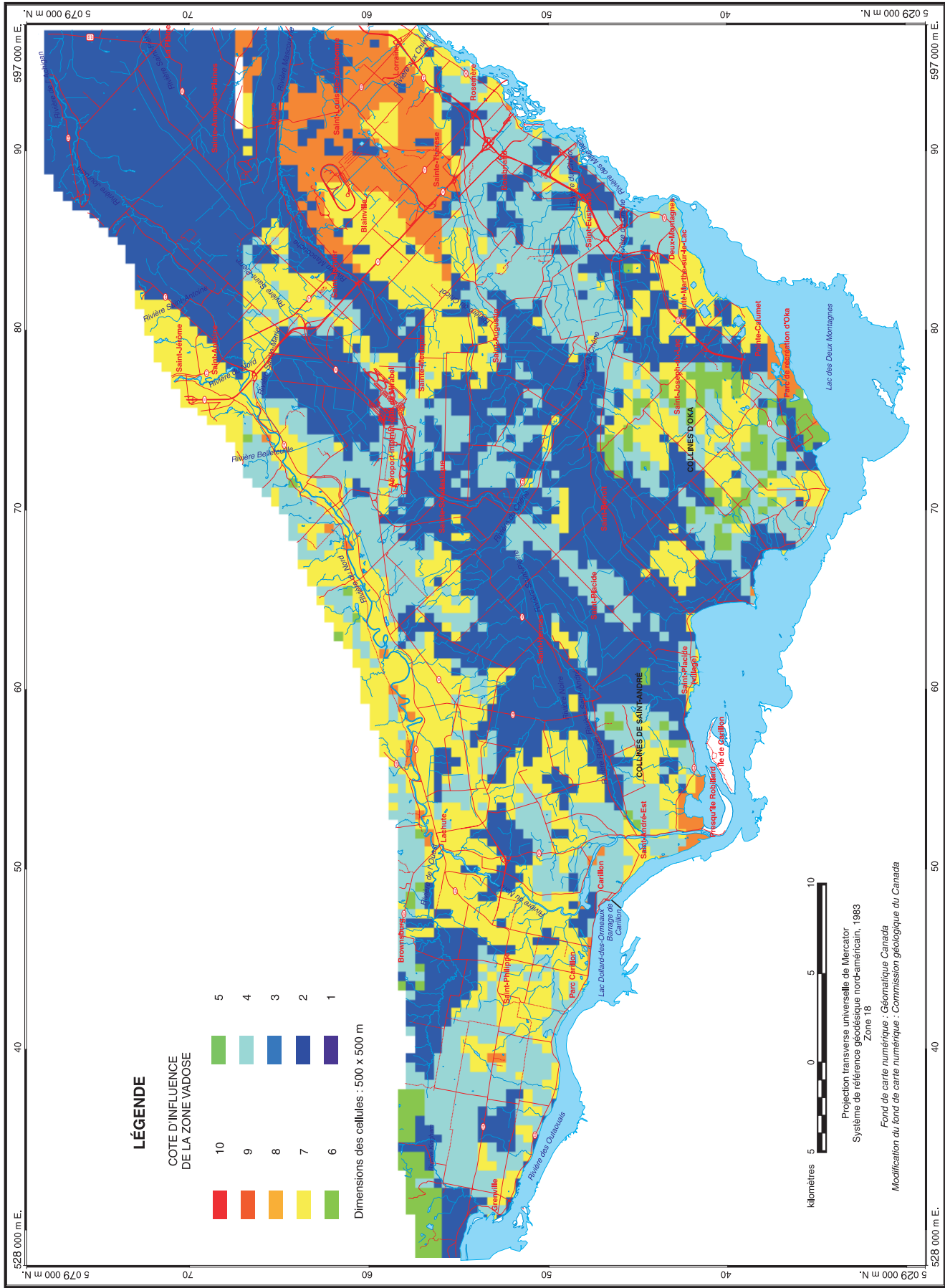


Figure 51. Méthode DRASTIC : influence de la zone vadose. (Figure créée par V. Murat.)

obtenues ne sont pas précises et qu'elles sont le produit d'une compilation verticale d'information suivant un maillage de 500 x 500 m, l'évaluation permet tout de même de mettre en évidence les différents domaines attendus sur la base des contextes hydrogéologiques (fig. 16).

Études connexes

Le modèle empirique GOD prescrit une méthode basée sur la caractérisation du type d'aquifère en termes de degré de confinement, de degré de consolidation des couches recouvrant l'aquifère, et de profondeur à la nappe (Foster et Hirata, 1991). La carte matricielle de vulnérabilité produite par la méthode GOD présente des indices en majorité modérés sur la région et des résultats parfois incohérents par rapport à la géologie du territoire étudié. En effet, notons entre autres que cette méthode ne souligne pas la grande vulnérabilité des zones de recharge. En somme, la comparaison des cartes produites par les méthodes DRASTIC et GOD met en évidence une évaluation plus fine par la méthode DRASTIC (Murat et al., 2003a).

La carte DRASTIC a aussi été comparée à la carte de vulnérabilité produite par calcul du temps de parcours (*vulnerability time-of-travel*, ou VTOT), une méthode qui utilise la conductivité hydraulique suivant l'axe vertical de déplacement et un modèle numérique tridimensionnel de la géologie du Quaternaire (Ross et al., 2005). Bien que l'information géologique utilisée lors de l'application de la méthode DRASTIC ait été moins sophistiquée que celle employée pour l'application de la méthode VTOT, et bien que les deux approches soient fort différentes, une bonne correspondance existe entre les produits finaux. Notons que la méthode DRASTIC montre tout de même un indice de vulnérabilité trop bas sur quelques zones où les roches sont affleurantes.

Lors de l'évaluation de la vulnérabilité, plus le nombre de paramètres utilisé par la méthode est grand, moins l'incertitude est élevée, mais plus l'erreur est grande. La méthode DRASTIC, qui utilise sept paramètres, comporte donc d'importantes erreurs, et tout utilisateur verra à faire le suivi des erreurs (identification et quantification) s'il souhaite minimiser l'incertitude intégrée dans l'indice de vulnérabilité. À noter qu'un exercice de caractérisation des erreurs a été effectué sur les données hydrogéologiques utilisées pour l'évaluation de la vulnérabilité, dans le but d'estimer la fiabilité de la carte du sud-ouest du Québec obtenue par le modèle DRASTIC. En bref, mentionnons qu'il est possible d'améliorer substantiellement le produit final en utilisant une analyse rigoureuse du traitement des données dans le cadre de projets régionaux. Nous renvoyons le lecteur à Murat et al. (2003b) pour apprendre les détails de cette procédure.

Zones les plus vulnérables à la contamination

Le résultat de l'évaluation de la vulnérabilité à la contamination constitue un outil d'aide au processus de décision pour la gestion et l'aménagement du territoire à l'échelle de 1/100 000. Cette échelle a été choisie sur la base des cartes des paramètres évalués et sur la base du degré de précision des fichiers matriciels disponibles (cellules de 500 x 500 m). Ainsi, les figures 46 à 53 ne se prêtent pas aux changements d'échelle, ni à l'interprétation ou à la gestion ponctuelle, puisque la précision de la localisation des limites des domaines obtenus est faible. L'utilité de ces cartes réside plutôt dans la mise en évidence des zones les plus vulnérables et les moins vulnérables du territoire étudié dans le sud-ouest québécois. Les indices de vulnérabilité obtenus sont relatifs, c'est-à-dire qu'ils sont spécifiques au territoire évalué. On ne peut pas dire qu'une zone est vulnérable dans l'absolu, mais plutôt qu'elle est plus vulnérable que la zone voisine.

Contrairement aux méthodes d'étude de la sensibilité d'un aquifère (modélisation ou autres), qui ciblent le potentiel de contamination de l'aquifère pour un contaminant spécifique, la méthode à indice DRASTIC identifie, à l'échelle régionale, les portions du territoire les plus vulnérables à la contamination de surface. Bien que l'échelle d'applicabilité de l'évaluation soit large, il n'en demeure pas moins que la méthode est efficace pour reconnaître de façon relative les zones à protéger. En effet, les zones de recharge reconnues sur la base des contextes hydrogéologiques (fig. 45) chevauchent très nettement les zones les plus vulnérables selon la méthode DRASTIC, c'est-à-dire celles dont l'indice est supérieur ou égal à 100 (fig. 53). Cette comparaison indique que les zones à protéger ou à surveiller occupent environ 35 % du territoire étudié et qu'elles sont dispersées partout sur le territoire, exception faite de sa partie nord-est, principalement dans la MRC de Thérèse-De Blainville, où les conditions naturelles imposées par d'épaisses couches d'argile protègent l'aquifère (fig. 10).

La combinaison de l'étude de vulnérabilité avec l'étude de l'hydrogéochimie et la modélisation permettra de faire des recommandations plus précises en ce qui a trait à l'utilisation et la protection des ressources en eau souterraine.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET RECOMMANDATIONS

Nous croyons que la compréhension du système aquifère exposée dans ce rapport, et les informations à l'appui présentées sur les cartes, constituent la base nécessaire à la protection et à la gestion des ressources en eau souterraine à l'échelle régionale. La prise de décision relative à l'eau souterraine peut être faite en connaissance de cause, sur des questions tant de quantité que de préservation de la qualité.

Sur cette base de connaissances, la gestion durable des ressources en eau souterraine peut maintenant être également envisagée.

Dans cette section, nous documentons les principales conclusions et recommandations issues de notre étude. Ces éléments ne constituent pas un plan détaillé des actions à prendre au niveau de l'aménagement du territoire pour établir un programme de gestion des ressources en eau souterraine. Cependant, ces conclusions et recommandations devraient servir de bornes pour orienter la gestion et la protection de la ressource en eau souterraine.

Principales conclusions découlant de la caractérisation hydrogéologique

Caractérisation du système aquifère régional

Au niveau régional, la principale ressource exploitable en eau souterraine se trouve dans les roches sédimentaires fracturées, particulièrement à l'interface du roc et des sédiments sus-jacents, jusqu'à une profondeur exploitable d'environ 100 m dans la séquence rocheuse. Les propriétés hydrauliques des unités ont été déterminées à partir de 35 essais de pompage, 328 essais d'injection à charge constante et 132 essais de capacité spécifique. Des roches paléozoïques peu perméables et des argiles marines d'âge quaternaire pratiquement imperméables constituent respectivement le plancher et le toit du système aquifère du sud-ouest du Québec. Deux couches hydrostratigraphiques d'étendue régionale composent l'aquifère principal et constituent les cibles les plus intéressantes pour l'exploration à la recherche d'eau souterraine. Ces couches sont, de la base au sommet, 1) des roches paléozoïques fracturées (unité 2 à la figure 17) et 2) une unité mixte constituée principalement de roches paléozoïques très fracturées et de sédiments quaternaires fluvioglaciaires (unité 3 à la figure 17). Les roches paléozoïques fracturées ont une conductivité hydraulique moyenne de $2,8 \times 10^{-5}$ m/s. Cependant, la valeur moyenne de la conductivité hydraulique diminue de deux ordres de grandeur (facteur 100) à partir du sommet de la séquence rocheuse jusqu'à une profondeur de 100 m, où elle devient pratiquement négligeable pour des fins d'approvisionnement en eau. L'unité mixte à l'interface du roc et des sédiments possède une conductivité hydraulique moyenne de $7,81 \times 10^{-4}$ m/s, donc beaucoup plus élevée que celle de l'unité de roches fracturées. Il est à noter que les sables et autres dépôts perméables au sommet des dépôts quaternaires sont peu étendus et ne représentent pas des aquifères d'intérêt régional pour l'exploitation des eaux souterraines.

L'écoulement de l'eau souterraine se fait généralement du nord vers le sud, mais il est divergent à partir de hauteurs qui constituent des zones de recharge préférentielle de l'eau souterraine. L'écoulement a été établi à partir de 450 points de contrôle des niveaux d'eau dans la région. En cheminant généralement vers le sud, l'eau souterraine contribue au débit des rivières des Outaouais et des Mille

Îles. Les gradients hydrauliques pour les Laurentides et les collines d'Oka et de Saint-André sont en moyenne de 2,2 et 1,6 %, respectivement. Aux endroits les plus plats de la Plate-forme du Saint-Laurent proprement dite, les gradients sont généralement de l'ordre de 0,46 %. De façon générale, les vitesses d'écoulement dans l'unité mixte sur l'ensemble du territoire varient entre 0,5 et 1500 m/a, avec une valeur moyenne de l'ordre de 150 m/a. La carte du niveau de la surface piézométrique (fig. 23) constitue la base essentielle au calage du modèle numérique utilisé pour l'étude quantitative (partie II). En plus de son utilité pour l'aspect quantitatif, cette carte permet entre autres d'observer que, sauf dans le cas de la carrière St-Eustache, l'effet du pompage des plus importants ouvrages de captage ne perturbe pas les lignes d'écoulement régional.

Les plus longues périodes d'enregistrement des niveaux d'eau souterraine du réseau de surveillance indiquent que les niveaux d'eau sont relativement stables à long terme. Ceci nous permet de conclure que le système hydrodynamique se trouve en régime permanent. Le réseau de surveillance des niveaux d'eau souterraine a permis de constater que les variations annuelles se situent entre 0,7 et 2,7 m dans les parties captives du système, et entre 1,9 et 3,8 m en conditions de nappe libre. Ce réseau est présentement constitué de 36 puits d'observation, dont 12 sont instrumentés avec des enregistreurs automatiques. Ce réseau de puits permettra le suivi à long terme des niveaux d'eau, de même que la vérification des changements éventuels de la qualité de l'eau.

La qualité de l'eau souterraine

À l'échelle régionale, l'eau souterraine du territoire est, à l'état naturel, de qualité variable et très peu contaminée par les activités humaines. Un échantillonnage systématique de l'eau souterraine a été fait dans 144 puits et 2 sources pour couvrir la région d'étude de manière représentative, en fonction des sources d'approvisionnement et des unités hydrogéologiques. En termes de qualité des eaux souterraines, le territoire d'étude a été subdivisé en sept secteurs (fig. 41) classés sur une échelle de qualité relative, selon les propriétés hydrogéochimiques, les conditions hydrogéologiques et la vulnérabilité à la contamination. L'eau souterraine est de meilleure qualité dans les secteurs 1 (Saint-Hermas) et 2 (rivière du Nord), ainsi que dans les sous-secteurs 3a (Lachute/Saint-Janvier), 3b (Sainte-Monique/Saint-Eustache) et 3c (côte Saint-Vincent). Dans les secteurs 4 (collines d'Oka) et 5 (Grenville/Chatham), l'eau souterraine est de qualité moyenne, alors que dans les sous-secteurs 6a (Sainte-Anne-des-Plaines) et 6b (Sainte-Thérèse) et dans le secteur 7 (Saint-Benoît/Saint-Joseph-du-Lac) elle est de qualité inférieure. Le bilan des dépassements des critères de qualité reliés à la santé nous indique une eau souterraine de bonne qualité sur la majorité du territoire (fig. 27 à 39). En effet, un seul dépassement directement relié à l'activité humaine, soit pour le nitrate, a été identifié (dans la zone de recharge de Lachute/Saint-Janvier). De plus, deux dépassements des critères de qualité reliés à la santé ont été notés

pour le baryum, et dix pour le fluorure (principalement dans le secteur 5 (Grenville/Chatham) et le sous-secteur 6a (Sainte-Anne-des-Plaines)). Plusieurs dépassements des critères esthétiques ont été observés dans les échantillons d'eau, mais ils sont généralement reliés à des processus naturels. Seuls les quelques dépassements en chlorure et en sodium dans les zones à nappe libre à proximité des routes 15 et 117 peuvent être attribués à l'activité humaine (sels déglaçants). Enfin, bien que ne faisant pas l'objet de recommandations ou de normes, la dureté est relativement élevée sur l'ensemble de la région. La majorité de ces problèmes esthétiques de qualité de l'eau souterraine, ainsi que la dureté, peuvent être corrigés par des méthodes de traitement simples.

Évaluation de la recharge

La recharge en eau souterraine est estimée pour l'ensemble de la région à 45 mm/a. La recharge annuelle en eau souterraine de l'aquifère rocheux a été évaluée à l'aide de méthodes appliquées à l'échelle locale et régionale. La valeur locale peut varier entre 0 et 327 mm/a selon la nature des matériaux et la topographie de la surface du sol. Ramenée à toute la superficie du territoire, la moyenne se situe à 45 mm/a. Cette estimation contribue à dresser un bilan hydrologique annuel préliminaire pour la région d'étude. Selon les régions, de 993 à 1204 mm de précipitation touche le sol en moyenne chaque année. De ce total, 39 % s'évapore, et 61 % s'écoule par les rivières; environ 5 % sur ce 61 % participe à l'écoulement souterrain (voir aussi la partie II). Les principales zones de recharge se répartissent sporadiquement sur le territoire étudié. Les plus étendues de ces zones sont celles de Grenville/Saint-Philippe, de Carillon/Saint-André-Est, des collines d'Oka, et du triangle Deux-Montagnes/Saint-Augustin/Rosemère (fig. 45).

Vulnérabilité du système aquifère

L'identification des principales zones de recharge de l'aquifère à l'échelle régionale indique que 35 % du territoire étudié est à protéger. La vulnérabilité à la contamination des portions libres ou semi-captives du système aquifère régional a été évaluée au moyen de la méthode DRASTIC. Les portions du territoire les plus vulnérables à toutes formes de contamination provenant de la surface ont été identifiées comme étant celles ayant un indice DRASTIC égal ou supérieur à 100. Les zones les plus vulnérables ainsi identifiées (fig. 53) chevauchent très nettement les principales zones de recharge reconnues sur la base des contextes hydrogéologiques (fig. 44). Ces résultats confirment la validité de DRASTIC comme méthode d'évaluation à l'échelle régionale et indiquent clairement que les zones à protéger ou à surveiller couvrent environ 35 % du territoire étudié. Les zones vulnérables sont dispersées partout sur le territoire, exception faite de sa partie nord-est, principalement dans la MRC de Thérèse-De Blainville, où les conditions naturelles créées par d'épaisses couches d'argile protègent l'aquifère.

Comment trouver de l'eau souterraine de qualité en quantité exploitable sur le territoire étudié?

