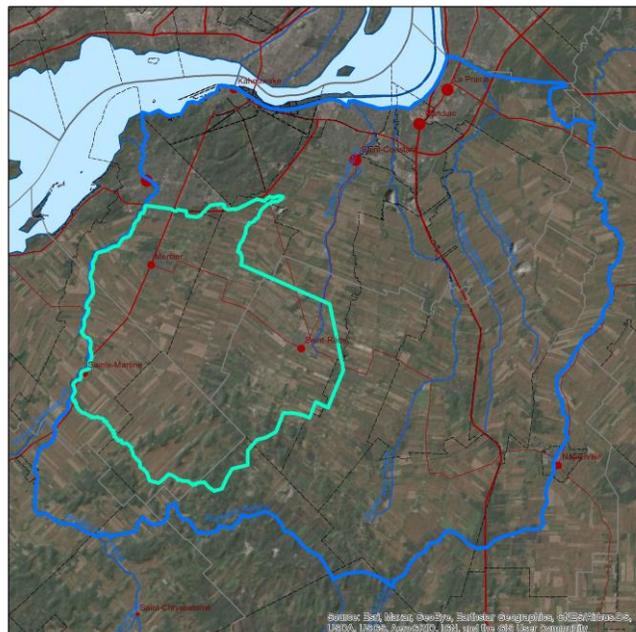


RAPPORT FINAL (version révisée)

Réalisation de travaux de caractérisation complémentaire pour la modélisation de l'écoulement des eaux souterraines à Mercier : conditions des ressources en eau souterraine dans la région et en amont des anciennes lagunes de Mercier

Jean-Marc Ballard, François Huchet, Mélanie Raynauld,
Jean-Sébastien Gosselin et René Lefebvre



Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau Terre Environnement

Rapport de recherche R2033
Avril 2021

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2021
Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-964-7 (version électronique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2022
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2022

RÉSUMÉ COURT

Le MELCC a donné un mandat à l'INRS pour la « Réalisation de travaux de caractérisation complémentaire pour la modélisation de l'écoulement des eaux souterraines à Mercier : conditions des ressources en eau souterraine dans la région et en amont des anciennes lagunes de Mercier ». Ces travaux portent sur une région d'étude d'environ 950 km² couvrant, partiellement ou complètement, 24 municipalités de la Montérégie Ouest ainsi que sept (7) bassins versants. La frange nord de la région en bordure du fleuve Saint-Laurent est urbanisée, sauf à Kahnawake qui a un couvert forestier. L'utilisation du sol pour le reste de la région est dominée par l'agriculture, notamment les cultures maraîchères qui nécessitent l'usage d'eau pour l'irrigation.

Globalement, la recharge de l'aquifère rocheux régional est estimée à 72 mm/an (68.7 Mm³/an) pour l'ensemble de la région d'étude; cette recharge étant plus importante au centre de la région où elle dépasse 100 mm/an. Les prélèvements totaux en eau souterraine (18.8 Mm³/an) sont utilisés pour des usages à 32% résidentiels (6.0 Mm³/an), à 51% industriel-commercial-institutionnel (ICI) (9.6 Mm³/an) et à 17% agricoles (3.2 Mm³/an). Les usages ICI sont en grande partie attribuables aux carrières alors que les usages agricoles sont dominés par l'irrigation des cultures maraîchères (71%). Globalement, pour toute la région d'étude, l'usage total de l'eau souterraine (18.8 Mm³/an) correspond à 27% de la recharge (68.7 Mm³/an). Les pressions sur les ressources en eau souterraine ne sont toutefois pas réparties uniformément dans la région. Bien que ce niveau de prélèvement puisse mener à un nouvel équilibre dynamique du système aquifère, certains impacts négatifs pourraient découler de la baisse du niveau piézométrique (réduction du débit de base des cours d'eau, perte de productivité des puits et possible dégradation de la qualité de l'eau).