Deux zones dont les superficies combinées couvrent environ 15 % du territoire étudié représentent les meilleures cibles pour l'exploration à la recherche d'eau souterraine. En pratique, l'eau souterraine exploitable se trouve à des profondeurs ne dépassant pas 100 m dans la séquence rocheuse. Au-delà de cette profondeur, la faible conductivité hydraulique indiquée par les essais d'injection (voir aussi la partie II), et les coûts élevés reliés à l'aménagement de puits profonds, rendent l'exploitation de l'eau souterraine non optimale d'un point de vue quantitatif et économique. De plus, l'intégration des propriétés hydrogéochimiques et hydrauliques permet de reconnaître les zones offrant le meilleur potentiel d'exploitation. En effet, les parties du territoire qui présentent le meilleur potentiel d'exploitation (fig. 54) sont celles qui montrent une plus grande conductivité hydraulique ($K > 10^{-5}$ à la figure 22) et qui appartiennent aussi aux secteurs 1, 2 ou 3 de qualité relative de l'eau souterraine (fig. 41). Ces superficies occupent 15 % du territoire étudié, et elles coïncident bien avec les zones les plus favorables à l'utilisation de l'eau délimitées sur la base de l'étude quantitative (Nastev et al., 2002; partie II de ce bulletin), qui identifie ces zones parmi les moins sensibles à une exploitation accrue ou à une diminution à long terme de la recharge.

Recommandations pour la gestion et la protection des eaux souterraines

Sur le plan régional

1. *Considérer la protection des ressources en eau souterraine dans les schémas d'aménagement des MRC.* Nous suggérons d'intégrer les connaissances sur les eaux souterraines comme considération supplémentaire pour la gestion du territoire. Les actions visant à prévenir la contamination de l'eau souterraine devraient se faire en priorité en fonction de la délimitation régionale des zones de recharge et de l'évaluation de la vulnérabilité de l'aquifère à la contamination (fig. 45, 53). Les zones de recharge et les zones à indice de vulnérabilité élevé marquent les endroits où il est le plus important d'assurer la protection de la ressource. **Bien que l'échelle d'applicabilité des cartes produites soit grande, il n'en demeure pas moins que ces cartes permettent de reconnaître efficacement les zones à protéger des contaminants potentiels pouvant être émis en surface.**
2. *Prendre des mesures qui protègent la qualité de l'eau souterraine et la santé publique.* Dans l'optique de la conservation et de l'utilisation de la ressource, les caractéristiques hydrogéochimiques qui déterminent la qualité de l'eau autorisent de recommander a) d'échantillonner périodiquement les puits d'observation du réseau de surveillance, et b) de cesser l'ajout de fluorure (F) dans les

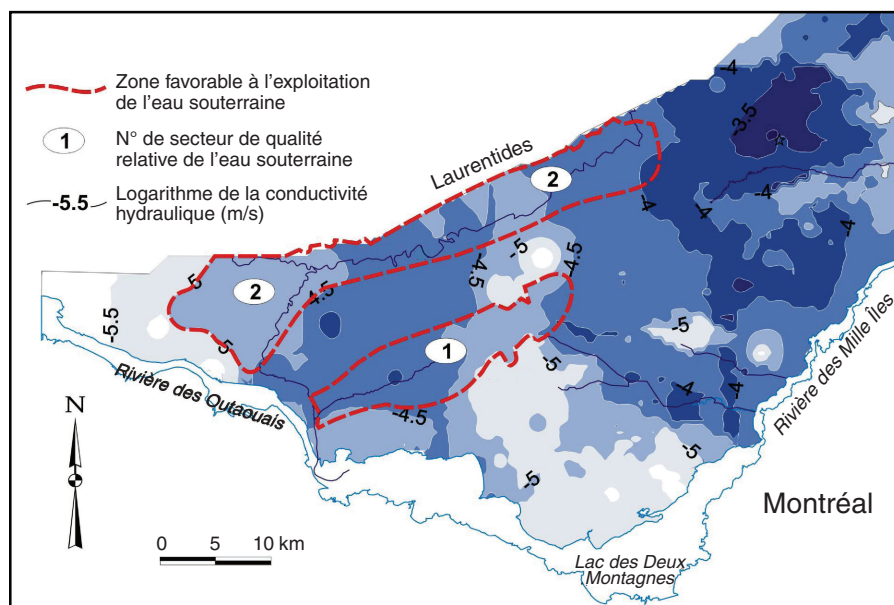
puits municipaux où la concentration de fluorure de l'eau souterraine excède le critère de qualité de 1,5 mg/L (pour lutter contre la carie dentaire, il faut maintenir la concentration de fluorure entre 0,8 et 1,0 mg/L (Sous-comité fédéral-provincial sur l'eau potable du Comité fédéral-provincial-territorial de l'hygiène du milieu et du travail, 2001)). Cette dernière recommandation devrait être validée auprès du bureau régional de l'Institut national de santé publique du Québec pour s'assurer qu'elle rencontre leur approbation.

3. *Assurer la mise à jour de la base de données.* La base de données hydrogéologiques interactive du sud-ouest du Québec constitue un immense catalogue d'informations qui devrait être mis à jour de façon continue pour optimiser les efforts déjà investis. Dans l'optique de la considération des connaissances sur l'eau souterraine pour l'aménagement du territoire (recommandation 1 ci-dessus), il faut prévoir utiliser la base de données interactive comme outil pratique, c'est-à-dire l'interroger par des requêtes numériques pour aider la prise de décision.
4. *Acquérir l'expertise requise en hydrogéologie pour exploiter les informations disponibles sur les ressources en eau souterraine dans la région.* Nous recommandons que les autorités régionales se dotent de l'expertise requise en hydrogéologie pour maintenir à jour la base de données et l'ensemble des connaissances sur les ressources régionales en eau souterraine, et ainsi optimiser l'investissement déjà fait pour acquérir la base de données. Cette expertise serait requise pour, entre autres activités, faire le suivi des niveaux d'eau du réseau de surveillance, assurer la mise à jour de la base de données et utiliser les informations disponibles pour guider les décisions relatives à la gestion des ressources en eau souterraine.

À l'échelle locale

5. *Tirer profit de l'information disponible lors d'études locales.* Les travaux effectués dans le cadre de cette étude donnent des résultats valides à l'échelle régionale, et des études locales sont toujours requises, par exemple pour la mise en place de nouvelles infrastructures d'approvisionnement en eau. Ces études locales devraient cependant profiter de la définition du cadre hydrogéologique régional offerte par nos travaux. Pour toute nouvelle installation d'échelle locale, il est donc recommandé de faire effectuer des travaux plus détaillés, par exemple par des firmes de consultants, en utilisant comme base les résultats de la présente étude régionale.
6. *Protéger la qualité de l'approvisionnement des puits municipaux.* Pour assurer la protection de l'approvisionnement en eau des puits municipaux, deux mesures doivent être prises : a) la délimitation des aires d'alimentation des puits, et b) la mise en place d'un programme de protection. Ces mesures assurent la protection prioritaire des zones de recharge en amont des zones en conditions de nappe captive (voir aussi Karanta et al., 2001). Le programme de protection des puits municipaux devrait comprendre a) la formation d'un comité local de protection des ressources en eau; b) la délimitation de périmètres de protection; c) l'inventaire de l'utilisation du sol et l'instauration d'inspections régulières; d) la gestion des aires de protection et un programme d'éducation du public; et enfin e) une réflexion sur les autres sources possibles d'approvisionnement en eau en cas de pénurie ou de contamination accidentelle, ou pour combler les demandes futures en eau de la région.

Figure 54. Zones favorables à l'exploitation de l'eau souterraine. Ces zones ont été définies à partir des secteurs de qualité relative de l'eau souterraine (fig. 41) et de la conductivité hydraulique de l'aquifère rocheux (fig. 22). Les couleurs plus pâles correspondent à des conductivités hydrauliques plus élevées.



7. *Prendre des mesures pour éviter la dégradation de la qualité de l'eau souterraine dans les zones où l'eau peut avoir une qualité inférieure. Nos travaux ont permis de définir des zones où l'eau souterraine peut avoir une salinité élevée qui la rend de piètre qualité. Dans ces zones, l'eau souterraine à forte salinité peut se trouver adjacente à de l'eau de meilleure qualité présentement en exploitation, ou bien à des profondeurs inférieures. Il serait important d'éviter que le pompage de l'eau souterraine à proximité des zones à forte salinité entraîne la migration d'eau de forte salinité et la dégradation de la qualité de l'eau souterraine en exploitation. Le même type de problème peut exister dans des zones où l'eau est sulfureuse. Pour éviter ces problèmes, nous recommandons de déterminer les débits des puits dans les zones problématiques et de contrôler le pompage excessif qui pourrait causer une dégradation de la qualité de l'eau par la venue d'eau salée ou sulfureuse à partir de zones adjacentes connues. De telles mesures devraient être prises dans le secteur 7 (Saint-Benoît/Saint-Joseph-du-Lac) et le sous-secteur 6a (Sainte-Anne-des-Plaines). Dans ces cas, il serait avantageux de surveiller les changements et l'évolution de la qualité de l'eau souterraine des puits de pompage et de puits d'observation adjacents afin d'intervenir à temps dans le cas d'une dégradation de la qualité de l'eau.*

Programme de protection

Les connaissances du système aquifère acquises au cours de ce projet nous permettent maintenant de suggérer la mise au point d'un plan intégré de gestion et de protection des ressources en eau souterraine, au moyen des mesures suivantes :

8. *Mise en place d'un comité de gestion des eaux souterraines et établissement d'un plan de gestion des eaux souterraines intégré au schéma d'aménagement des MRC. Les schémas d'aménagement des MRC pourraient constituer des outils importants pour réaliser la gestion et la protection des eaux souterraines. Pour ce faire, nous recommandons la mise sur pied d'un comité de gestion des eaux souterraines qui aurait pour mandat de mettre au point un plan de gestion des eaux souterraines*

intégré dans le schéma d'aménagement. Cette démarche permettrait à moyen terme aux MRC de s'approprier des résultats de notre étude et de poser des actions de gestion de la ressource en eau souterraine. Le comité devrait se familiariser avec les informations sur la ressource fournies par notre étude, établir des critères pour la prise de décisions impliquant la gestion des eaux souterraines, et mettre au point un programme de gestion qui serait intégré aux schémas d'aménagement par le personnel et les autorités compétentes.

9. *Réalisation des actions requises pour mettre en œuvre le plan de gestion. Plusieurs actions sont requises pour assurer la mise en œuvre d'un plan de gestion des eaux souterraines et assurer sa protection à long terme. Voici une liste d'activités utiles : a) réaliser un inventaire des utilisateurs de la ressource en eau souterraine, de même que leur consommation (au moins une estimation); un tel inventaire devrait être maintenu et mis à jour annuellement; b) réaliser un inventaire des sources potentielles de contamination, aussi maintenu à jour annuellement; c) établir un plan de suivi de la quantité et de la qualité des eaux souterraines et faire le suivi annuel du niveau et de la qualité de l'eau dans des puits sélectionnés du réseau de surveillance; d) réaliser des études de terrain dans des zones d'intérêt prioritaire, par rapport soit à l'approvisionnement en eau, à la protection contre la contamination, ou à des conflits d'usages; e) établir des critères de décision concernant les usages des eaux souterraines; par exemple, l'exploitation de l'eau souterraine dans une zone de bonne qualité mais de faible quantité pourrait être faite en priorité pour la consommation humaine d'eau potable; dans le cas de conflits d'usages, un ordre de priorité des types d'utilisation — consommation humaine, agriculture, industries — pourrait être établi, et l'établissement des priorités pourrait se faire en se référant aux zones de « qualité-quantité » définies dans ce rapport; f) effectuer une étude bibliographique de modèles de gestion régionale des eaux souterraines et rédiger un plan de gestion régionale des eaux souterraines dans les MRC; et enfin g) intégrer le plan de gestion aux schémas d'aménagement des MRC pour considérer la gestion de l'eau souterraine.*

PARTIE II

Étude quantitative des ressources en eau souterraine

OBJECTIFS

La présente étude quantitative de la ressource en eau souterraine vise à fournir le cadre de connaissances nécessaire pour faciliter la gestion de l'exploitation de l'eau souterraine en tenant compte de la dynamique de l'eau souterraine et de sa qualité.

La gestion durable de la ressource en eau souterraine doit reposer sur une connaissance suffisante des conditions hydrogéologiques actuelles et sur des prévisions valables. Elle doit être en mesure de relier effectivement l'utilisation de l'eau souterraine à la variation des niveaux d'eau de la nappe. L'objectif principal de cette étude est donc de définir la relation entre le taux de pompage (l'extraction par l'homme) et les rabattements dérivés à l'échelle régionale (le changement de niveau de la nappe d'eau).

Pour répondre aux objectifs généraux de l'étude quantitative de la ressource en eau souterraine, il est requis d'apporter de nouvelles connaissances sur

- l'utilisation actuelle de l'eau souterraine par la population;
- la dynamique d'écoulement de l'eau souterraine (recharge, flux, résurgences);
- l'impact de l'extraction de l'eau sur le bilan d'eau régional et la qualité de la ressource (par simulation numérique);
- la délimitation des zones les plus favorables à l'exploitation; et
- les débits durables pour l'aquifère régional.

L'évaluation quantitative vise plus particulièrement à renseigner les gestionnaires sur la disponibilité de la ressource et sur les effets que pourrait avoir une utilisation future sur les niveaux d'eau, afin de permettre une meilleure optimisation de l'exploitation de cette ressource.

LE CONCEPT D'EXPLOITATION DURABLE

L'une des questions des plus débattues en hydrogéologie est la définition de la quantité d'eau qui pourrait être soustraite d'un aquifère de manière permanente sans modifier de façon appréciable la qualité de l'eau pompée et sans avoir d'impacts négatifs sur l'environnement. Le taux de pompage ainsi défini est équivalent à l'exploitation durable de l'aquifère (Walton, 1970; Alley et al., 1999; Sophocleous, 2000).

Dans des conditions naturelles, le taux de recharge d'un aquifère est équilibré par le taux de résurgence sur de longues périodes. Ainsi, l'eau souterraine devient une ressource renouvelable. Dans la plupart des cas, un taux de pompage modéré et non uniforme ne cause pas de problèmes perceptibles. Cependant, à des taux de pompage relativement élevés, l'équilibre naturel n'est pas maintenu car l'eau est pompée plus vite qu'elle est renouvelée par la recharge. Le niveau d'eau diminue alors graduellement et le cône de rabattement produit par le pompage grandit. La différence entre la recharge et le débit pompé se traduit par une diminution du volume d'eau emmagasiné dans l'aquifère. Le cône de rabattement grandira jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre dynamique entre la recharge et le débit pompé soit établi. L'exploitation durable de la ressource en eau souterraine se base donc sur une bonne connaissance de la recharge et de l'emmagasinement, ainsi que de la dynamique de l'écoulement de l'aquifère.

La gestion d'un aquifère se base communément sur le débit d'exploitation, défini comme l'équilibre à long terme entre le débit de pompage et la quantité d'eau renouvelée naturellement. Ce concept dicte aux utilisateurs de pomper l'eau souterraine à un taux n'excédant pas le taux de recharge. Cependant, si la quantité d'eau pompée équivaut à celle qui est rechargée annuellement, cela signifie que la réalimentation effective des eaux de surface est nulle. Il n'y a alors aucune résurgence vers les cours d'eau, et le flux des rivières décroît avec le temps. Un tel niveau d'exploitation n'est donc pas envisageable car une partie de l'eau souterraine est nécessaire pour soutenir les débits des cours d'eau et les conditions des milieux humides.

Le concept d'exploitation durable, plus récent et moins répandu, implique que la quantité d'eau souterraine qui peut être extraite d'un aquifère en régime permanent ne doit pas entraîner d'effets négatifs, ou encore qu'elle n'entraîne que des effets négatifs acceptables et bien définis.

Parmi les plus fréquents effets négatifs d'un pompage excessif, on reconnaît les quatre suivants :

- *La diminution de l'emmagasinement dans l'aquifère.* Toute exploitation entraîne une diminution du niveau d'eau souterraine dans l'aquifère, et donc de la quantité d'eau disponible. Le rabattement des niveaux d'eau pourrait provoquer une diminution graduelle du volume des pores d'un aquifère granulaire et entraîner un tassement irréversible au détriment de l'emmagasinement dans l'aquifère.
- *L'altération de la qualité de l'eau souterraine.* L'écoulement de l'eau souterraine est un processus lent (quelques mètres par année). Le pompage fait en sorte

que les vitesses d'écoulement augmentent tandis que le temps de séjour de l'eau dans le sous-sol et le temps de contact avec les formations géologiques décroissent. Un pompage prolongé peut entraîner vers le puits des eaux de composition chimique différente, par exemple des eaux contaminées ou des eaux salines, et finalement causer une désaturation d'une partie de l'aquifère et ainsi une modification des conditions biochimiques et géochimiques.

- *Des altérations causées au système aquatique riverain.* Le pompage cause une diminution des résurgences en direction des eaux de surface comme les rivières, les lacs et les marécages, entraînant une baisse de leur niveau.
- *Des transgressions aux droits existants sur l'utilisation de l'eau.*

En considérant tous ces facteurs, il est jugé approprié, au lieu de définir les débits d'exploitation, de définir l'abaissement des niveaux d'eau à ne pas excéder lors d'un pompage accru. C'est sous cet angle que l'étude quantitative a été abordée.

APPROCHE ET MÉTHODES

L'étude quantitative repose principalement sur la délimitation du système aquifère, la mesure de ses propriétés hydrauliques, et l'évaluation du bilan d'eau reposant sur l'estimation du taux et de la distribution de la recharge, de l'émergence (écoulement de surface) et de l'utilisation actuelle de l'eau souterraine.

L'information de base servant à évaluer la consommation humaine en eau souterraine provient principalement des exploitants des aqueducs municipaux, des fiches d'enregistrement des exploitations agricoles du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, et des notes prises au cours des campagnes de terrain de 1999 et 2000. L'évaluation de la consommation pour les différentes zones a été réalisée soit par la mesure directe des volumes d'eau extraits (p. ex. puits municipaux), soit par des estimations issues de la littérature (p. ex. irrigation des cultures), soit encore par l'extrapolation de mesures effectuées à partir de quelques cas particuliers (p. ex. irrigation des terrains de golf).

Les paramètres nécessaires pour estimer la réponse du système aquifère sont d'abord ses propriétés hydrauliques, mais également la délimitation de ce système, ses conditions aux limites pour la modélisation, la qualité de l'eau souterraine, et la description complète de la dynamique du système de l'écoulement. Tous les paramètres hydrogéologiques utiles à la modélisation (p. ex. hydrostratigraphie, piézométrie, conductivité hydraulique, recharge), ainsi que les cartes correspondantes, ont été tirés de l'étude de caractérisation hydrogéologique régionale et intégrés dans un modèle numérique d'écoulement régional (partie I).

L'estimation des débits durables a été faite au moyen d'une approche prudente évaluant arbitrairement le rabattement maximal comme étant la médiane des fluctuations naturelles des niveaux d'eau dans des puits suivis sur plusieurs années. L'effet d'un pompage uniforme sur l'ensemble du territoire a par la suite été modélisé pour délimiter les zones les plus sensibles à un pompage accru.

Le modèle a été construit avec des éléments finis en utilisant le modèle numérique FEFLOW® (Diersch, 1998a, b); il a été calé selon les conditions réelles de l'écoulement souterrain, c'est-à-dire la piézométrie régionale mesurée sur le terrain. Le modèle numérique a permis d'établir le bilan global de l'eau souterraine, où les flux entrant dans l'aquifère sont équilibrés par les flux en sortant. Ce modèle a été utilisé par la suite pour simuler la réponse de l'aquifère régional à des conditions hypothétiques, soit un pompage accru et une diminution de la recharge. De plus, les zones de l'aquifère régional les plus sensibles à des modifications de la dynamique du système ont été définies.

Il est à noter que la précision des résultats de cette étude implique une utilisation de ceux-ci pour la planification de la gestion et du développement de la ressource à l'échelle régionale (1/100 000). Ces résultats ne peuvent pas et ne doivent pas être appliqués à la solution de questions locales.

ÉVALUATION DE L'UTILISATION DE L'EAU SOUTERRAINE ET DE LA PRODUCTIVITÉ DES PUITES

Utilisation de l'eau souterraine

Les quatre grands types d'activités considérés pour l'évaluation de l'utilisation anthropique de l'eau souterraine de la région sont 1) la consommation humaine d'eau potable, 2) l'irrigation, 3) l'élevage du bétail et 4) les activités industrielles. Les installations reliées à la consommation humaine comprennent les aqueducs et les puits domestiques, et celles reliées à l'irrigation comprennent les cultures (maraîchères et horticoles) et les terrains de golf, tandis que les activités industrielles comprennent l'embouteillage commercial de l'eau souterraine et le pompage par les carrières. D'autres usages de l'eau souterraine peuvent contribuer à l'extraction régionale, mais l'évaluation de la consommation n'était pas possible dans leur cas.

La compilation des quantités d'eau utilisée par secteur d'activité a été effectuée pour chaque MRC et reflète clairement le profil économique de chacune (fig. 55). Mentionnons par exemple que les proportions de l'utilisation de l'eau souterraine reliées aux cultures, carrières et aqueducs dominant respectivement dans les MRC d'Argenteuil, de Deux-Montagnes, et de Mirabel et Thérèse-De Blainville.

L'utilisation anthropique totale de l'eau souterraine pour la période de 1998 à 2000 sur tout le territoire d'étude est de $14,8 \times 10^6$ m³/a, équivalant à une lame d'eau de 10,9 mm/a

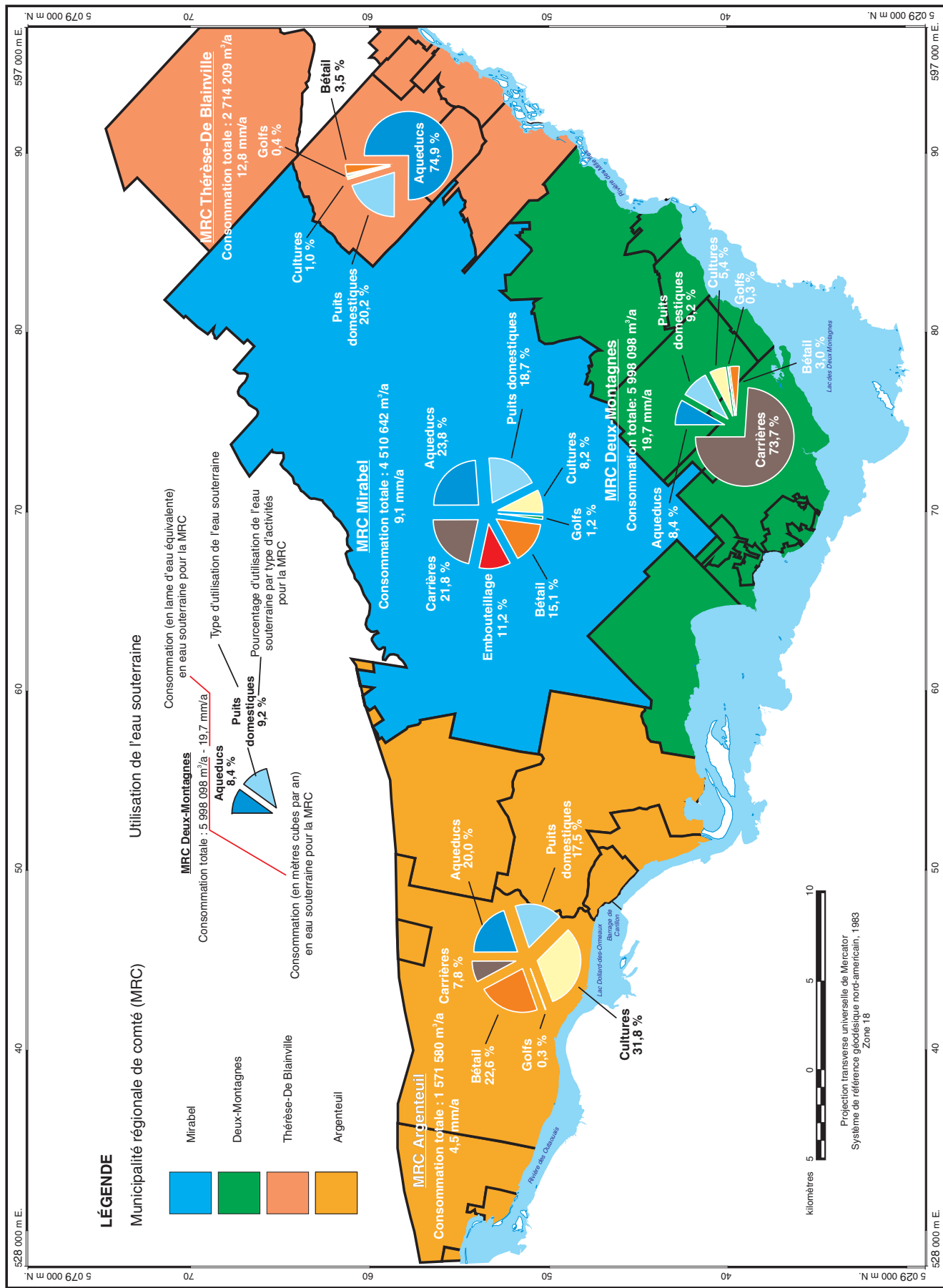


Figure 55. Utilisation de l'eau souterraine. (Figure créée par D. Paradis.)

sur l'ensemble du territoire. La répartition de cette utilisation par type d'activité est présentée au tableau 13. Selon ces résultats, la majeure partie de l'eau souterraine est utilisée pour la consommation humaine d'eau potable et l'exploitation des carrières. La consommation humaine représente 42 % de l'utilisation totale, soit 27 % pour les aqueducs et 15 % pour les puits domestiques, tandis que les carrières utilisent 37 % de l'eau souterraine pompée. On constate que l'irrigation des terrains de golf (env. 1 %) et l'embouteillage commercial représentent 4 % de l'utilisation totale de l'eau souterraine. L'utilisation agricole (bétail et culture) de l'eau souterraine est estimée à 17 %. Le terme *pompage diffus* est employé ci-dessous pour désigner l'effet combiné de l'exploitation destinée aux installations domestiques, à l'élevage de bétail, aux cultures maraîchères et aux terrains de golf.

Notons que le bilan de l'utilisation anthropique de l'eau souterraine est approximatif, compte tenu qu'il est impossible de réaliser un inventaire ponctuel et exhaustif de tous les utilisateurs d'eau souterraine. Néanmoins, certaines mesures demeurent ponctuelles et exactes, comme les volumes d'eau pompée par les puits municipaux et les puits d'embouteillage d'eau commerciale. Les principales incertitudes quant à l'estimation des volumes concernent la provenance de l'eau souterraine pompée pour l'exploitation des carrières (précipitations directes et infiltration indirecte par les cours d'eau), les pratiques d'irrigation des cultures (maraîchères et horticoles) et des terrains de golf, la provenance de l'eau pour l'élevage du bétail (eau de surface ou eau souterraine), ainsi que la variabilité par municipalité de la consommation des puits domestiques.

Productivité apparente des puits

La productivité apparente des puits domestiques peut être tirée du Système d'information hydrogéologique (SIH) du ministère de l'Environnement du Québec. Les débits des puits sont estimés par les foreurs lors de l'installation des puits. Il est utile de représenter sur une carte la distribution spatiale des débits apparents (fig. 56). Après un lissage élevé

des isolignes de la productivité, il n'existe pas de tendance particulière dans la distribution des débits. Les valeurs les plus fréquentes se trouvent entre 100 et 250 m³/d. Dans la partie centrale à l'ouest de l'aéroport de Mirabel, il existe des îlots d'une productivité plus élevée (> 500 m³/d par puits) qu'ailleurs sur le territoire d'étude.

On a utilisé la moyenne arithmétique des débits pour obtenir le débit moyen des puits domestiques pour l'ensemble de la région. Au total, 1874 données du SIH ont été utilisées. Les débits moyens des puits forés dans les quatre principaux types de roches, par unité d'épaisseur de la formation rocheuse interceptée par les puits, se trouvent entre 73 et 192 m³/d (tableau 14). Les dolomies sont les roches les plus productives, tandis que les roches précambriennes sont les moins productives. Le débit moyen apparent pour l'ensemble des puits est de l'ordre de 147 m³/d (100 L/min) et la profondeur moyenne de ces puits est d'environ 15 m.

Les puits municipaux, quant à eux, ont une productivité relativement plus élevée. Habituellement, une recherche en eau souterraine se fait par le forage de plusieurs puits, et seuls les puits les plus productifs sont aménagés pour le pompage. Le tableau 15 présente les débits de pompage aux puits municipaux. Le débit moyen est de 462 m³/d.

Sommaire sur l'utilisation anthropique de l'eau souterraine

L'utilisation anthropique totale de l'eau souterraine pour tout le territoire d'étude est de 14,8 x 10⁶ m³/a, équivalant à une lame d'eau de 10,9 mm/a. Puisque la recharge moyenne annuelle est évaluée à 45 mm/a (partie I, section « Infiltration des précipitations »), on en déduit que l'utilisation humaine de l'eau souterraine extrait environ 24 % de l'alimentation annuelle de l'aquifère. Toutefois, une meilleure estimation de cette proportion pourra être avancée après révision du bilan hydrologique régional par modélisation numérique (voir la section « Modèle numérique régional » ci-dessous).

Tableau 13. Répartition de l'utilisation anthropique de l'eau souterraine par type d'activité.

Type d'utilisation	Extraction de l'eau souterraine			
	Volume (m ³ /a)	%	Volume (m ³ /a)	%
Aqueducs	3 923 249	26,5	6 143 419	41,5
Puits domestiques ¹	2 220 170	15,0		
Cultures ¹	1 217 475	8,2	2 529 833	17,1
Bétail ¹	1 312 358	8,9		
Golfs ¹	84 999	0,6	6 121 279	41,4
Embouteillage	504 576	3,4		
Carrières	5 531 704	37,4		
Total	14 794 531	100	14 794 531	100

¹ Ces types d'exploitation contribuent à ce qui est appelé dans le texte le *pompage diffus*.

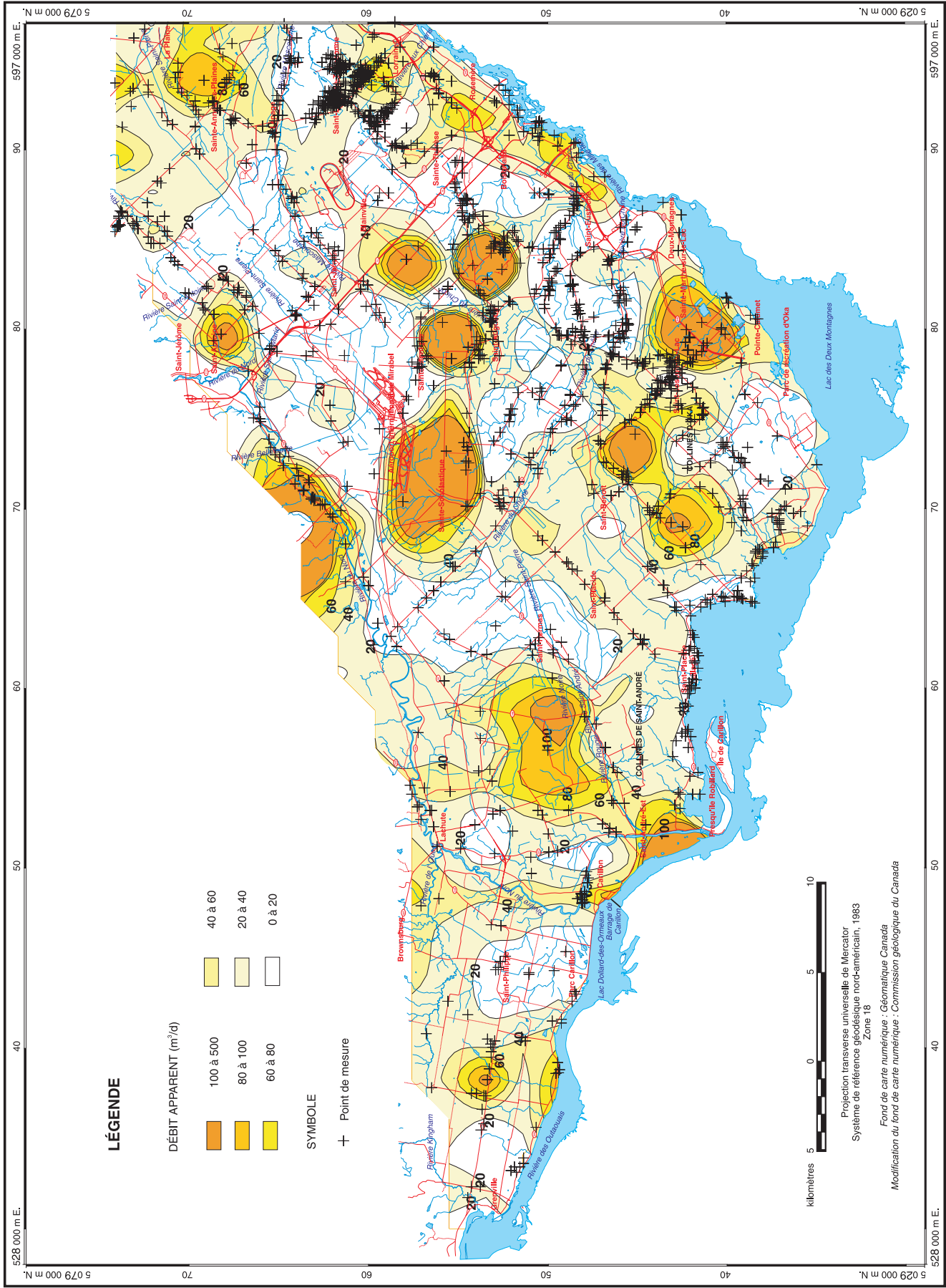


Figure 56. Productivité apparente des puits domestiques complétés dans l'aquifère rocheux. (Figure créée par M. Nastev.)

Tableau 14. Débit apparent des puits domestiques selon le type de roche rencontré. Les moyennes arithmétiques du débit sont employées.

Type de roche	Nombre de puits par fourchette de débit						Nombre total de puits	Débit moyen (m ³ /d)
	0-50 (m ³ /d)	50-100 (m ³ /d)	100-200 (m ³ /d)	200-500 (m ³ /d)	500-1000 (m ³ /d)	> 1000 (m ³ /d)		
Calcaires	414 (50,5 %) ¹	241 (29,45 %)	96 (11,75 %)	60 (7,35 %)	5 (0,65 %)	4 (0,55 %)	820 (100 %)	120,9
Dolomies	123 (21,55 %)	138 (24,15 %)	151 (26,45 %)	115 (20,15 %)	31 (5,45 %)	14 (2,45 %)	572 (100 %)	192,3
Grès	97 (32,25 %)	68 (22,65 %)	71 (23,65 %)	42 (14,05 %)	19 (6,35 %)	4 (1,35 %)	301 (100 %)	168,6
Roches précambriennes	92 (56,45 %)	33 (20,25 %)	27 (16,65 %)	10 (6,15 %)	1 (0,65 %)	- (0,05 %)	163 (100 %)	73,8
Roches du Crétacé	2 (11,15 %)	5 (27,85 %)	6 (33,35 %)	5 (27,85 %)	- (0,05 %)	- (0,05 %)	18 (100 %)	165,9
Tous types de roches confondus	570 (30,45 %)	530 (28,35 %)	424 (22,65 %)	253 (13,55 %)	72 (3,85 %)	25 (1,35 %)	1874 (100 %)	146,7

¹ La valeur entre parenthèses représente le pourcentage des puits dont le débit moyen se situe dans cette fourchette.

Tableau 15. Débits de pompage des puits municipaux, avec coordonnées UTM.