Les trois approches utilisées pour évaluer le changement de la recharge en climat futur montrent que la recharge pourrait diminuer (-5%), demeurer stable, ou augmenter (plus de 20%). Au niveau de l'usage de l'eau souterraine en climat futur, des scénarii impliquant des augmentations de 11.3%, 28.0% et 38.4% de l'usage ont été considérés. Combinés aux trois scénarii du changement de la recharge en climat futur, les scénarii d'évolution de l'usage donnent une plage de changements possibles de la recharge effective (recharge moins les usages) en climat futur. La distribution spatiale des pressions sur l'eau souterraine en conditions présentes et futures a été obtenue de la répartition des types d'usage sur le territoire. La distribution spatiale des pressions des différents usages sur l'eau souterraine dans les conditions présentes et futures a été définie en estimant la recharge effective (recharge moins les usages). La recharge effective se distingue de la recharge totale surtout dans le croissant central de recharge préférentielle, particulièrement à Saint-Isidore, Saint-Rémi et Saint-Michel. Les GPE industriels reliés à l'UTES et aux carrières mènent à des zones où localement les prélèvements excèdent la recharge par plus de 100 000 m³/an/km². Les trois scénarii en climat futur montrent respectivement, 1) une augmentation de la recharge totale qui atténue l'effet de l'usage dans la zone centrale de recharge préférentielle, 2) une légère baisse de la recharge effective au centre de la région et 3) une importante baisse de la recharge effective au centre de la région. Actuellement, la proportion d'usage de la recharge dépasse 20% au centre de la région et la proportion dépasse 40% dans la partie aval du bassin de la rivière Esturgeon et la partie amont du bassin de la rivière Saint-Jacques. La proportion d'usage de la recharge à l'échelle des bassins resterait relativement stable pour le scénario futur optimiste, mais cette proportion augmenterait considérablement pour les deux autres scénarii en climat futur.

Le présent niveau des pressions sur l'eau souterraine est très important dans la région d'étude et il est susceptible d'augmenter en climat futur. Ces pressions sont reliées à une variété d'usages de l'eau souterraine, particulièrement l'usage ICI de l'UTES et des carrières, mais aussi à un important usage agricole qui s'ajoute à des captages municipaux et à des puits résidentiels. La préservation des usages actuels de l'eau souterraine, particulièrement pour l'approvisionnement en eau et l'agriculture, nécessite que l'exploitation de l'eau souterraine fasse l'objet d'une gestion active. Afin de soutenir cette gestion, nous recommandons ainsi que des travaux soient entrepris afin de mieux comprendre le cadre social et économique de l'usage de l'eau ainsi que le fonctionnement du système aquifère régional. Ces travaux soutiendraient une approche participative avec les acteurs de l'eau afin d'identifier des actions permettant la gestion durable de la ressource régionale en eau souterraine.

RÉSUMÉ LONG

Ce rapport documente une partie des travaux réalisés dans le cadre du mandat donné à l'INRS par le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) pour la « Réalisation de travaux de caractérisation complémentaire pour la modélisation de l'écoulement des eaux souterraines à Mercier : conditions des ressources en eau souterraine dans la région et en amont des anciennes lagunes de Mercier ». Le mandat implique un 1^{er} volet sur l'estimation de la recharge et de l'usage de l'eau souterraine ainsi qu'un 2^e volet sur la caractérisation hydraulique du système aquifère. Le présent rapport documente uniquement les travaux du 1^{er} volet.

Le présent rapport comprend les éléments suivants : 1) une brève revue des travaux antérieurs et des données disponibles pour la réalisation de ce volet du mandat, 2) le développement d'un modèle géologique régional des dépôts meubles, 3) l'estimation de la recharge de l'aquifère rocheux régional, 4) l'estimation de l'usage de l'eau, 5) une évaluation sommaire de l'incidence possible du présent niveau d'usage de l'eau souterraine, 6) la formulation de scénarii de changement de la recharge et de l'usage de l'eau souterraine en climat futur, 7) la définition des pressions sur l'eau souterraine à l'échelle intramunicipale, et 8) la formulation de recommandations pour l'exploitation durable de l'eau souterraine dans la région d'étude. Ce résumé met toutefois l'emphase sur les résultats obtenus relativement à la recharge et à l'exploitation de l'aquifère rocheux régional.

La région d'étude d'environ 950 km² a été définie en fonction de limites naturelles représentées par la rivière Châteauguay à l'ouest, le fleuve Saint-Laurent au nord, la rivière l'Acadie à l'est et le ruisseau Norton au sud. Cette région couvre, en tout ou en partie, 24 municipalités de la Montérégie Ouest. Le relief de la région d'étude est peu prononcé, allant d'un dôme à un peu plus de 60 m d'altitude au centre de la région et diminuant radialement vers les cours d'eau jusqu'à moins de 25 m au fleuve Saint-Laurent. La région d'étude couvre partiellement les bassins versants des rivières Châteauguay, des Anglais et l'Acadie, et entièrement les bassins des rivières Suzanne, Saint-Régis, Tortue et Saint-Jacques. La frange nord de la région en bordure du fleuve Saint-Laurent est urbanisée, sauf à Kahnawake qui a un couvert forestier. L'utilisation du sol pour le reste de la région est dominée par l'agriculture, notamment les cultures maraîchères. À l'exception des eskers de Mercier et de la rivière Saint-Jacques, le potentiel aquifère de la région est représenté par le roc fracturé qui se retrouve sous une couche de till ainsi que d'accumulations de sédiments marins fins dans les secteurs plus bas en bordure du fleuve et de la rivière Châteauguay.