Nom du puits	Coordonnées UTM (zone 18, NAD83 ¹)		Débit	
	Est (m)	Nord (m)	(m ³ /d)	(m ³ /a)
Ghyslaine	579680	5053391	220,7	0,081
Mackenzie	571564	5063249	245,3	0,090
Philippon	570438	5061779	302,8	0,111
Allée des Pins/Sainte-Marguerite	582174	5067170	26,5	0,010
Richer Sainte-Marguerite	580661	5065471	17,8	0,006
Mousseau Sainte-Marguerite	581420	5066358	8,7	0,003
Sainte-Scholastique	570827	5055872	174,7	0,064
Route 148	562731	5051038	53,4	0,019
Sainte-Monique	577804	5057240	6,1	0,002
Saint-Benoît	568863	5048250	83,3	0,030
Charles	583258	5060928	1 808,2	0,660
Sainte-Anne 1-2-5	592448	5068239	337,2	0,123
Sainte-Anne 8	591214	5068642	22,7	0,008
Sainte-Anne, puits Leclerc	593449	5068754	47,8	0,017
Pénitencier	588729	5066549	300,0	0,110
Sainte-Anne 390	589426	5067735	3 815,3	1,393
Saint-André Village	552090	5049754	529,9	0,193
Calumet	528582	5055546	174,9	0,064
Chatham	544347	5052700	155,6	0,057
Parc Paroisse Oka	574755	5034805	1 305,8	0,477
Saint-Placide	561759	5041833	68,1	0,025
Débit total			10 167	3,71

¹ NAD83 = Système de référence géodésique nord-américain, 1983

Le débit moyen des puits domestiques dans la région est de 147 m³/d. Les dolomies sont les roches les plus productives. Le taux moyen de pompage aux puits municipaux est de 462 m³/d.

MODÈLE NUMÉRIQUE RÉGIONAL

Un modèle numérique tridimensionnel a été conçu au moyen du logiciel FEFLOW® (Finite Element subsurface FLOW system) afin d'intégrer l'information recueillie lors de cette étude et de répondre aux objectifs principaux du projet. FEFLOW est un logiciel d'écoulement souterrain en éléments finis, très sophistiqué, avec un puissant outil de visualisation de données d'entrée (Diersch, 1998a, b). Le logiciel est particulièrement approprié pour des systèmes aquifères complexes impliquant plusieurs unités hydrostratigraphiques et des conditions aux limites variables. Outre l'écoulement saturé en régime permanent ou transitoire, ce logiciel considère l'écoulement en fonction de la densité des fluides et du transport de masse et de chaleur. Étant donné la densité élevée de fractures et l'échelle du modèle numérique,

un milieu poreux équivalent et l'approche de continuum ont été adoptés pour les simulations de l'écoulement. Le modèle a été calé selon les conditions réelles de l'écoulement en régime permanent, c'est-à-dire la piézométrie mesurée dans les roches fracturées (fig. 23).

Construction du modèle numérique

Le domaine considéré coïncide approximativement avec les limites de la région étudiée; il couvre 1220 km² et comprend un volume de 301 km³. Le modèle consiste en sept couches hydrostratigraphiques représentant l'aquifère régional depuis la surface de la séquence rocheuse jusqu'à la base de l'aquifère (tableau 16) : la couche 1 désigne l'unité mixte (les roches très fracturées et le sable-gravier), les couches 2 à 5 représentent les roches fracturées, tandis que les couches 6 et 7 représentent les roches massives moins perméables. Horizontalement, le modèle est discrétisé en 24 458 éléments finis (prismes triangulaires) et 12 559 nœuds par couche, ou 171 206 éléments finis et 100 472 nœuds au total (fig. 57). Pour faciliter la convergence du modèle dans des

Tableau 16. Paramètres hydrauliques pour les diverses unités hydrostratigraphiques du modèle conceptuel.

Couche n°	Unité hydrostratigraphique	Porosité effective	Coefficient d'emmagasinement	Conductivité hydraulique (m/s)	
				Horizontale	Verticale
1	Sable-gravier et roches très fracturées	0,1	0,0007	K_h^1 (paramètre de calage, fig. 60)	$0,1 K_h$
2-5	Roches fracturées	0,01	0,0004	K_{rf}^2 , $0,75 K_{rf}$, $0,5 K_{rf}$, $0,25 K_{rf}$	$0,1 K_{rf}$
6-7	Roches massives peu perméables	0,001	0,0004	1×10^{-8}	1×10^{-9}

¹ K_h = conductivité hydraulique de l'unité mixte
² K_{rf} = conductivité hydraulique des roches fracturées

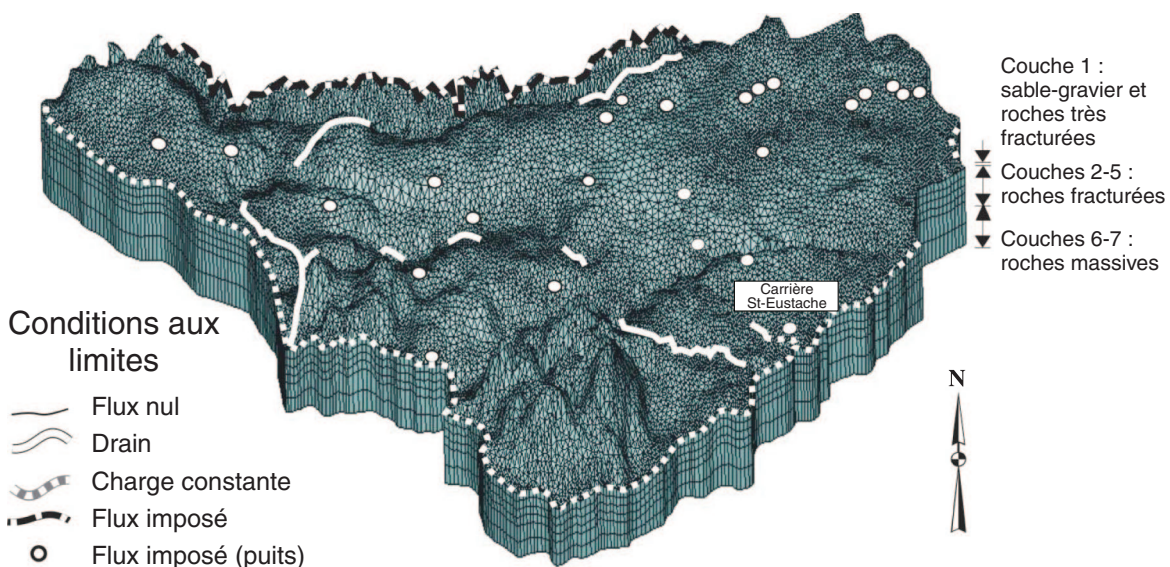


Figure 57. Maillage d'éléments finis avec les conditions aux limites du modèle numérique.

Tableau 17. Paramètres statistiques des résidus, ϵ , pour les neuf simulations de base.

Simulation		Moyenne (ϵ) (m)	Moyenne $ \epsilon $ (m)	RMSE ¹ (ϵ) (m)
a)	Finale	0,5	4,9	6,6
b)	$K_1 = K_2 = \dots = K_5 = K_r^2$	5,6	7,9	12,3
(c) à (i) : $K_1 = K_2 = \dots = K_5 = K_g^3$				
c)	$K_g = 2,0 \times 10^{-5}$ m/s	7,7	12,9	16,8
d)	$K_g = 2,6 \times 10^{-5}$ m/s	3,9	10,1	13,3
e)	$K_g = 3,0 \times 10^{-5}$ m/s	2,0	9,0	12,1
f)	$K_g = 4,0 \times 10^{-5}$ m/s	-1,2	7,5	11,0
g)	$K_g = 5,0 \times 10^{-5}$ m/s	-3,4	7,2	11,1
h)	$K_g = 6,0 \times 10^{-5}$ m/s	-5,1	7,5	11,7
i)	$K_g = 7,0 \times 10^{-5}$ m/s	-6,6	8,2	12,4

¹ RMSE = erreur quadratique moyenne
² K_r = conductivité hydraulique des roches fracturées
³ K_g = moyenne géométrique unique de la conductivité hydraulique

zones avec un fort gradient hydraulique, le maillage d'éléments finis a été raffiné le long des limites du domaine, le long des rivières les plus importantes, ainsi qu'à proximité des collines d'Oka et de celles de Saint-André.

Pour les nœuds de la couche 1 situés le long des rivières en contact hydraulique avec les aquifères régionaux, les conditions aux limites du modèle sont définies comme des drains qui évacuent seulement l'eau du système. Le long de la limite sud, et pour les nœuds représentant la rivière du Chicot à proximité de la carrière St-Eustache, des charges constantes ont été attribuées (fig. 57). Un flux latéral est imposé à la limite nord. Il représente le taux d'écoulement en provenance des Laurentides, qui est de $9,9 \times 10^{-6}$ m³/m²/s (env. 0,85 m³/m²/d) pour les couches de roches fracturées et de $1,8 \times 10^{-9}$ m³/m²/s (env. 0,05 m³/m²/d) pour le roc massif. Ce flux est contraint par la piézométrie du système aquifère fracturé. Pour les mailles où la piézométrie simulée dépasse celle mesurée sur le terrain, le flux décroît et il peut même changer de direction si trop d'eau entre dans la maille donnée. Aucun flux n'est spécifié aux autres limites latérales, qui coïncident habituellement avec les lignes de partage des eaux ou sont parallèles aux lignes d'écoulement. Un taux de pompage constant est imposé aux nœuds représentant la section ouverte des puits les plus importants de la région (tableau 15). Un taux de pompage diffus de 4 mm/a réparti uniformément à la surface du modèle représente la somme des débits pompés aux puits privés pour des fins agricoles et récréatives (terrains de golf) (tableau 13). À la surface supérieure du modèle est assigné un flux vertical égal à la recharge estimée (voir la section « Évaluation de la recharge » à la partie I). Enfin, la base du modèle est considérée comme une limite à flux nul.

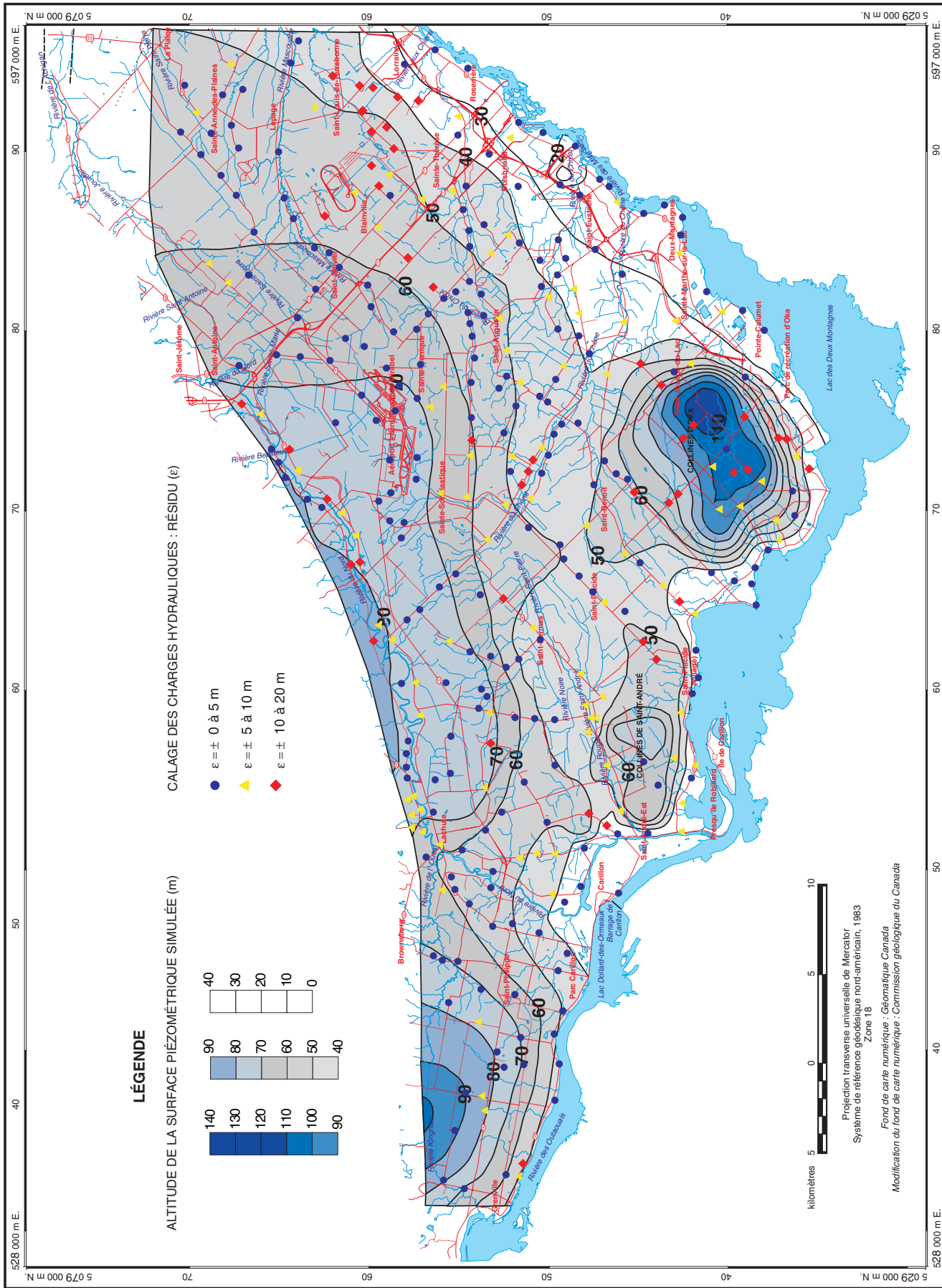
Calage du modèle numérique

Une série de simulations en régime permanent a été réalisée pour caler le modèle numérique selon les conditions réelles d'écoulement et pour estimer la sensibilité de certains paramètres hydrogéologiques. Le calage a été effectué en comparant la piézométrie des roches fracturées, obtenue à partir de 350 points de contrôle (fig. 23), avec la charge hydraulique simulée pour la couche 1. Les taux de résurgence vers les rivières ont également été comparés avec les débits de ces cours d'eau.

La définition précise de l'architecture tridimensionnelle du modèle hydrostratigraphique a rendu la tâche du calage relativement simple, réduisant pratiquement l'incertitude à deux paramètres : la conductivité hydraulique de la couche 1 et la distribution du taux de recharge. La conductivité hydraulique horizontale de la couche 2, établie d'après les résultats de terrain (fig. 22), est fixe pour la simulation finale (tableau 17, ligne (a)). Pour représenter la diminution de transmissivité observée à l'aide des essais d'injection à charge constante, la conductivité hydraulique horizontale de chacune des couches 3, 4 et 5 a été diminuée uniformément de 25 % pour chaque couche en prenant la valeur de la conductivité hydraulique de la couche 2 comme valeur de base (c.-à-d. couche 3 : 75 % de la valeur de la couche 2, couche 4 : 50 %, couche 5 : 25 %) (tableau 16). Les autres paramètres, tels les conditions aux limites, la conductivité hydraulique, l'épaisseur des autres couches, etc., ont été considérés comme connus et ne contribuant pas à l'incertitude des résultats de simulations.

Le calage a été effectué par itération (essais et erreurs) jusqu'à ce qu'une similitude raisonnable entre la piézométrie mesurée et la piézométrie modélisée ait été obtenue (fig. 58). D'abord, l'épaisseur de la couche 1 étant fixée à 2 m, une distribution de la conductivité hydraulique égale à celle de la couche 2 ($K_1 = K_2$) a été considérée. Ensuite, en supposant sur la base du modèle fluvio-glaciaire que l'épaisseur de la couche 1 est plus importante dans les vallées enfouies, la conductivité hydraulique y a été amplifiée. Dans les zones où les dépôts quaternaires épais sont absents, la conductivité hydraulique de la couche 1 a été supposée égale à celle de la couche 2. Quant au taux annuel de recharge, il a été fixé entre 0 et 350 mm, ces deux extrêmes correspondant à des zones de sédiments fins (argiles) et d'affleurements rocheux, respectivement.

Pour déterminer la sensibilité du modèle numérique à la variation de la conductivité hydraulique, plusieurs simulations ont été effectuées (tableau 17) : a) modélisation finale avec la conductivité de la couche 1 et le taux de recharge calés; b) conductivité de la couche 1 variable et égale à celle de la couche 2 (fig. 59), tous les autres paramètres comme pour (a); c) à i) conductivité uniforme des couches 1 à 5, comme présenté au tableau 17; tous les autres paramètres comme pour (a). La précision d'une simulation est évaluée par le paramètre statistique du résidu (erreur de la simulation), ϵ , dont la valeur est égale à la différence entre le niveau d'eau mesuré



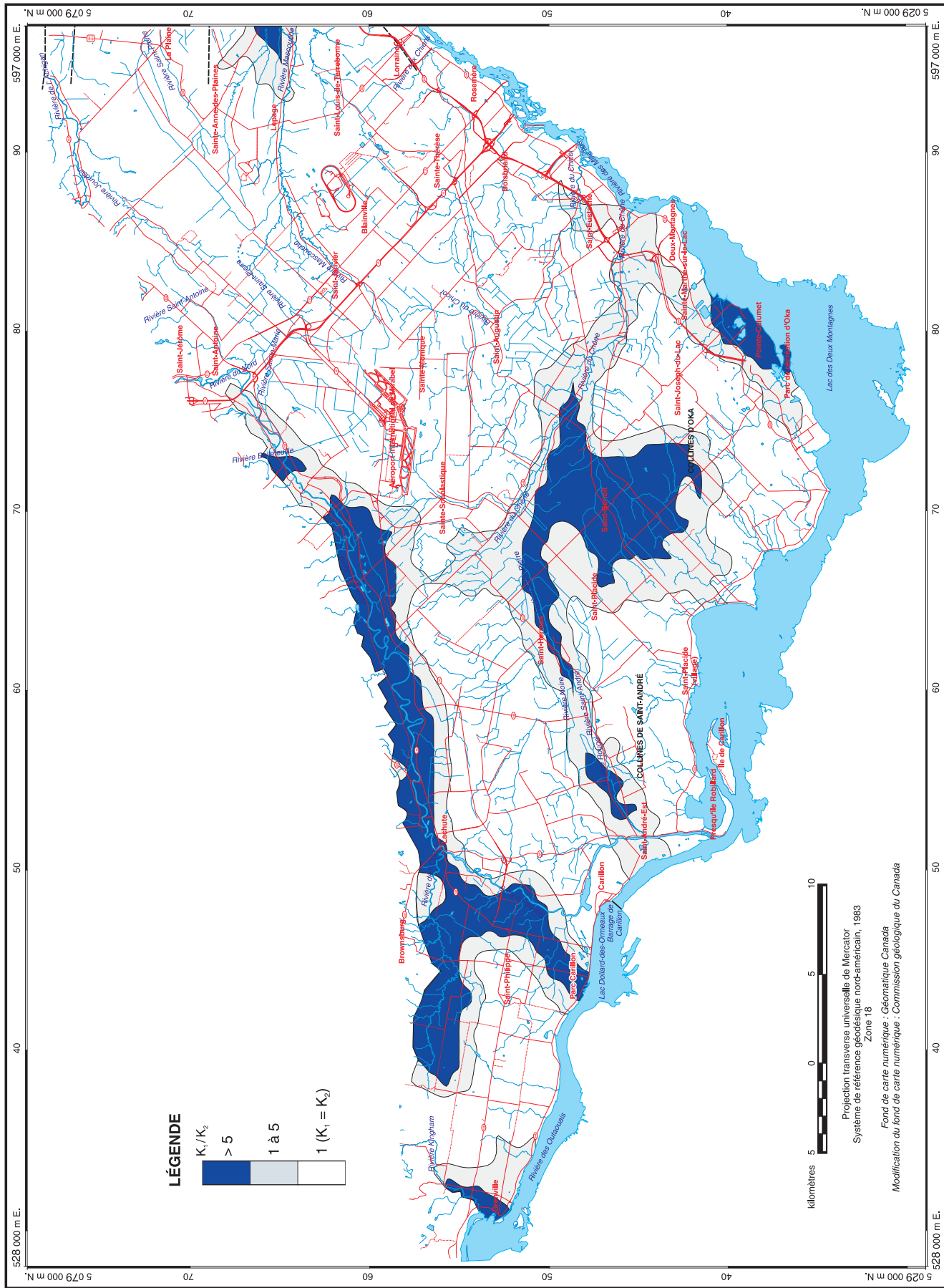


Figure 59. Distribution spatiale du ratio des conductivités hydrauliques simulées de l'unité mixte (K_1) et de la couche 2 de l'unité de roches fracturées (K_2).

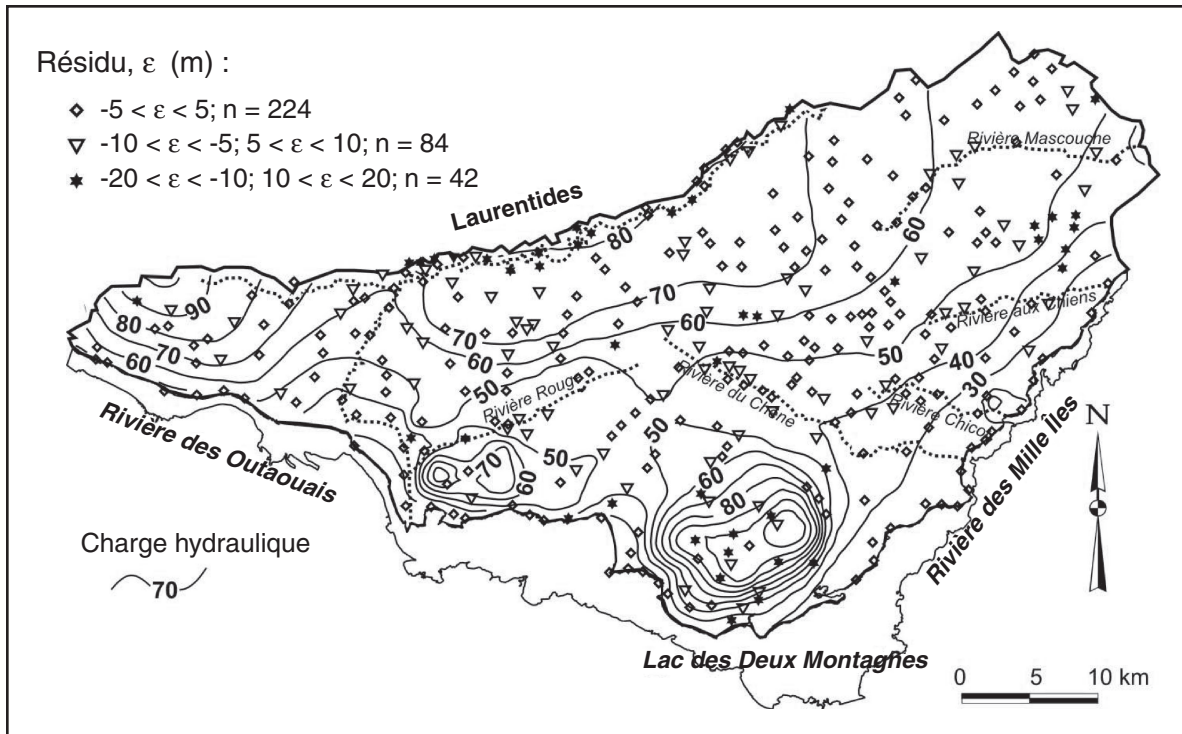


Figure 60. Charge hydraulique simulée en régime permanent pour la couche 2 (roches sédimentaires fracturées).

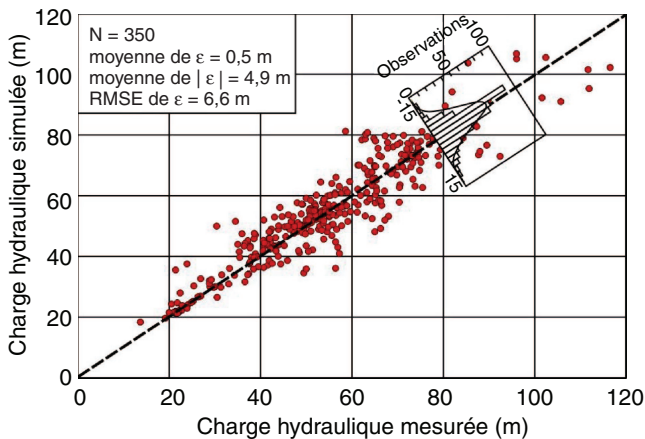


Figure 61. Comparaison des charges hydrauliques mesurées et simulées pour la couche 2. ε = résidu; RMSE = erreur quadratique moyenne.

dans chacun des 350 points de contrôle et celui simulé pour la couche 1, soit la première couche dans la portion aquifère constituée de roches fracturées.

La conductivité hydraulique calée de la couche 1 (unité mixte) constitue un paramètre important et contribue à une meilleure simulation des charges hydrauliques. Pour la simulation finale, (a), la moyenne de la valeur absolue de la différence entre les piézométries mesurée et simulée ($|\varepsilon|$) est de 4,9 m, avec une erreur quadratique

moyenne (*root-mean-square error*, ou RMSE) de 6,6 m (Nastev et al., 2005). Pour la simulation (b), qui suppose une conductivité hydraulique de la couche 1 variable et égale à celle de la couche 2, $|\varepsilon|$ est de 7,9 m, et l'erreur quadratique moyenne, de 12,3 m. Les résidus provenant des simulations (c) à (i), qui supposent une conductivité hydraulique K_1 à K_5 uniforme en gardant tous les autres paramètres comme pour la simulation (a), suggèrent que si une seule valeur de la conductivité hydraulique horizontale était considérée pour les roches sédimentaires fracturées (couches 1 à 5), elle serait de l'ordre de $4,0 \times 10^{-5}$ m/s, ou tout près de la moyenne géométrique estimée au tableau 17, soit $2,6 \times 10^{-5}$ m/s.

La charge hydraulique de la couche 2 pour la simulation finale, (a), est présentée à la figure 60. Les résidus de la même simulation sont présentés à la figure 61. On suppose que les résidus ont une distribution normale par rapport à la ligne 1:1 (charge hydraulique simulée = charge hydraulique observée).

Il est utile de montrer la distribution du ratio de conductivité hydraulique calée entre la couche 1, qui représente l'unité mixte, et la couche 2, représentant les premiers 25 m de roches fracturées (fig. 59). Puisque la conductivité hydraulique de la couche 1 est directement reliée à son épaisseur, ces deux paramètres sont beaucoup plus élevés aux endroits où on trouve des vallées enfouies sous les lits des rivières actuelles.

Modèle numérique tridimensionnel produit

Le modèle numérique tridimensionnel mis au point afin d'intégrer l'information recueillie lors de cette étude et d'évaluer le débit durable de la ressource couvrant 1220 km² et comprend un volume de 301 km³. La première couche du modèle désigne l'unité mixte, et les six couches les plus profondes représentent les roches fracturées. Le modèle numérique a été calé selon la piézométrie observée sur le terrain. La moyenne de la valeur absolue de la différence entre la piézométrie mesurée et la piézométrie simulée est de 4,9 m, avec une erreur quadratique moyenne (*RMSE*) de 6,6 m. Même si à première vue ces valeurs pourraient sembler trop élevées, elles ne le sont pas pour une région couvrant 1220 km². Elles doivent être considérées d'abord dans la perspective de la précision avec laquelle ont été estimées les altitudes des points de contrôle, qui est elle-même de l'ordre de ± 5 m. Ceci est en fait la précision inhérente du modèle numérique d'altitude. Cette incertitude, ainsi que les fluctuations des niveaux de la nappe, qui vont de 0,7 à 3,8 m, doivent être considérées lors de l'interprétation des résultats obtenus. Une analyse de la sensibilité du modèle numérique a montré que diverses simulations à l'aide de la conductivité hydraulique de la couche 1 permettent d'améliorer le modèle numérique. Les simulations ont permis de conclure que si une seule valeur de conductivité était considérée pour les roches fracturées, elle devrait se situer entre $2,6 \times 10^{-5}$ et $7,0 \times 10^{-5}$ m/s.

Les avantages de ce modèle numérique sont qu'il permet d'avoir une vision globale des conditions effectives de l'aquifère et qu'il représente un outil indispensable pour la prédiction de l'écoulement souterrain de la ressource en eau souterraine.

Enfin, le modèle numérique a permis de confirmer l'hypothèse selon laquelle les dépôts fluvioglaciers perméables (sable-gravier) se trouvent souvent dans des dépressions rocheuses et sont parallèles à l'axe des vallées enfouies.

DISPONIBILITÉ EN EAU SOUTERRAINE

Le modèle numérique calé a été utilisé pour définir le bilan d'eau global de la région étudiée et pour présenter plusieurs scénarios d'extraction accrue d'eau souterraine. De plus, des simulations de diminution du taux de recharge ont été produites de manière schématique pour prédire la réponse de l'aquifère régional aux changements climatiques.

Simulation de la recharge régionale

Lors du calage, des modifications ont été apportées à la distribution initialement estimée du taux de recharge (fig. 62). Ces modifications ont été effectuées pour ajuster les niveaux d'eau, surtout le long des lignes de partage des eaux qui coïncident avec les limites des bassins versants. Avec ces modifications, le taux total de recharge de l'aquifère

régional est estimé à $84,7 \times 10^6$ m³/a, correspondant à une lame d'eau uniforme de 69 mm, soit 6,6 % de la précipitation moyenne annuelle pour la région (1046,8 mm). Notons que le taux moyen de recharge avait initialement été estimé à $61,1 \times 10^6$ m³/a ou 45 mm/a (approche de Darcy; tableau 11 et Hamel, 2002). Évidemment, il s'agit de deux approches différentes d'estimation de la recharge, et conséquemment les résultats diffèrent. De plus, la superficie considérée lors de l'étude de la recharge par l'approche de Darcy était de 1341,6 km², tandis que le domaine de 1220 km² simulé par le modèle numérique exclut une large portion du territoire couvert d'argile. Ceci contribue aussi à l'écart des deux estimations du taux de recharge.

Bilan d'eau global pour le système aquifère régional

Six composantes contribuent au bilan d'eau du système aquifère : les flux découlant des drains et de la charge imposée le long des rivières (recharge des berges), le flux latéral imposé à la limite nord de la région, la recharge directe par précipitation, et enfin les flux sortant de l'aquifère régional, résultant de la combinaison du pompage par des puits majeurs et du pompage diffus. Les taux annuels de ces flux sont donnés à la figure 63. Les deux composantes les plus importantes sont certainement la recharge, discutée à la section précédente, et les résurgences vers les rivières de la région. Le flux sortant vers les drains simulant les cours d'eau est de $35,8 \times 10^6$ m³/a; il est de $39,3 \times 10^6$ m³/a vers la rivière des Outaouais et la rivière des Mille Îles, soit sur toute l'étendue de la limite sud de l'aquifère régional. Le flux entrant (recharge des berges) de $3,7 \times 10^6$ m³/a dû à la charge constante résulte du pompage à la carrière St-Eustache. Le flux entrant imposé à la limite nord de la région au contact entre les roches précambriennes et les roches sédimentaires contribue $9,4 \times 10^6$ m³/a. Enfin, le taux de pompage de l'eau souterraine appliqué dans le modèle numérique est de 18×10^6 m³/a (soit 18,4 % de l'écoulement régional, qui est de $97,7 \times 10^6$ m³/a). Ce taux de pompage représente l'extraction totale, qui comprend une portion d'eau de surface tirée dans la partie sud du territoire d'étude. Ce taux est donc plus élevé que l'extraction humaine de $14,8 \times 10^6$ m³/a d'eau souterraine estimée plus haut dans la section « Utilisation de l'eau souterraine ». En fait, le taux de 18×10^6 m³/a résultait d'un ajustement du taux de pompage basé sur les résultats des simulations numériques pour tenir compte de la contribution de la rivière des Mille Îles.

À l'aide du modèle numérique, il est possible d'estimer le taux de résurgence vers les rivières de la région. Au tableau 18, ces taux sont comparés avec ceux obtenus par la séparation des hydrogrammes. Il est à noter que la méthode de séparation des hydrogrammes donne le flux total des résurgences vers les rivières et ne fait pas la distinction entre les contributions des divers aquifères. Le taux de résurgence simulé, par contre, provient uniquement de l'aquifère fracturé régional. (Le reste des résurgences provient du drainage des bassins versants à travers les formations géologiques superficielles.)

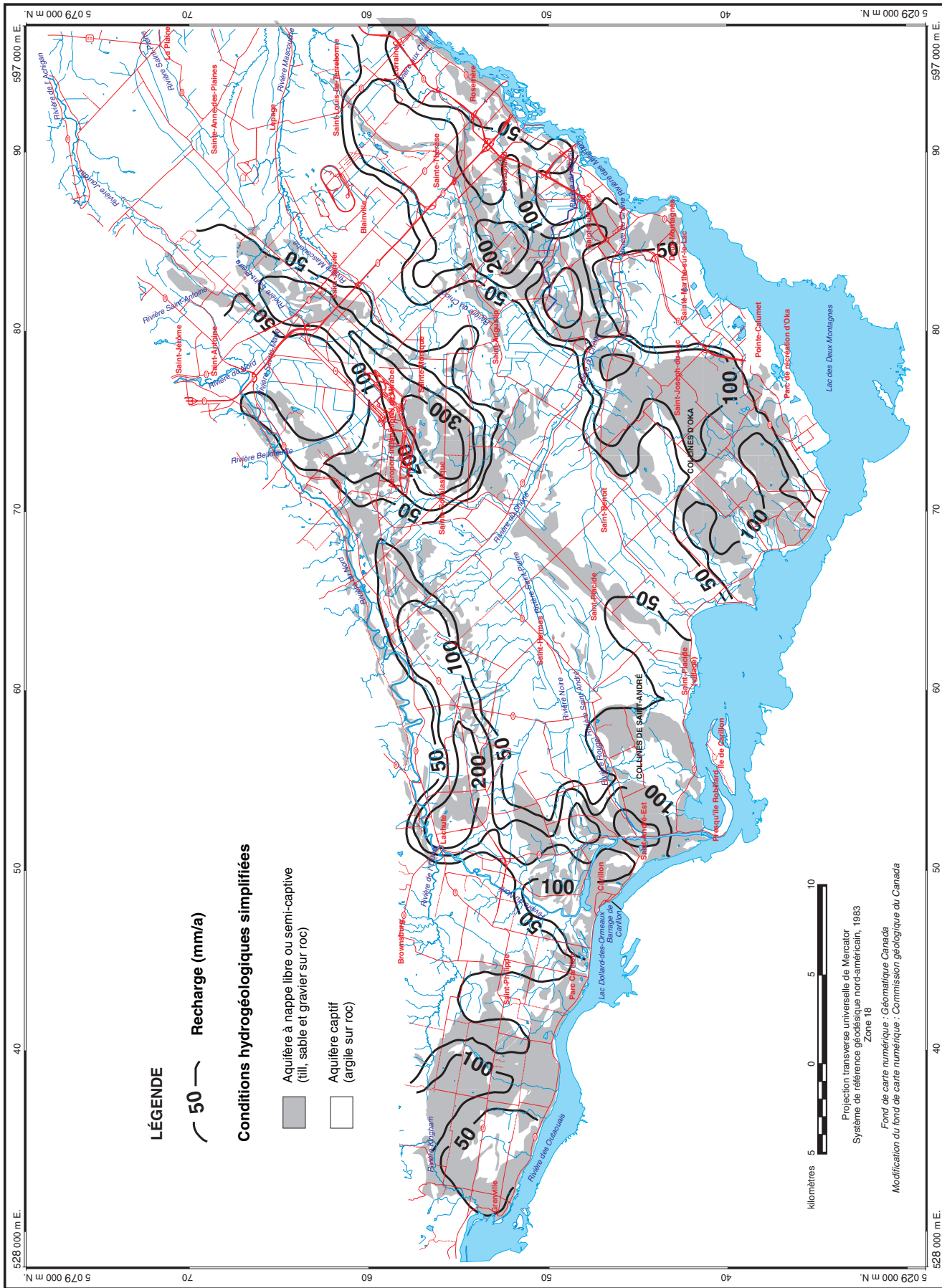


Figure 62. Recharge simulée de l'aquifère rocheux. (Figure créée par M. Nastev.)

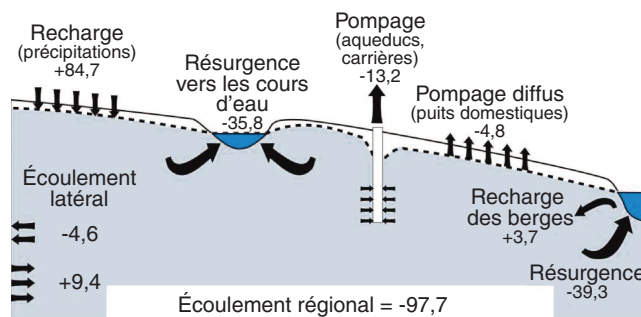


Figure 63. Bilan global de l'aquifère (flux exprimés en valeurs de $10^6 \text{ m}^3/\text{a}$).

Tableau 18. Comparaison des taux de résurgence estimés par la séparation des hydrogrammes des rivières avec ceux simulés par la modélisation de l'écoulement du système aquifère.