La recharge de l'aquifère rocheux régional a été obtenue des travaux antérieurs (Croteau et al. 2010; Carrier et al. 2013) et des valeurs typiques en fonction des matériaux présents à la surface dans le secteur non couvert par des études antérieures. Les eskers sont les seuls dépôts meubles constituant des aquifères mais leur étendue est restreinte. Les dépôts meubles contrôlent toutefois les conditions de confinement, la recharge et la vulnérabilité de l'aquifère de roc fracturé régional. L'aquifère de roc fracturé est localement en condition libre où le roc affleure en surface ou est recouvert d'une faible épaisseur de till. La recharge de l'aquifère rocheux est plus importante au centre de la région d'étude où le till est présent en surface. Dans ces secteurs, la recharge est de l'ordre de 100 mm/an. Dans les secteurs où l'argile est présente en surface, la recharge est de moins de 50 mm/an. Globalement la recharge est estimée à 72 mm/an pour l'ensemble de la région d'étude, ce qui représente 68.7 Mm³ annuellement pour toute la région d'étude. Nous avons aussi estimé plus précisément la recharge dans l'esker de Mercier avec le logiciel GWHAT (Gosselin

2016) sur la base de l'hydrogramme d'un puits de suivi du RSESQ localisé dans l'esker en amont de l'UTES. Cette recharge est en moyenne de l'ordre de 500 mm/an dans l'esker, mais elle varie de moins de 350 mm/an à plus de 650 mm/an en fonction des précipitations annuelles.

L'usage de l'eau a été estimé avec l'approche des projets PACES. L'usage total de l'eau dans la région d'étude est évalué à 46.2 Mm³/an, dont 41% des prélèvements proviennent de l'eau souterraine (18.8 Mm³/an) et 59% des eaux de surface (27.4 Mm³/an). Les usages de l'eau sont à 40% résidentiels (18.7 Mm³/an), 47% industriel-commercial-institutionnel (ICI) (21.7 Mm³/an) et 13% agricoles (5.8 Mm³/an). Les prélèvements totaux en eau souterraine de 18.8 Mm³/an sont utilisés pour des usages à 32% résidentiels (6.0 Mm³/an), 51% ICI (9.6 Mm³/an) et 17% agricoles (3.2 Mm³/an). Les usages ICI de l'eau souterraine sont en grande partie attribuables aux carrières alors que les usages agricoles sont dominés par l'irrigation des cultures maraîchères (71%). Nos estimations des prélèvements d'eau souterraine à des fins résidentielles et agricoles sont du même ordre que celles de Technorem (2008a et 2008b) et du projet RADEAU 1 (Ageco 2019), mais notre estimation des prélèvements ICI est plus élevée et appuyée par les données sur les Grands préleveurs d'eau (GPE) qui n'étaient pas disponibles lors des études antérieures.

Globalement, pour toute la région d'étude, l'usage total de l'eau souterraine (18.8 Mm³/an) correspond à 27% de la recharge (68.7 Mm³/an). Les pressions sur les ressources en eau souterraine ne sont toutefois pas réparties uniformément dans les municipalités de la région d'étude. Pour 14 des 24 municipalités couvertes par la région d'étude, l'usage d'eau souterraine correspond à moins de 20% de la recharge sur leur territoire. À l'opposé, deux municipalités avec des situations particulières utilisent beaucoup plus que 100% de la recharge sur leur territoire (Châteauguay : 160%; Napierville : 175%). À part Châteauguay, six autres municipalités ont d'importants prélèvements d'eau souterraine sur leur territoire dépassant 1 Mm³/an et de fortes proportions d'usage de la recharge : Mercier (2.53 Mm³/an; 89%), Saint-Constant (1.86 Mm³/an; 53%), Sainte-Clotilde (2.22 Mm³/an; 77%), Saint-Isidore (1.23 Mm³/an; 34%), Saint-Jacques-le-Mineur (1.93 Mm³/an; 28%) et Saint-Rémi (2.48 Mm³/an; 32%). Quatre de ces municipalités ont en commun d'avoir de grands préleveurs industriels qui sont des carrières sur leur territoire. Ces pressions ICI dépassent largement celles reliées aux autres usages de l'eau souterraine, notamment les usages agricoles.