Rivière	Taux annuel moyen des résurgences ($\times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$)		
	Débit de base par séparation des hydrogrammes	Simulation pour le système aquifère fracturé	% ¹
Rivière du Nord ²	652,46	13,3	2,0
Rivière du Chêne	50,56	15,2	30,1

¹ (Colonne 3 / colonne 2) x 100 %
² Entre Lachute et Saint-André-Est

La dernière colonne du tableau 18 présente le rapport entre ces deux taux de résurgence, c'est-à-dire la contribution de l'aquifère régional au flux de base des rivières. Cette contribution s'élève à 2,0 et 30,1 %, respectivement, pour la rivière du Nord et la rivière du Chêne. Il est à noter que des parties importantes du bassin versant de la rivière du Nord ne sont pas considérées dans le modèle numérique. Pour cette comparaison, seule la portion entre Lachute et Saint-André-Est a été visée. Le faible taux de résurgence de la rivière du Nord est dû principalement à l'hydrostratigraphie de son bassin versant. Le lit de la rivière est encaissé en majeure partie dans une couche de sédiments marins fins (argile et silt). La faible perméabilité de ces sédiments empêche le contact hydraulique entre les eaux de surface et l'aquifère régional, et le flux de la rivière provient alors surtout du ruissellement de surface et du drainage superficiel, impliquant très peu d'échange avec l'aquifère rocheux. Par contraste, le débit de base de la rivière du Chêne qui provient de l'aquifère fracturé représente une bien plus grande proportion (30,1 %) du débit total. Le bassin versant de cette rivière englobe des aquifères en conditions de nappe captive et de nappe libre. Ainsi, la contribution de l'aquifère régional au débit de base de cette rivière est plus importante.

Il est intéressant d'estimer le bilan annuel simulé pour la carrière St-Eustache. Cette carrière est l'endroit où la plus grande quantité d'eau souterraine est extraite de l'aquifère régional. Les deux rivières à proximité de la carrière, la rivière du Chicot et la rivière des Mille Îles, ont été simulées par une limite à charge constante permettant l'entrée d'eau dans le modèle. La modélisation numérique régionale démontre qu'environ 45 % de l'eau pompée à la carrière provient actuellement des cours

Tableau 19. Bilan hydrologique estimé au site de la carrière St-Eustache.

Taux de pompage	Volume	
	($\times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$)	(%)
En provenance des rivières	3,68	44,8
(1) Rivière du Chicot	3,3	40,6
(2) Rivière des Mille Îles	0,4	4,2
En provenance de l'aquifère régional	4,52	55,2
Total	8,20	100

d'eau, tandis que 55 % provient de l'écoulement souterrain dans l'aquifère fracturé en amont de la carrière (tableau 19). Ces taux sont dérivés du modèle de l'écoulement régional et sont considérés dans la section « Sommaire sur la disponibilité en eau souterraine » ci-dessous.

Volume emmagasiné

Dans les roches sédimentaires, l'eau souterraine est emmagasinée dans les pores intergranulaires et dans les fractures; ces volumes combinés correspondent à la *porosité totale* de la roche. Toutefois, l'écoulement souterrain se fait principalement par les fractures ouvertes interconnectées, dont le volume est désigné par le terme *porosité effective*. L'eau emmagasinée dans ces fractures est donc celle qui est disponible pour le pompage, et ce sont ces fractures qui contribuent à la perméabilité des roches fracturées. Deux volumes peuvent alors être évalués pour définir la quantité

d'eau dans les aquifères fracturés : le volume total d'eau emmagasinée, défini par la porosité totale, et le volume d'eau qui peut être réellement extrait de l'aquifère, défini par la porosité effective ou le coefficient d'emmagasinement (rapport entre le volume d'eau emmagasinée par unité de surface d'aquifère et la différence de charge hydraulique).

La porosité totale des roches sédimentaires (grès, dolomie et calcaire) se situe habituellement entre 1 et 5 %. Ainsi, pour une épaisseur de l'aquifère régional fixée à 100 m et une superficie de la région de 1220 km², le volume total d'eau emmagasiné varie entre 1,22 x 10⁹ et 6,1 x 10⁹ m³ (env. 1 et 6 km³). Il est à noter que l'épaisseur de 100 m considérée constitue une valeur relativement prudente. Il s'agit d'une profondeur pour laquelle les installations (puits) et l'exploitation (pompage) de l'eau souterraine sont économiques. Cette épaisseur constitue aussi la partie du système aquifère qui contribue majoritairement à l'écoulement régional et qui est actuellement la plus utilisée pour l'alimentation en eau souterraine. Évidemment, des quantités d'eau sont aussi présentes à de plus grandes profondeurs.

Sommaire sur la disponibilité en eau souterraine

Le modèle numérique permet d'estimer le taux total de recharge de l'aquifère régional à 84,7 x 10⁶ m³/a, ce qui correspond à une lame d'eau uniforme de 69 mm. Ce taux représente 6,6 % de la précipitation annuelle moyenne pour la région (1046,8 mm).

Une nouvelle estimation de la recharge, et du pompage de l'eau souterraine à la carrière St-Eustache, implique que les activités humaines extraient 18,4 % du volume d'eau qui entre annuellement dans la région (fig. 63), ce qui constitue une réévaluation à la baisse relativement à l'estimation obtenue par les mesures de l'infiltration ou le calcul du débit de base des rivières (partie I, « Évaluation de la recharge »).

Pour une porosité totale variant entre 1 et 5 %, une épaisseur fixe de l'aquifère régional de 100 m et une superficie régionale de 1220 km², le volume total d'eau emmagasiné varie entre 1,22 x 10⁹ et 6,1 x 10⁹ m³ (de 1 à 6 km³). De ce volume, seule l'eau emmagasinée dans des fractures communicantes (porosité effective) est disponible pour le pompage.

ÉVALUATION DES DÉBITS DURABLES

Les effets à long terme d'un pompage uniforme accru

Le modèle numérique de l'écoulement régional a été utilisé pour évaluer les effets de l'exploitation de la ressource en eau souterraine. Une première série de simulations de l'exploitation avait pour but de connaître les effets à long

terme d'un pompage accru (pompage actuel imposé dans le modèle + pompage supplémentaire uniforme) sur les niveaux d'eau, en plus des opérations d'exploitation actuelles. Le pompage supplémentaire a été appliqué comme un flux négatif et uniforme aux éléments finis de la couche 1. Pour comparer les résultats plus facilement, les taux de pompage supplémentaire sont exprimés en m³/a ainsi qu'en mm/a. La distribution des rabattements est ainsi simulée et les zones les plus vulnérables au pompage sont définies. Une simulation servant à déterminer les effets du pompage actuel sur la nappe a aussi été réalisée.

L'ajout d'un pompage supplémentaire uniforme, et la comparaison des résultats avec ceux du pompage actuel et des conditions sans pompage, avaient pour but de vérifier la durabilité de la ressource. Au lieu de définir les taux durables, il est préférable d'examiner les rabattements causés par le pompage. Les résultats des divers scénarios sont présentés au tableau 20 sous forme d'un bilan global avec ses composantes, et de la différence moyenne entre la charge hydraulique estimée lors de chaque simulation et celle estimée pour la simulation sans pompage (simulation 1). Pour cet exercice, le taux de pompage additionnel maximal était limité à 40 mm/a puisque les rabattements deviennent trop élevés et irréels au-delà de ce chiffre. Il est à noter que lors de ces simulations aucun apport d'eau n'était permis dans le domaine à partir des cours d'eau lorsque la nappe était sous leur niveau, à l'exception des nœuds de la limite sud et des environs de la carrière St-Eustache. Pour le modèle numérique régional, les rivières intermédiaires ont été simulées comme des drains qui évacuent l'eau du système.

Les résultats présentés au tableau 20 montrent que ce sont les taux de résurgence vers les cours d'eau (drain/charge constante) qui diminuent proportionnellement au taux de pompage, de 94,04 x 10⁶ m³/a dans des conditions sans pompage à seulement 31,75 x 10⁶ m³/a dans le cas d'un pompage uniforme additionnel de 40 mm/a (simulation 10). La simulation 2, modélisant les conditions actuelles de pompage, démontre que la charge hydraulique actuelle des aquifères fracturés est plus basse de 0,6 m en moyenne que s'il n'y avait aucun pompage. Évidemment, les rabattements actuels sont plus importants à proximité des puits majeurs de la région, tandis qu'en s'éloignant des points de pompage intensif, ils deviennent négligeables.

Le pompage à un taux uniforme a un effet sur la charge hydraulique. Cet effet est exprimé par le rabattement médian par rapport à la surface piézométrique résultant d'une simulation sans pompage (tableau 20). On vérifie la dispersion des données relativement à la médiane en extrayant les 25^e et 75^e percentiles (fig. 64). En effet, la valeur de rabattement n'est pas une variable aléatoire; elle est plutôt contrôlée par les conditions hydrogéologiques imposées dans le modèle

Tableau 20. Résultats de la simulation sans pompage (1) et de la simulation finale pour les conditions d'écoulement actuelles (2). Les autres simulations sont présentées pour des taux de pompage uniformes supplémentaires extrayant jusqu'à 40 mm/a de plus que le pompage actuel.

Simulation n°	Pompage uniforme additionnel (mm/a)	Rabattement médian (m)	Drain / charge constante ¹	Flux imposé	Recharge	Pompage uniforme additionnel ¹	Pompage actuel ¹	Bilan ¹
1	Pas de pompage	0,0	-	9,38	84,66	-	-	94,0
			-94,04	0,00	-	-	0,00	-94,0
2	0 (conditions actuelles)	0,6	3,67	9,38	84,66	-	-	97,7
			-79,69	0,00	-	-	-18,07	-97,7
3	5	1,2	3,74	9,38	84,66	-	-	97,8
			-73,66	0,00	-	-6,10	-18,07	-97,8
4	10	2,6	3,81	9,38	84,66	-	-	97,9
			-67,63	0,00	-	-12,20	-18,07	-97,9
5	15	4,0	3,89	9,38	84,66	-	-	98,0
			-61,60	0,00	-	-18,30	-18,07	-98,0
6	20	5,6	3,98	9,38	84,66	-	-	98,1
			-55,59	0,00	-	-24,40	-18,07	-98,1
7	25	7,5	4,09	9,38	84,66	-	-	98,2
			-49,60	0,00	-	-30,50	-18,07	-98,2
8	30	9,2	4,21	9,38	84,66	-	-	98,3
			-43,62	0,00	-	-36,60	-18,07	-98,3
9	35	10,9	4,37	9,38	84,66	-	-	98,5
			-37,68	0,00	-	-42,70	-18,07	-98,5
10	40	12,6	4,54	9,38	84,66	-	-	98,6
			-31,75	0,00	-	-48,80	-18,07	-98,6

¹ Les taux entrants sont indiqués par des chiffres positifs; les taux sortants du domaine modélisé sont indiqués par des chiffres négatifs.

numérique. Les percentiles sont ainsi introduits pour calculer les moyennes statistiques; la médiane représente la valeur pour laquelle 50 % de tous les rabattements sont plus grands et 50 % sont plus petits. La différence entre les 25^e et 75^e percentiles définit la fourchette où se trouvent 50 % de tous les rabattements, les autres 50 % se trouvant à l'extérieur de cette fourchette. La valeur du 75^e percentile indique que 75 % de tous les rabattements sont plus petits et seulement 25 % des rabattements sont plus grands. Le débit de pompage actuel est indiqué avec une flèche à la figure 64, tandis que les autres débits ont été obtenus en y ajoutant les taux de pompage uniformes du tableau 20 (simulations 3 à 10).

La figure 65 présente la distribution spatiale des rabattements obtenus lors d'un pompage uniforme de 6,1 x 10⁶ m³/a, équivalant à une lame d'eau additionnelle de 5 mm par rapport aux conditions actuelles (simulation 3 du tableau 20). Les rabattements les plus élevés sont observés sur les collines d'Oka (extrémité sud du territoire) et de Saint-André (à l'ouest des collines d'Oka). Suivent la zone à l'ouest de Saint-Philippe (extrémité nord-ouest du territoire) et le plateau de Mirabel (au sud de la rivière du Nord). Dans le modèle numérique, il s'agit de zones où la nappe est relativement élevée, caractérisées par des taux de recharge variables. Les zones les moins touchées sont caractérisées par des conditions de résurgence, le long des cours d'eau et des limites sud de la région.

Les effets à long terme d'une diminution de la recharge

La deuxième série de scénarios visait à évaluer les effets à long terme de changements climatiques exprimés par une diminution hypothétique de la recharge. Dans ces simulations, la recharge était diminuée proportionnellement à son taux, tandis que les opérations d'exploitation de l'eau souterraine restaient inchangées. Ceci distingue cette série de simulations par rapport à la série précédente, pour laquelle une lame d'eau uniforme était extraite de l'aquifère rocheux. La recharge étant localisée, une réduction de celle-ci diminue localement l'apport d'eau à l'aquifère. Le tableau 21 résume les résultats des divers scénarios, le bilan global et la différence moyenne entre les charges hydrauliques estimées lors de ces simulations et lors de la simulation dans les conditions d'écoulement actuelles.

Les résultats présentés au tableau 21 ressemblent à ceux des scénarios utilisant un pompage uniforme (tableau 20), et les mêmes conclusions sont valables ici. La diminution de la recharge s'infiltrant vers les aquifères rocheux est équilibrée par des rabattements médians grandissants et par le décroissement des résurgences vers les cours d'eau (drain / charge constante). La relation entre les rabattements médians, les 25^e et 75^e percentiles, et les taux de recharge considérés est présentée à la figure 66. Les rabattements médians de la

charge hydraulique simulée sont entre 0,7 et 9,3 m pour des taux de recharge représentant de 95 à 50 % de la recharge actuelle, respectivement.

La figure 67 montre la distribution spatiale des rabattements simulés pour le cas où 90 % de la recharge actuelle s'infiltrerait vers l'aquifère régional. Les mêmes zones que celles montrées à la figure 65 sont identifiées comme étant les plus sensibles à la réduction de la recharge. Les rabattements les moins élevés sont observés dans les zones de résurgence (le long des cours d'eau et des limites sud de la région).

Les débits durables pour la région étudiée

En résumé, deux séries de simulations ont été réalisées afin de prédire le comportement de l'aquifère régional dans des conditions hypothétiques (un pompage accru et une diminution du taux de recharge).

La première série de simulations a permis de définir les zones les plus vulnérables à un pompage accru. Ce sont surtout les zones de la recharge. Dans les zones de résurgence, l'extraction d'eau est compensée par le flux provenant des zones de recharge. Nous avons aussi défini la courbe reliant le taux de pompage à son effet sur le rabattement de l'aquifère

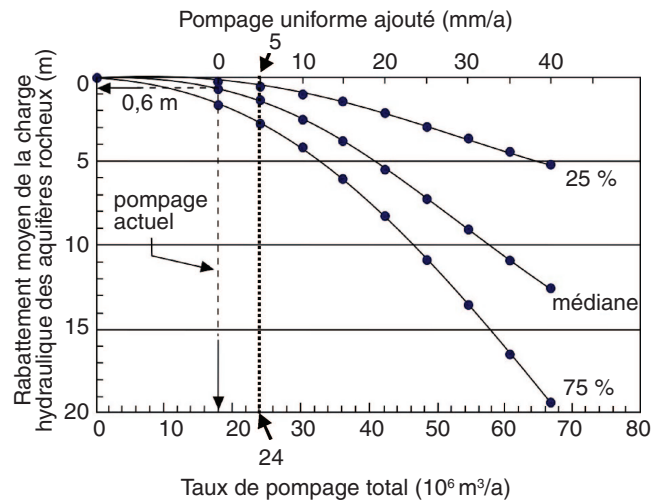


Figure 64. Effets du pompage uniforme ajouté au pompage actuel sur la charge hydraulique du système aquifère fracturé.

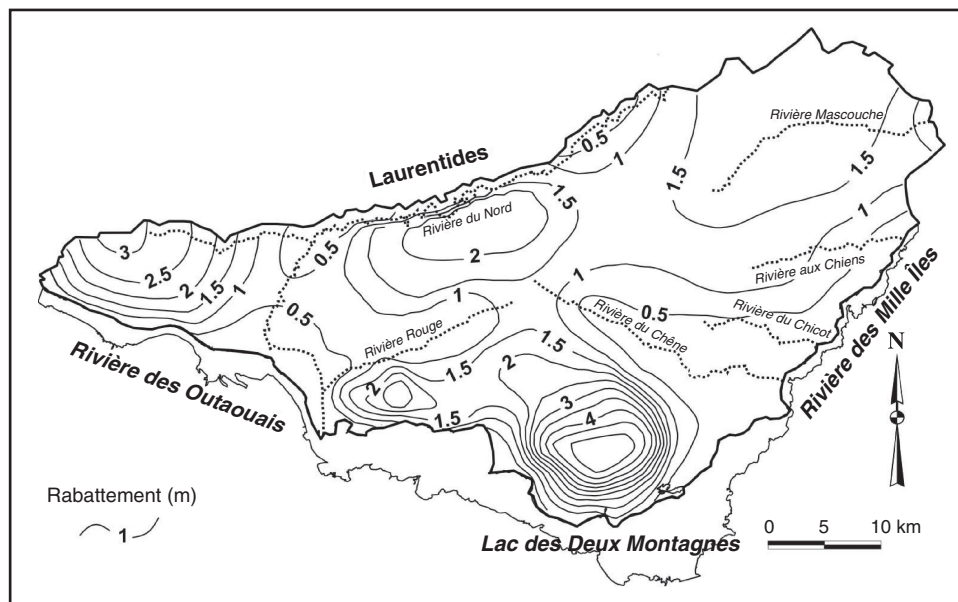


Figure 65. Distribution des différences de rabattement entre la simulation 3 du tableau 20 (pompage additionnel équivalent à 5 mm/a de plus que pour les conditions actuelles) et la simulation 1 (aucun pompage).

Tableau 21. Résultats de la simulation finale pour les conditions d'écoulement actuelles (première rangée), et des simulations avec des taux de recharge représentant de 95 % à 50 % de la recharge actuelle.

Simulation n°	Proportion de la recharge actuelle (%)	Rabattement médian (m)	Drain / charge constante ¹	Flux imposé	Recharge	Pompage actuel ¹	Bilan ¹
			(10 ⁶ m ³ /a)				
1	100 (conditions actuelles)	0,0	3,67 -79,69	9,38	84,66	-	97,7 -97,7
2	95	0,7	3,72 -75,75	9,38	80,67	-	93,8 -93,8
3	90	1,5	3,77 -71,81	9,38	76,68	-	89,8 -89,8
4	80	3,1	3,88 -63,93	9,38	68,69	-18,07	82,0 -82,0
5	70	4,9	4,02 -56,08	9,38	60,71	-18,07	74,1 -74,1
6	60	7,1	4,19 -48,28	9,38	52,73	-18,07	66,3 -66,3
7	50	9,3	4,42 -40,52	9,38	44,75	-18,07	58,5 -58,5

¹ Les taux entrants sont indiqués par des chiffres positifs; les taux sortants du domaine modélisé sont indiqués par des chiffres négatifs.

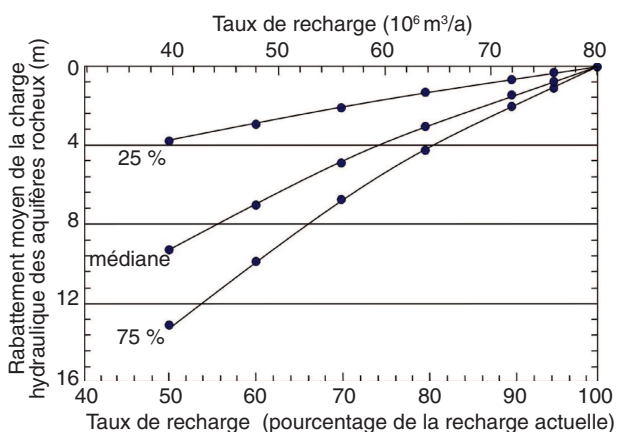
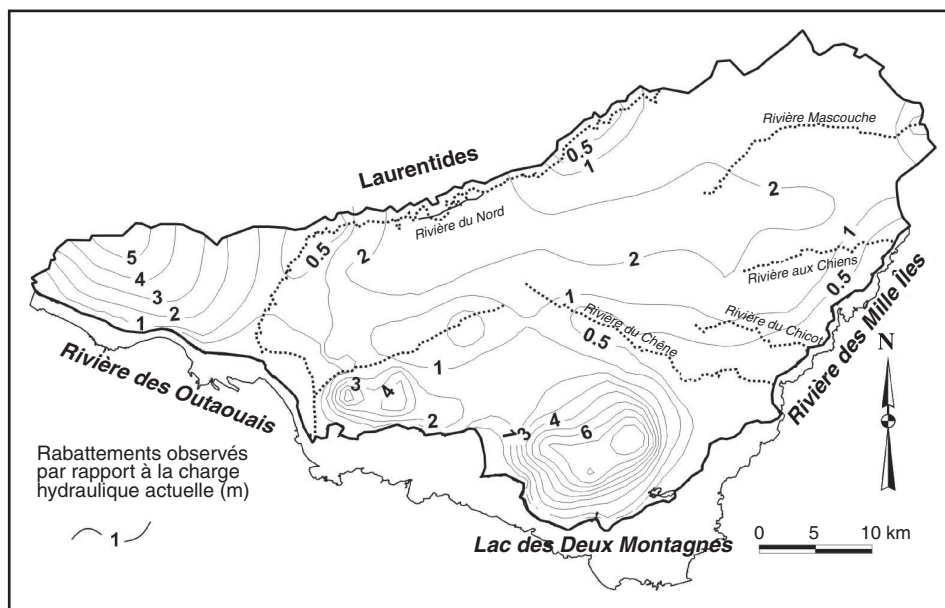


Figure 66. Effets du décroissement de la recharge sur le rabattement de la charge hydraulique du système aquifère rocheux.

Figure 67. Distribution des rabattements simulés lors d'une recharge diminuée à 90 % de la recharge actuelle.



régional. À l'aide de cette courbe, il est possible d'estimer les rabattements à l'échelle régionale provoqués par un taux de pompage donné. Ainsi, on peut éviter la surexploitation de l'aquifère en étudiant les rabattements régionaux. Le pompage actuel imposé dans le modèle numérique, de $18 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$, cause un rabattement médian de 0,6 m réparti uniformément sur toute la surface. Ce rabattement ne semble pas trop élevé à l'échelle régionale et est facilement compensé par les fluctuations annuelles des niveaux piézométriques, qui vont de 1,9 à 3,8 m pour les aquifères à nappe libre et de 0,7 à 2,7 m pour les aquifères captifs (tableau 5). Ainsi, nous pouvons dire que le pompage actuel est durable.

Toutefois, les rabattements moyens présentés à la figure 65 pourraient localement donner lieu à des rabattements importants, surtout près de sites de pompage élevé. Les écarts des valeurs moyennes doivent donc être considérés lors de l'interprétation de ces résultats. Il faut noter aussi que plus le débit de pompage est élevé, plus s'accroît le rabattement. Ainsi, au rabattement médian de 0,6 m correspond le taux de pompage actuel de $18,0 \times 10^6 \text{ m}^3$. Pour doubler le rabattement médian à 1,2 m, un pompage d'environ $24,1 \times 10^6 \text{ m}^3$ (ou une augmentation de 35 %) serait nécessaire (tableau 20). Ce type de calcul peut être effectué pour un ensemble de scénarios.

La deuxième série de scénarios a considéré des cas hypothétiques de diminution du taux de recharge. Donc, contrairement à la première série de scénarios, où une extraction uniforme était appliquée, la diminution de la recharge se traduisait par un manque d'apport d'eau, ce qui est équivalent à une augmentation de l'extraction non uniforme. Les résultats de cette série de simulations sont similaires à ceux de la série précédente.

Tous ces scénarios ont été réalisés pour le modèle numérique calé selon les conditions actuelles de la recharge et de l'écoulement. De nouvelles simulations seront requises si de nouvelles conditions sont observées, comme par exemple une augmentation importante de l'utilisation de l'eau souterraine, ou une modification majeure de la recharge annuelle, causée par les changements climatiques.

LES ZONES DU TERRITOIRE LES PLUS FAVORABLES À L'EXPLOITATION

L'analyse des indices hydrogéochimiques a permis d'identifier le secteur de la vallée de Saint-Hermas comme étant le secteur de la région où la qualité relative de l'eau souterraine est la meilleure (fig. 41). La zone aquifère de la vallée de Saint-Hermas est située dans des unités géologiques peu réactives (grès de la Formation de Cairnside et des dolomies du Groupe de Beekmantown), limitant ainsi les processus d'interaction eau-roche pouvant dégrader la qualité de l'eau souterraine. Le type d'eau dominant dans ce secteur (secteur 1) est Na-Ca-Mg- HCO_3 . Suit le secteur

de la vallée de la rivière du Nord, de type d'eau dominant Na- HCO_3 (secteur 2). Cette vallée est dominée par des conditions de nappe captive. Enfin, les secteurs représentatifs des zones de recharge sont également identifiés comme ayant une qualité d'eau supérieure. Ce sont les secteurs le long des axes de Lachute à Saint-Janvier, de Sainte-Monique à Saint-Eustache et de la côte Saint-Vincent (sous-secteurs 3a, 3b et 3c, respectivement).

En fusionnant la carte des rabattements provoqués par un pompage uniforme (fig. 65) avec celle des secteurs de qualité relative des eaux souterraines (fig. 41), il est possible de définir les zones les plus favorables pour l'utilisation de l'eau souterraine (fig. 68) : 1) le long de la rivière Rouge, et la vallée de Saint-Hermas; 2) la vallée de la rivière du Nord; et 3) le long des rivières du Chêne et du Chicot, de la partie amont de la rivière Mascouche, et de la partie aval de la rivière du Nord, ainsi que la région entre les collines d'Oka et de Saint-André. Dans ces zones, les rabattements moyens provoqués par un pompage uniforme additionnel de 5 mm/a sont inférieurs à 1,5 m (fig. 65). Ce sont donc des zones où la qualité relative de l'eau souterraine est parmi les meilleures de la région et où sa disponibilité est élevée. Des pompages à ces endroits provoqueraient des effets négatifs moins rapidement que dans les autres parties du territoire. En effet, dans ces zones les rabattements seront à long terme compensés par l'écoulement souterrain arrivant de l'aire d'alimentation, en amont des puits. De plus, les gradients hydrauliques de l'aquifère régional sont souvent négatifs dans ces zones de résurgence, indiquant un écoulement vertical vers la surface. Ceci attribue un faible indice de vulnérabilité à l'aquifère régional, qui est déjà protégé en majeure partie par des dépôts quaternaires d'une plus grande épaisseur. Ces zones sont donc généralement moins vulnérables à la contamination.

LIMITES DE L'ÉTUDE ET DÉVELOPPEMENTS FUTURS

Le modèle numérique mis au point lors de cette étude représente une interprétation et une simplification des conditions réelles sur le terrain. Il a été conçu conformément aux connaissances actuelles des conditions hydrogéologiques de la région. Ce modèle numérique a réuni toutes les connaissances, souvent qualitatives, et les a traduites en des paramètres précis : conditions aux limites, épaisseur de diverses couches, conductivité hydraulique, taux de recharge, etc. L'approfondissement des connaissances des conditions hydrogéologiques par le biais de travaux de terrain supplémentaires pourrait amener des modifications aux paramètres inclus, mais aussi des concepts différents pour représenter le système aquifère.

Le modèle numérique sert surtout à étudier des questions reliées à l'écoulement régional et à la gestion de l'eau souterraine à une échelle régionale. Une interprétation des résultats à une échelle plus petite que 5 km^2 serait inadéquate avec le modèle actuel.

Une analyse de la sensibilité du modèle numérique a permis de déterminer que la conductivité hydraulique de la couche 1 exerce un contrôle important sur les résultats des simulations numériques. Ce paramètre, ainsi que la distribution du taux de recharge, ont donc le potentiel de générer les erreurs les plus grandes. Une connaissance plus profonde des propriétés hydrauliques des aquifères régionaux, ainsi que de la distribution spatiale de l'unité mixte, pourrait contribuer à améliorer la précision du modèle numérique.

Lors des simulations, le modèle numérique a été exécuté en régime permanent et la notion de temps n'a pas été considérée. En conditions naturelles, le temps nécessaire pour obtenir les rabattements finaux et les équilibres simulés se mesure en années ou dizaines d'années si les conditions d'écoulement restent inchangées. Un calage du modèle en régime transitoire, suivant les fluctuations des niveaux d'eau observés dans les puits d'observation et dans les stations de jaugeage des rivières, pourrait être la prochaine étape de la mise au point du modèle numérique. Des taux de recharge transitoires devraient être déterminés auparavant.

Les deux séries de scénarios examinés (pompage accru et diminution de la recharge) représentent des cas hypothétiques. Le modèle numérique devrait être utilisé pour étudier d'autres scénarios, comme par exemple pour la planification de nouvelles installations de pompage. Dans ces cas, le modèle numérique aiderait à choisir la meilleure option pour la région.

Enfin, tous les scénarios réalisés lors de cette étude utilisaient le modèle numérique calé selon les connaissances actuelles de la recharge et de l'écoulement. Un nouveau calage sera requis si des changements à ces conditions surviennent.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Conclusions

L'utilisation actuelle en eau souterraine est estimée à $14,8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ pour l'ensemble de la région d'étude. Environ 42 % du pompage actuel est consacré à l'alimentation en eau potable, 17 % est dédié à l'agriculture, et 41 % est consommé par les autres utilisateurs, surtout les carrières.

Le débit apparent moyen par puits pour la région est, sur la base de 1874 données du Système d'information hydrogéologique (SIH), de l'ordre de $147 \text{ m}^3/\text{d}$ ($100 \text{ L}/\text{min}$). La profondeur moyenne de puits pour soutirer ce débit est d'environ 15 m. Un tel débit ne peut suffire qu'à une utilisation domestique. Les dolomies sont les roches les plus productives. Le débit moyen pompé par les puits municipaux est de $462 \text{ m}^3/\text{d}$, ce qui montre qu'il est aussi possible d'obtenir des débits d'exploitation importants de ce système aquifère.

Le modèle numérique de l'écoulement régional a permis d'intégrer toutes les connaissances acquises lors de cette étude et de les utiliser en régime permanent, à des fins prédictives. Le calage du modèle numérique nous a permis de confirmer le modèle conceptuel du système aquifère de la région, de préciser la distribution de la conductivité hydraulique des aquifères rocheux, et d'établir, avec certaines modifications locales, la distribution du taux de recharge des nappes. Le taux moyen de recharge obtenu à partir du modèle est de $69 \text{ mm}/\text{a}$. Ce taux représente 6,6 % de la précipitation moyenne annuelle pour la région ($1046,8 \text{ mm}$).

Le modèle numérique a été utilisé pour évaluer les effets de scénarios choisis d'exploitation de la ressource en eau souterraine. Les principaux intérêts pour les gestionnaires sont les effets de l'exploitation à long terme sur les niveaux d'eau des aquifères rocheux. Pour évaluer ces effets, nous avons réalisé des simulations représentant 1) une exploitation accrue et 2) une recharge moindre des nappes, qui pourrait résulter de changements climatiques à long terme. Deux séries de simulations ont été effectuées. Dans le premier cas, une lame d'eau uniforme et égale à un certain pourcentage du taux global de recharge a été extraite du système. Dans le deuxième cas, les taux de recharge ont été diminués par pourcentages successifs là où se fait la recharge. Dans les deux cas, il s'agit de quantités d'eau soustraites du système par rapport aux conditions présentes, et les deux séries de simulations donnent des résultats très semblables. Les effets des deux scénarios sont exprimés par la distribution des rabattements des niveaux d'eau par rapport aux conditions actuelles. Lors des simulations, le modèle numérique a été exécuté en régime permanent et la notion de temps n'a pas été considérée. En conditions naturelles, le temps nécessaire pour obtenir les rabattements finaux et les équilibres simulés se mesurerait en années ou en dizaines d'années.

Les résultats des deux scénarios d'exploitation apportent une somme considérable d'informations. Les zones les plus sensibles, c'est-à-dire où les rabattements sont les plus élevés pour les changements hypothétiques du régime d'exploitation, sont les collines d'Oka et de Saint-André, la zone à l'ouest de Saint-Philippe, et le plateau de Mirabel au sud de la rivière du Nord. Dans le modèle numérique, il s'agit de zones où la nappe est relativement élevée par rapport aux régions voisines. Les taux de recharge dans ces zones sont variables. Les niveaux d'eau y sont dépendants de la recharge imposée, et il y a peu ou pas de flux souterrain provenant de l'amont. Les zones les moins sensibles sont les zones de résurgence des eaux souterraines, situées le long des cours d'eau et des limites sud de la région. Dans les zones de résurgence, la quantité d'eau soustraite du système semble être compensée par le flux souterrain provenant des zones de recharge, et les rabattements observés sont moindres que dans les autres régions.

La relation entre le taux de pompage et le rabattement moyen pour l'aquifère régional entier a été déterminée pour les propriétés hydrogéologiques particulières du système aquifère (fig. 64). Ceci permet d'estimer les rabattements

provoqués à l'échelle régionale par un pompage potentiel. Tout pompage provoquant un rabattement moyen plus petit que la fluctuation médiane des niveaux piézométriques, soit 1,6 m, est arbitrairement jugé durable à l'échelle régionale. Le pompage actuel imposé au modèle numérique est de $18 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$, puisqu'il comprend la contribution de la rivière des Mille Îles. Ce taux de pompage causerait un rabattement médian de 0,6 m et serait donc durable. Il faut souligner que ces calculs donnent des valeurs moyennes de rabattement. Localement, près de sites de pompage élevé, l'augmentation substantielle des débits pourrait se traduire par des rabattements importants. Les écarts des valeurs moyennes doivent donc être considérés lors de l'interprétation de ces résultats à plus petite échelle.

Recommandations

Les municipalités devraient entretenir un inventaire des utilisateurs d'eau sur leur territoire afin de dénombrer les différents types d'utilisateurs et les quantités d'eau qu'ils exploitent. Cet inventaire devrait comprendre, par exemple, le nombre de résidences alimentées par aqueducs (municipaux ou privés) et le nombre de puits privés en opération, de même que leur utilité (usage domestique, irrigation des golfs ou des cultures, exploitation des carrières). De plus, pour les utilisateurs importants, un registre des débits pompés devrait être tenu.

Les deux séries de scénarios d'exploitation simulés dans cette étude ont été réalisés pour le modèle numérique calé selon les conditions actuelles de la recharge et de l'écoulement. Un nouveau calage serait requis si des changements appréciables de connaissances au niveau de la recharge et de l'écoulement survenaient.

Les deux séries de scénarios représentent des cas hypothétiques. La simulation d'une combinaison de ces deux types de scénarios hypothétiques pourrait aussi être envisagée. De plus, le modèle numérique pourrait être utilisé pour étudier des scénarios qui correspondent à des aménagements du territoire et à des plans de mise en place de nouvelles installations de pompage. Le modèle serait ainsi mis à profit pour prédire l'effet de cas réels, ce qui aiderait à choisir la meilleure option d'exploitation des ressources en eau souterraine pour la région.

La relation entre le taux de pompage et les rabattements moyens déterminée par la modélisation est caractéristique uniquement pour l'aquifère régional, puisqu'elle dépend des conditions et propriétés à l'échelle régionale. Dans tous les cas de gestion à plus petite échelle avec de nouvelles exploitations importantes de l'eau souterraine (pompage pour un réseau d'aqueduc, assèchement d'une carrière, embouteillage d'eau, etc.), il est recommandé

- de relier le taux de pompage projeté aux rabattements anticipés à l'échelle de l'étude (du puits, de l'aquifère, ou du bassin versant étudié);

- d'effectuer une étude de l'aire d'alimentation des nouvelles installations; et
- d'estimer les impacts négatifs potentiels du pompage (rabattements, résurgences vers des cours d'eau voisins, etc.).