Régionalement, l'ensemble des usages de l'eau souterraine utilisent près de 30% de la recharge dans l'aquifère rocheux. Afin d'évaluer l'effet de cette proportion d'usage sur les niveaux piézométriques, la solution analytique de Dupuit-Forchheimer a été appliquée aux conditions régionales sur une coupe de 23.7 km allant du nord au sud de la région. Le prélèvement de 30% de la recharge mène à une baisse de 8 m du niveau maximum de la nappe, ce qui est dans le même ordre de grandeur que la baisse observée du niveau piézométrique depuis les années 1980 sur l'un des puits de suivi du RSESQ localisé à l'ouest de Saint-Rémi. Bien que ce niveau de prélèvements puisse mener à un nouvel équilibre dynamique du système aquifère, certains impacts négatifs pourraient découler de la baisse du niveau piézométrique. Ces impacts comprennent une réduction du débit de base des cours d'eau, la perte de productivité des puits d'approvisionnement et une possible dégradation de la qualité de l'eau souterraine.

Trois approches ont été utilisées pour évaluer le changement de la recharge en climat futur. D'abord, un bilan hydrologique mensuel a été calculé en reproduisant la recharge moyenne du bassin de la rivière des Anglais et ce bilan a ensuite été calculé en climat futur sur la base du

changement de la température et des précipitations projetées par Ouranos (2021a) sur la base d'un ensemble de simulations climatiques. Ensuite, le débit moyen annuel actuel et en climat futur du tronçon représentant la rivière des Anglais obtenu de l'Atlas hydroclimatique a servi à estimer un bilan hydrologique. Enfin, les résultats de la modélisation de l'écoulement de surface et souterrain de tout le sud du Québec réalisé par l'Université Laval (Delottier et al. 2021) a permis d'obtenir le changement de la recharge en climat futur par rapport aux conditions actuelles dans la région d'étude. Ces trois approches ont respectivement indiqué que la recharge pourrait demeurer stable, diminuer (-5%), ou augmenter (plus de 20%).

Les scénarii développés par le projet RADEAU 1 (Ageco 2019) pour toute la Montérégie et pour une étude de cas à Saint-Rémi ont servi à évaluer la plage possible du changement d'usage de l'eau souterraine en climat futur dans la région d'étude. Ces travaux ont montré que des scénarii impliquant des augmentations de 11.3%, 28.0% et 38.4% de l'usage pourraient être considérés. Combinés aux trois scénarii du changement de la recharge en climat futur, les scénarii d'évolution de l'usage donnent une plage de changements possibles de la recharge effective (recharge moins les usages) en climat futur. Nous recommandons de retenir trois scénarii qui impliqueraient une augmentation et des diminutions de la recharge effective par rapport aux conditions présentes.

Afin de préciser la distribution spatiale des pressions sur la ressource en eau souterraine, l'usage de l'eau souterraine à l'échelle intramunicipale a été spatialisé grâce au développement récent d'un indicateur intramunicipal sur grille (Huchet et al. 2021). Cette approche permet de répartir quatre types d'usage sur le territoire : (1) usage total réseau, (2) usage agricole hors réseau, (3) usage ICI hors réseau et (4) usage résidentiel hors réseau. Les résultats montrent les secteurs où l'usage de l'eau souterraine est localement important et ils permettent d'identifier les types de prélèvements d'importance et de vérifier le potentiel de conflits d'usage. Sur la région d'étude, la répartition de l'usage total de l'eau souterraine est hétérogène. Plusieurs zones sous pression ont un niveau d'usage qui excède $20\,000\text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$ (équivalent à 20 mm/an): (1) un axe est-ouest incluant les municipalités de Mercier, Saint-Isidore, Saint-Rémi et Saint-Michel où les usages sont diversifiés (piège hydraulique de l'UTES, captages municipaux, usages agricoles, usage résidentiel et même un GPE ICI); (2) plusieurs prélèvements ICI ponctuels qui sont reliés aux carrières; et (3) une zone d'usage agricole au sud de la municipalité de Saint-Constant.