Cette étude a permis de reconnaître que les zones de résurgence situées dans les dépressions topographiques et certaines zones de recharge sont les plus favorables pour l'exploitation de l'aquifère régional. Ainsi, trois zones propices à l'exploitation accrue de l'eau souterraine ont été identifiées : 1) le long de la rivière Rouge, et la vallée de Saint-Hermas; 2) la vallée de la rivière du Nord; et 3) le long des rivières du Chêne et du Chicot, de la partie amont de la rivière Mascouche, et de la partie aval de la rivière du Nord, ainsi que la région entre les collines d'Oka et de Saint-André. Ce sont des zones où l'eau souterraine est de très bonne qualité, et où sa disponibilité est élevée. Les deux premières zones montrent principalement des conditions de nappe captive, tandis que la troisième présente des conditions fluctuant entre nappe captive et nappe libre. Il est reconnu que la protection naturelle par des couches imperméables est beaucoup plus accentuée pour les aquifères captifs et que la recharge se fait à nappe libre. Il ne faut cependant pas oublier que les aquifères à nappe captive et ceux à nappe libre appartiennent au même système aquifère, et sont dotés des mêmes zones de recharge. De plus, la dynamique de l'eau souterraine dans la région étudiée est maintenue surtout à l'aide de la recharge naturelle, tandis que le flux provenant des autres régions, principalement des Laurentides, est minime. Les zones de recharge ont aussi été reconnues en majeure partie comme étant non seulement plus vulnérables à la contamination, mais aussi plus sensibles à l'augmentation du pompage. Un même débit de pompage en régime permanent crée habituellement de plus grands rabattements dans ces zones que dans les zones de résurgence. Ainsi, pour assurer une exploitation durable de la ressource, il est recommandé

- d'éviter des travaux de surface majeurs dans les zones de recharge, car ils perturberaient le taux de recharge naturelle des aquifères;
- de maintenir la qualité de l'eau souterraine et de minimiser les possibilités de contamination anthropique des nappes dans les zones de recharge, que ce soit par l'usage excessif de fertilisants chimiques et organiques, l'épandage trop important de sels déglacants, ou toute autre activité potentiellement polluante.

RÉFÉRENCES

- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R. et Hackett, G., 1987. DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings; U.S. Environmental Protection Agency Report 600/2-87-035, 622 p.

- Alley, W.M., Reilly, T.E. et Franke, O.L., 1999. Sustainability of ground-water resources; United States Geological Survey, Circular 1186, Denver, Colorado, 79 p.
- Bolduc, A.M. et Ross, M., 2001. **La géologie et la géomorphologie quaternaire des basses Laurentides (ouest de Montréal); Guide d'excursion, Congrès de l'Association québécoise pour l'étude du Quaternaire et du Groupe canadien de recherche en géomorphologie, AQQUA-CGRG Montréal 2000**, 38 p.
- Bouwer, H. et Rice, R.C., 1976. A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells; *Water Resources Research*, v. 12, p. 423–428. [doi:10.1029/WR012i003p00423](https://doi.org/10.1029/WR012i003p00423)
- Cloutier, V., Bourque, É., Lefebvre, R., Savard, M.M., Nastev, M., Martel, R. et Therrien, R., 2001. **Regional groundwater hydro-geochemistry of fractured rock aquifers in southwestern Quebec; in Proceedings, 2nd Joint Groundwater Specialty Conference of the Canadian National Chapter of the International Association of Hydrogeologists (IAH-CNC) and the Canadian Geotechnical Society (CGS)**, Sept. 16–19, 2001, Calgary, Alberta, v. 3, p. 1068–1076.
- Conseil canadien des ministres de l'environnement, 1999. Sommaire des recommandations canadiennes existantes pour la qualité de l'environnement; *in* *Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement*, 13 p.
- Cooper, H.H. et Jacob, C.E., 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history; *American Geophysical Union, Transactions*, v. 27, p. 526–534.
- Cooper, H.H., Bredehoeft, J.D. et Papadopoulos, I.S., 1967. Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water; *Water Resources Research*, v. 3, p. 263–269. [doi:10.1029/WR003i001p00263](https://doi.org/10.1029/WR003i001p00263)
- Davis, J.C., 1986. *Statistics and data analysis in geology*; John Wiley & Sons, New York, 646 p. (second edition).
- Desaulniers, D.E. et Cherry, J.A., 1989. Origin and movement of groundwater and major ions in a thick deposit of Champlain Sea clay near Montréal; *Canadian Geotechnical Journal*, v. 26, p. 80–89. [doi:10.1139/t89-009](https://doi.org/10.1139/t89-009)
- Diersch, H.-J.G., 1998a. *FEFLOW — Reference manual*; WASY — Institute for Water Resources Planning and Systems Research Ltd., Berlin, 294 p.
- Diersch, H.-J.G., 1998b. *FEFLOW — User's manual*; WASY — Institute for Water Resources Planning and Systems Research Ltd., Berlin, 178 p.
- Fetter, C.W., 1994. *Applied hydrogeology*; Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 488 p. (third edition).
- Foster, S. et Hirata, R., 1991. **Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data**; World Health Organization (WHO) / Pan American Health Organization (PAHO) / Pan American Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences (CEPIS), Technical Report, Lima, Peru, 73 p. (second edition).
- Freeze, R.A. et Cherry, J.A., 1979. *Groundwater*; Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 604 p.
- Globensky, Y., 1987. *Géologie des Basses-Terres du Saint-Laurent*; Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Direction générale de l'exploitation géologique et minière, MM 85-02, 63 p.
- Gouvernement du Québec, 2001a. *Règlement sur la qualité de l'eau potable*; c. Q-2, r. 4.1, Éditeur officiel du Québec, 7 p.
- Gouvernement du Québec, 2001b. *Règlement sur la qualité de l'eau potable, Article 13*; *Gazette officielle du Québec, Partie 2*, 13 juin 2001, 133^e année, n° 24, p. 3561–3573, modifié le 27 mars 2002 (*Gazette officielle du Québec, Partie 2*, 134^e année, n° 13, p. 2067–2068).
- Gouvernement du Québec, 2001c. *Règlement sur la qualité de l'eau potable, Article 13*; *Gazette officielle du Québec, Partie 2*, 13 juin 2001, 133^e année, n° 24, p. 3586–3594, modifié le 11 juillet 2001 (*Gazette officielle du Québec, Partie 2*, 133^e année, n° 28, p. 4803).
- Hamel, A., 2002. *Détermination de la recharge des aquifères de roc fracturé du sud-ouest du Québec*; mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec (Québec), 271 p.
- Hess, C.T., Vietti, M.A. et Mage, D.T., 1987. Radon from drinking water; *in* *A symposium: Trace substances in environmental health XXI*, (ed.) D.D. Hemphill, University of Missouri, Columbia, Missouri, p. 158–171.
- Hillaire-Marcel, C., 1974. La déglaciation au nord-ouest de Montréal : données radiochronologiques et faits stratigraphiques; *La Revue de géographie de Montréal*, v. XXVIII, no. 4, p. 407–417.
- Hounslow, A.E., 1995. *Water quality data: analysis and interpretation*; CRC Press, Boca Raton, Florida, 416 p.
- Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, 2000. *Carte des sols*; <www.irda.qc.ca>
- Jacob, C.E., 1947. Drawdown test to determine effective radius of artesian well; *American Society of Civil Engineers, Transactions*, v. 112, paper 2321, p. 1047–1064.
- Karanta, G., Martel, M., Nastev, M., Therrien, R., Paradis, D. et Lefebvre, R., 2001. Comparative study of methods for wellhead protection area delineation in fractured rocks; *in* *Proceedings, 2nd Joint Groundwater Specialty Conference of the Canadian National Chapter of the International Association of Hydrogeologists (IAH-CNC) and the Canadian Geotechnical Society (CGS)*, Sept. 16–19, 2001, Calgary, Alberta, v. 3, p. 1350–1357.
- Kugler-Gagnon, M., 1974. *Information géoscientifique et aménagement*; thèse de doctorat, Université d'Ottawa, Ottawa, Ontario, 320 p.
- Lauzière, K., Boisvert, E. et Paradis, D., 2002. *Base interactive de données hydrogéologiques du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec; Partie V in Caractérisation hydrogéologique régionale du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec*, (éd.) M.M. Savard et R. Lefebvre; *Ressources naturelles Canada*, 5 p.

- Lauzière, K., Paradis, D., Bourque, É., Ouellet, M., Boisvert, É. et Ross, M., 2007. Procédure de saisie des données hydrogéologiques; *in* Guide méthodologique pour la caractérisation régionale des aquifères en roches sédimentaires fracturées, (éd.) M.M. Savard, R. Lefebvre, R. Martel, C. Lamontagne et M. Ouellet; Ressources naturelles Canada et Centre Eau, Terre et Environnement de l'Institut national de la Recherche scientifique, p. 115–132, <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/souterraines/aquiferes/guide_fractures.pdf> [consulté le 5 mars 2010].
- Lavoie, D., Bolduc, A., Castonguay, S., Malo, M., Ross, M., Salad Hersi, O., Séjourné, S., Tremblay, A., Lauzière, K. et McIntosh, A., 2001. La Plate-forme du Saint-Laurent, la Zone de Humber et les successions quaternaires le long du transect #1 : Montréal-Appalaches; Commission géologique du Canada, Dossier public 2812, 154 p. / The St. Lawrence Platform, Humber Zone et Quaternary successions along Transect #1: Montreal-Appalachians; Geological Survey of Canada, Open File 2812, 154 p. [doi:10.4095/212034](https://doi.org/10.4095/212034)
- Lévesque, G., 1982. Géologie des dépôts quaternaires de la région de Oka-Sainte-Scholastique, Québec; mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal, 139 p.
- Murat, V., 2000. Étude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution : application aux aquifères du Piémont Laurentien; mémoire de maîtrise, Université du Québec, INRS-Géoressources, Québec (Québec), 127 p.
- Murat, V., Paradis, D., Savard, M.M., Nastev, M., Bourque, É., Hamel, A., Lefebvre, R. et Martel, R., 2003a. Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec : évaluation par les méthodes DRASTIC et GOD; Commission géologique du Canada, Recherches en cours 2003-D3, 14 p. [doi:10.4095/214216](https://doi.org/10.4095/214216)
- Murat, V., Rivera, A., Pouliot, J., Miranda, M. et Savard, M.M., 2003b. Aquifer vulnerability mapping and GIS: when errors on data are sources of information; *in* Proceedings of the First International Workshop on Aquifer Vulnerability and Risk (Salamanca, Mexico, May 28-30, 2003), (ed.) R. Rodriguez, M. Civita, M. de Maio, v. 1, p. 278–285.
- Nastev, M., Lapcevic, P., Girard, F., Étienne, M., Voralek, J. et Savard, M.M., 2000. Hydraulic characterisation of fractured aquifers of St-Lawrence Lowlands in southwestern Quebec; *in* Proceedings, 1st Joint Groundwater Specialty Conference of the Canadian National Chapter of the International Association of Hydrogeologists (IAH-CNC) and the Canadian Geotechnical Society (CGS), Montréal, Quebec, p. 33–39.
- Nastev, M., Savard, M.M., Lapcevic, P., Paradis, D., Lefebvre, R. et Martel, R., 2001. Investigations of hydraulic properties of regional fractured rock aquifers; *in* Proceedings, 2nd Joint Groundwater Specialty Conference of the Canadian National Chapter of the International Association of Hydrogeologists (IAH-CNC) and the Canadian Geotechnical Society (CGS), Sept. 16–19, 2001, Calgary, Alberta, v. 3, p. 1058–1067.
- Nastev, M., Savard, M.M., Paradis, D., Lefebvre, R., Ross, M. et Rivera, A., 2002. Étude quantitative des ressources en eau souterraine du système aquifère fracturé du sud-ouest québécois; Partie II *in* Caractérisation hydrogéologique régionale du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec, (éd.) M.M. Savard et R. Lefebvre; Ressources naturelles Canada, 38 p.
- Nastev, M., Savard, M.M., Lapcevic, P., Lefebvre, R. et Martel, R., 2004. Hydraulic properties and scale effects investigation in regional rock aquifers, south-western Quebec, Canada; Hydrogeology Journal, v. 12, p. 257–269. [doi:10.1007/s10040-004-0340-6](https://doi.org/10.1007/s10040-004-0340-6)
- Nastev, M., Rivera, A., Lefebvre, R., Martel, R. et Savard, M.M., 2005. Numerical simulation of groundwater flow in regional rock aquifers, southwestern Quebec, Canada; Hydrogeology Journal, v. 13, p. 835–848. [doi:10.1007/s10040-005-0445-6](https://doi.org/10.1007/s10040-005-0445-6)
- Paradis, D., Savard, M.M., Nastev, M. et Lefebvre, R., (éd.), 2002. Atlas hydrogéologique du système aquifère fracturé du sud-ouest québécois; Partie III *in* Caractérisation hydrogéologique régionale du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec, (éd.) M.M. Savard et R. Lefebvre; Ressources naturelles Canada, 48 p.
- Prichonnet, G., 1977. La déglaciation de la vallée du Saint-Laurent et l'invasion marine contemporaine; Géographie physique et Quaternaire, vol. 31, p. 323–345.
- Rivera, A., Crowe, A., Kohut, A., Rudolph, D., Baker, C., Pupek, D., Shaheen, N., Lewis, M. et Parks, K., 2003. Cadre canadien de collaboration en matière d'eau souterraine; Gouvernement du Canada, 60 p., <http://ess.nrcan.gc.ca/2002_2006/gwp/pdf/cadre_canadien_collaboration_eau_souterraine_f.pdf> [consulté le 5 mars 2010].
- Rocher, M., Tremblay, A., Nadeau, L. et Lavoie, D., 2000. Analyse structurale et tectonique de la Plate-forme du Saint-Laurent (Québec, Canada) : résultats préliminaires; Commission géologique du Canada, Recherches en cours 2000-D12, 7 p. [doi:10.4095/211180](https://doi.org/10.4095/211180)
- Ross, M., Parent, M., Bolduc, A.M., Hunter, J. et Benjumea, B., 2001. Étude préliminaire des formations quaternaires comblant les vallées des basses Laurentides, nord-ouest de Montréal, Québec; Commission géologique du Canada, Recherches en cours 2001-D5, 15 p. [doi:10.4095/212124](https://doi.org/10.4095/212124)
- Ross, M., Parent, M. et Lefebvre, R., 2005. 3D geologic framework models for regional hydrogeology and land-use management: a case study from a Quaternary basin of southwestern Quebec, Canada; Hydrogeology Journal, v. 13, p. 690–707. [doi:10.1007/s10040-004-0365-x](https://doi.org/10.1007/s10040-004-0365-x)
- Salad Hersi, O., Lavoie, D., Mohamed, A.H. et Nowlan, G., 2002. Subaerial unconformity at the Potsdam-Beekmantown contact in the Québec Reentrant: regional significance for the Laurentian continental margin history; Bulletin of Canadian Petroleum Geology, v. 50, p. 419–440. [doi:10.2113/50.3.419](https://doi.org/10.2113/50.3.419)
- Salad Hersi, O., Lavoie, D. et Nowlan, G., 2003. Reappraisal of the Beekmantown Group sedimentology and stratigraphy, Montréal area, southwestern Quebec: implications for understanding the depositional evolution of the Lower-Middle Ordovician Laurentian passive margin of eastern Canada; Canadian Journal of Earth Sciences, v. 40, p. 149–176. [doi:10.1139/e02-077](https://doi.org/10.1139/e02-077)
- Savard, M., Dessau, J.C. et Pellerin, E., 1998. Le radon à Oka — rapport d'intervention de santé publique; Régie régionale de la santé et des services sociaux des Laurentides, Direction régionale de la santé publique, 134 p.

- Savard, M.M., Nastev, M., Lefebvre, R., Paradis, D. et Martel, R. (éd.), 2002a. Hydrogéologie régionale du système aquifère fracturé du sud-ouest québécois; Partie I *in* Caractérisation hydrogéologique régionale du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec, (éd.) M.M. Savard et R. Lefebvre; Ressources naturelles Canada, 60 p.
- Savard, M.M., Lefebvre, R., Nastev, M. et Paradis, D. (éd.), 2002b. Études locales de secteurs choisis du système aquifère fracturé du sud-ouest québécois; Partie IV *in* Caractérisation hydrogéologique régionale du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec, (éd.) M.M. Savard et R. Lefebvre; Ressources naturelles Canada, 146 p.
- Savard, M.M., Lefebvre, R., Nastev, M. et Paradis, D. (éd.), 2004. Études locales de secteurs choisis du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec; Commission géologique du Canada, Dossier public 4600, 163 p. [doi:10.4095/215121](https://doi.org/10.4095/215121)
- Savard, M.M., Lefebvre, R., Martel, R., Lamontagne, C. et Ouellet, M. (éd.), 2007. **Guide méthodologique pour la caractérisation régionale des aquifères en roches sédimentaires fracturées**; Ressources naturelles Canada et Centre Eau, Terre et Environnement de l'Institut national de la Recherche scientifique, 174 p.
- Simard, G., 1978. Hydrogéologie de la région de Mirabel; Ministère des Richesses naturelles du Québec, Service des eaux souterraines, rapport H.G.-11, 65 p.
- Simard, G. et Des Rosiers, R., 1980. Qualité des eaux souterraines du Québec; Ministère de l'Environnement du Québec, Service des eaux souterraines, rapport H.G.-13, 161 p.
- Sophocleous, M., 2000. From safe yield to sustainable development of water resources — the Kansas experience; *Journal of Hydrology* (Amsterdam), v. 235, p. 27–43. [doi:10.1016/S0022-1694\(00\)00263-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00263-8)
- Sous-comité fédéral-provincial sur l'eau potable du Comité fédéral-provincial-territorial de l'hygiène du milieu et du travail, 2001. Résumé des recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada, 8 p.
- Steenhuis, T.S., Winchell, M., Rossing, J., Zollweg, J.A. et Walter, M.F., 1995. SCS runoff equation revisited for variable-source runoff areas; *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 121, issue 3, p. 234–237. [doi:10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1995\)121:3\(234\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1995)121:3(234))
- St-Onge, D.A., 1979. Forages au roc, région nord de Montréal; Université d'Ottawa, Département de géographie, Notes de recherche, n° 22, 120 p.
- Theis, C.V., 1935. The relation between the lowering of the piezometer surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage; *American Geophysical Union, Transactions*, v. 16, p. 519–524.
- UNESCO, 1975. Legends for geohydrochemical maps; UNESCO Press, Paris, France, Technical Papers in Hydrology, no. 14, 61 p. (aussi en français, en espagnol, et en russe)
- van der Kamp, G., 1976. Determining aquifer transmissivity by means of well response tests: the under-damped case; *Water Resources Research*, v. 12, p. 71–77. [doi:10.1029/WR012i001p00071](https://doi.org/10.1029/WR012i001p00071)
- Walton, W.C., 1970. Groundwater resource evaluation; McGraw-Hill, New York, New York, 664 p.