La distribution spatiale des pressions des différents usages sur l'eau souterraine dans les conditions présentes et futures ont été définies en estimant la recharge effective (recharge moins les usages). Au niveau de la recharge, la carte de la recharge historique obtenue de HELP a d'abord été filtrée de la même façon que l'indicateur de l'usage intramunicipal. Une importante zone de recharge à plus de 100 mm/an se retrouve dans le bassin de la rivière l'Acadie au sud-est de la région d'étude. Toutefois, la plus importante zone de recharge préférentielle à plus de 100 mm/an forme un croissant au centre de la région passant par Kahnawake, Saint-Isidore, Saint-Rémi et Saint-Michel et se terminant à Sainte-Clotilde. Ensuite, la recharge en climat futur a été obtenue en appliquant un pourcentage de changement uniforme à toutes les cellules par rapport aux conditions présentes, soit +20% et -5% (un scénario prévoit une recharge future stable). Ensuite, au niveau des usages, chaque type d'usage a été modifié dans les proportions prévues pour les trois scénarii en climat futur. Finalement, pour les conditions actuelles et les trois scénarii de combinaisons de recharge et d'usage retenus pour les fins de la modélisation, la recharge effective spatialement distribuée a été calculée à l'aide des cartes de la recharge moins les cartes des usages. Les résultats montrent que

la recharge effective se distingue de la recharge totale surtout dans le croissant central de recharge préférentielle, particulièrement à Saint-Isidore, Saint-Rémi et Saint-Michel. Les GPE industriels reliés à l'UTES et aux carrières mènent à des zones où localement les prélèvements excèdent la recharge par plus de 100 000 m³/an/km² (100 mm/an). Les trois scénarii en climat futur montrent respectivement, 1) une augmentation de la recharge totale qui atténue l'effet de l'usage dans la zone centrale de recharge préférentielle, 2) une légère baisse de la recharge effective au centre de la région et 3) une importante baisse de la recharge effective au centre de la région. La recharge effective spatialement distribuée considérant les prélèvements résidentiels et agricoles et les GPE reliés aux captages municipaux et aux prélèvements ICI pourront être directement utilisés pour la modélisation numérique de l'effet des prélèvements d'eau souterraine dans la région d'étude.

La distribution spatiale des prélèvements permet aussi d'évaluer le niveau des pressions sur l'eau souterraine à l'intérieur des bassins versants de la région d'étude. Ces bassins versants ont été divisés en une partie amont et une partie aval afin de mieux définir la distribution spatiale des pressions. Plusieurs conditions ont été définies dans ces deux parties de bassin dans les conditions présentes et pour les trois scénarii futurs : recharge totale, utilisation totale de l'eau souterraine, recharge effective totale, recharge effective partielle (sans les GPE municipaux et ICI), et pourcentage d'usage de la recharge. Les résultats montrent notamment qu'actuellement la proportion d'usage de la recharge dépasse 20% au centre de la région et que dans la partie aval du bassin de la rivière Esturgeon et la partie amont du bassin de la rivière Saint-Jacques la proportion dépasse 40%. La proportion d'usage de la recharge à l'échelle des bassins resterait relativement stable pour le scénario futur optimiste, mais cette proportion augmenterait considérablement pour les deux autres scénarii en climat futur.

Les travaux montrent que le présent niveau des pressions sur l'eau souterraine est très important et qu'il est susceptible d'augmenter en climat futur. Ces pressions sont reliées à une variété d'usages de l'eau souterraine, particulièrement l'usage ICI de l'UTES et des carrières, mais aussi à un important usage agricole qui s'ajoute à des captages municipaux et à des puits résidentiels. La préservation des usages actuels de l'eau souterraine, particulièrement pour l'approvisionnement en eau et l'agriculture, nécessite que l'exploitation de l'eau souterraine fasse l'objet d'une gestion active. Nous recommandons ainsi que des travaux soient entrepris afin de mieux comprendre le cadre social et économique ainsi que le fonctionnement du système aquifère régional. Les travaux sur le cadre social et économique comprendraient une analyse des acteurs de l'eau et une définition plus précise de leur usage actuel et futur de l'eau souterraine et la définition d'une démarche participative qui pourrait impliquer la création d'un comité régional de gestion de l'eau souterraine. Les travaux sur la compréhension du système aquifère auraient pour but de soutenir les travaux du comité de gestion. Ces travaux pourraient impliquer une meilleure évaluation de la recharge en climat futur et le développement d'un modèle numérique régional d'écoulement de l'eau souterraine. Ce modèle serait appliqué à l'évaluation de l'incidence des différents types d'usage sur le système aquifère ainsi qu'à l'évaluation de l'effet des scénarii d'usage en climat futur formulés par le comité de gestion.

TABLE DES MATIÈRES

1	Contexte et mandat	1
2	Définition de la région d'étude.....	3
3	Travaux antérieurs et données disponibles	7
3.1	Travaux antérieurs.....	7
3.2	Données disponibles	9
4	Description de la région d'étude	15
5	Extension du modèle géologique régional.....	19
6	Estimation de la recharge.....	21
7	Estimation de l'usage de l'eau à l'échelle municipale.....	24
8	Pressions sur l'eau souterraine à l'échelle municipale	28
8.1	Niveau, répartition et sources des pressions sur l'eau souterraine.....	28
8.2	Incidences des pressions sur l'eau souterraine.....	30
9	Comparaison avec les travaux antérieurs.....	34
10	Scénarii de recharge et d'usage en climat futur	38
10.1	Estimation de la recharge en climat futur	38
10.2	Scénarii d'usage en climat futur.....	49
10.3	Scénarii de modélisation numérique à considérer.....	55
11	Distribution spatiale des pressions sur l'eau souterraine	56
11.1	Recharge actuelle et en climat futur.....	56
11.2	Usages actuels et futurs de l'eau souterraine à l'échelle intramunicipale.....	57
11.3	Recharge effective actuelle et en climat futur.....	60
11.4	Pression sur l'eau souterraine par bassin versant.....	60
12	Recommandations pour l'exploitation durable.....	62
13	Références	63

ANNEXES

(Les annexes sont présentées à la fin du rapport)

Annexe 1 – Hydrogrammes de puits du RSESQ d'intérêt dans la région d'étude

Annexe 2 – Estimation de la recharge et de l'usage de l'eau souterraine à l'échelle municipale

Annexe 3 – Estimation de la recharge dans l'esker de Mercier

Annexe 4 – Estimation de l'usage de l'eau par RADEAU 1

Annexe 5 – Estimation de la recharge en climat futur

Annexe 6 – Scénarii d'usage de l'eau souterraine actuel et en climat futur

Annexe 7 – Estimation de l'usage intramunicipal de l'eau souterraine et de la recharge effective

Note : en plus des annexes ci-dessus qui sont intégrées au rapport, des annexes électroniques accompagnent aussi le rapport. Ces annexes électroniques contiennent les fichiers utilisés pour faire les calculs ou produire les cartes qui se retrouvent dans le rapport. Le contenu des annexes électroniques est décrit après les cartes à la fin du rapport.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 – Municipalités couvertes par la région d'étude.	5
Tableau 3.1 – Données disponibles dans la région d'étude.	10
Tableau 3.2 – Description du suivi environnemental actuellement en place dans la région d'étude.	11
Tableau 3.3 – Normales climatiques (1981 – 2010) à la station météorologique d'Hemmingford Four Winds (7023075).	13
Tableau 3.4 – Normales climatiques (1981 – 2010) à la station météorologique de La Prairie (7024100).	13
Tableau 3.5 – Normales climatiques (1981 – 2010) à la station météorologique de Sainte-Martine (7027540).	13
Tableau 6.1 – Attribution du taux de recharge selon le type d'unité quaternaire.	22
Tableau 7.1 – Estimation des prélèvements d'eau dans la région d'étude.	27
Tableau 9.1 – Comparaison de l'estimation de l'INRS des prélèvements d'eau totaux (Mm ³ /an) dans la région d'étude avec l'estimation de RADEAU 1 (Ageco 2019).	34
Tableau 9.2 – Comparaison de l'estimation de l'INRS des prélèvements d'eau souterraine (Mm ³ /an) dans la région d'étude avec les estimations des études de Technorem (2008a et 2008b) et RADEAU 1 (Ageco 2019).	35
Tableau 10.1 – Bilan hydrologique mensuel utilisant la température (T) et les précipitations (P) normales entre 1981 et 2010 pour la région d'étude.	39
Tableau 10.2 – Comparaison des composantes hydrologiques de HELP pour le bassin de la rivière des Anglais (Croteau 2006) et du bilan hydrologique mensuel.	40
Tableau 10.3 – Changements météorologiques annuels moyens pour les scénarios climatiques aux horizons 2050 et 2080. Un scénario « intermédiaire » a été retenu sur la base des changements de température et de précipitations prévus pour les simulations avec des scénarios de climatiques « modérés » et « élevés » (Ouranos 2021a).	42
Tableau 10.4 – Changements mensuels de la température (ΔT) et des précipitations (ΔP) pour les horizons 2050 et 2080 sur la base des changements saisonniers simulés estimés par Ouranos (2021a) pour la Montérégie.	43
Tableau 10.5 – Bilan hydrologique mensuel utilisant la température (T) et les précipitations (P) simulées à l'horizon 2050 pour la région d'étude.	44
Tableau 10.6 – Bilan hydrologique mensuel utilisant la température (T) et les précipitations (P) simulées à l'horizon 2080 pour la région d'étude.	44
Tableau 10.7 – Comparaison des bilans hydrologiques annuels pour les conditions météorologiques actuelles par rapport aux conditions attendues aux horizons 2050 et 2080 pour la région d'étude.	44
Tableau 10.8 – Comparaison des composantes hydrologiques (mm/an) estimées à partir de l'Atlas hydroclimatique (MON0411) et de la station de jaugeage 02OA057 (Croteau 2006) pour le bassin de la rivière des Anglais avec le bilan hydrologique mensuel.	47
Tableau 10.9 – Comparaison des composantes hydrologiques (mm/an) estimées à partir de l'Atlas hydroclimatique (MON0411) et du bilan hydrologique mensuel en climat actuel et futur (2050 et 2080).	47
Tableau 10.10 – Statistiques de la recharge potentielle en climat futur sur le secteur d'étude selon les moyennes des 12 simulations climatiques produites à partir du modèle HydroGeoSphere (Delottier et al. 2021).	48
Tableau 10.11 – Sommaire des estimations de la recharge annuelle au roc en climat futur (en mm/an et en % de la recharge actuelle) pour le bassin de la rivière des Anglais et scénarii de changement considérés.	49
Tableau 10.12 – Scénarii d'usage futur de l'eau souterraine en Montérégie proposés par le projet RADEAU 1 (Ageco 2019).	50
Tableau 10.13 – Bilans des trois scénarii narratifs proposés pour Saint-Rémi par le projet RADEAU 1 (Ageco 2019).	52

Tableau 10.14 – Bilans des trois scénarii proposés pour la région d'étude.	54
Tableau 10.15 – Résumé des scénarii de changement de la recharge et de l'usage en climat futur (% par rapport aux conditions actuelles) et effet sur la recharge effective (recharge - usages).....	55
Tableau A.1 – Compilation de l'estimation de la recharge et de l'usage de l'eau souterraine par municipalité pour l'aire comprise dans la région d'étude et rapport de l'usage sur la recharge.	73
Tableau A.2 – Statistiques sur la porosité de drainage (specific yield Sy) (Healy et Cook 2002).....	74
Tableau A.3 – Statistiques sur la pente dans un rayon de 500 m autour du puits.	79
Tableau A.4 – Valeurs typiques du coefficient de ruissellement (Tsutsumi et al. 2004).....	80
Tableau A.5 – Estimation des prélèvements d'eau dans la région d'étude par RADEAU 1 (Ageco 2019). Comparer au tableau 7.1 de l'estimation faite par la présente étude.	84

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 - Localisation des secteurs où les travaux seront réalisés : modèle numérique d'écoulement du site des anciennes lagunes de Mercier; modèle géologique à haute résolution; modèle géologique « étendu » couvrant le territoire où sera faite l'évaluation de la recharge et secteur où sera faite l'estimation de l'usage de l'eau.	4
Figure 3.1 - Secteurs couverts par les études antérieures de Pontlevoy (2004), dans le bassin de la rivière Châteauguay (Côté et al. 2006; Tremblay 2008), du programme CDAQ (Technorem 2008a et 2008b) et du PACES Montérégie Est (Carrier et al. 2013).....	8
Figure 3.2 – Normales climatiques mensuelles pour la température et les précipitations de trois des cinq stations météorologiques d'intérêt dans la région d'étude pour la période de 1981 à 2010 (a : Hemmingford Four Winds – 7023075 ; b : La Prairie – 7024100 ; c : Sainte-Martine – 7027540).....	12
Figure 3.3 – Hydrogramme du puits 03097102 du RSESQ à l'ouest de Saint-Rémi associé aux données météorologiques de la station de Sainte-Martine (7027540) située à 17.7 km du puits.	14
Figure 4.1 – Stratigraphie détaillée des dépôts meubles (à gauche : Tremblay et al. 2010) et hydrostratigraphie des dépôts meubles dans la région d'étude (à droite : Croteau et al. 2010).....	16
Figure 4.2 – Proportions de l'occupation du sol par municipalité (MELCC 2020).	17
Figure 4.3 – Proportions des types de culture dans les secteurs agricoles par municipalité (MELCC 2020).	18
Figure 7.1 – Organisation des usages de l'eau en fonction du type d'utilisation et de la provenance de l'eau servant de base à l'estimation de l'usage de l'eau (Lefebvre et al. 2015).	25
Figure 8.1 – Recharge (A), usage total (B), proportion de l'usage de la recharge (C) et principaux types d'usage de l'eau souterraine (D) pour les municipalités de la région d'étude (la trame de proportion de l'usage de la recharge est utilisée pour chaque municipalité sur la carte 18).	29
Figure 8.2 – Relation entre la superficie des cultures maraîchères par municipalité du MAPAQ et l'usage agricole total de l'eau souterraine (A) et comparaison de la superficie de cultures maraîchères obtenues de la compilation des activités agricoles à l'échelle municipale du MAPAQ et la superficie obtenue de la carte d'utilisation du sol du MELCC (B).	30
Figure 8.3 – Système d'écoulement représenté par la solution de Dupuit-Forchheimer (Chesnaux et al. 2005).	31
Figure 8.4 – Effet de la recharge effective (recharge moins prélèvements) sur la charge hydraulique telle qu'estimée par la solution de Dupuit-Forchheimer (Chesnaux et al. 2005).	32
Figure 9.1 – Comparaison de la source et de l'utilisation des prélèvements totaux (de surface et souterrains) estimés par la présente étude (INRS) et celle de RADEAU 1 (Ageco 2019).	35
Figure 9.2 – Comparaison de l'estimation des prélèvements annuels d'eau souterraine par catégorie d'usage de la présente étude (INRS) par rapport aux estimations de Technorem (2008a et 2018b) et de RADEAU 1 (Ageco 2019).....	35
Figure 10.1 – Croix marquant la localisation des centres des mailles de la grille d'Info-Climat (Bergeron 2017) par rapport à la région d'étude. Les croix en caractère gras ont été considérées pour calculer les normales météorologiques pour la période entre 1981 et 2010.	39
Figure 10.2 – Bilan hydrologique mensuel avec les normales climatiques entre 1981 et 2010 pour la région d'étude.	41
Figure 10.3 – Conditions climatiques observées historiquement et simulées en climat futur pour la Montérégie (données obtenues d'Ouranos 2021a). Les lignes pleines représentent les conditions simulées médianes tandis que les lignes pointillées représentent la plage de variation des simulations.	42
Figure 10.4 – Bilan hydrologique mensuel avec les conditions climatiques à l'horizon 2050 pour la région d'étude.	45
Figure 10.5 – Bilan hydrologique mensuel avec les conditions climatiques à l'horizon 2080 pour la région d'étude.	45

Figure A.1 – Hydrogramme du puits 03090001 dans le secteur des anciennes lagunes de Mercier (période couverte : 1er mai 2004 au 1er décembre 2018 – Totalité des données enregistrées).	70
Figure A.2 – Hydrogramme du puits 03090001 dans le secteur des anciennes lagunes de Mercier (période couverte : 1er janvier 2009 au 1er décembre 2018 – 10 dernières années de données).....	70
Figure A.3 – Hydrogramme du puits 03090001 dans le secteur des anciennes lagunes de Mercier (période couverte : 1er janvier 2016 au 1er décembre 2018 – 3 dernières années de données).....	71
Figure A.4 – Hydrogramme du puits 03097102 dans le secteur de Saint-Rémi (période couverte : 1er novembre 1980 au 1er décembre 2018 – Totalité des données enregistrées).	71
Figure A.5 – Hydrogramme du puits 03097102 dans le secteur de Saint-Rémi (période couverte : 1er janvier 2009 au 1er décembre 2018 – 10 dernières années de données).	72
Figure A.6 – Hydrogramme du puits 03097102 dans le secteur de Saint-Rémi (période couverte : 1er janvier 2016 au 1er décembre 2018 – 3 dernières années de données).	72
Figure A.7 – Puits Mercier (03090001) du RSESQ : à gauche, stratigraphie et installation; à droite l’hydrogramme du puits (niveaux d’eau) de 2004 à 2018.	74
Figure A.8 – Détails de l’hydrogramme du puits Mercier (03090001) du RSESQ de 2014 à 2017.	75
Figure A.9 – Détails de l’hydrogramme du puits Mercier (03090001) du RSESQ de 2010 à 2012.	76
Figure A.10 – Distribution de l’erreur RMSE (à gauche) et paramètres utilisés pour estimer la recharge (à droite). ..	76
Figure A.11 – Plage des charges simulées (en gris) par rapport à l’hydrogramme observé (en bleu).	77
Figure A.12 – Plages des valeurs de la recharge annuelle (années hydrologiques) estimée de 1981 à 2020 à partir des données météorologiques pour cette période.	77
Figure A.13 – Distribution de l’erreur RMSE (à gauche) et paramètres utilisés pour estimer la recharge (à droite) pour les simulations avec des erreurs inférieures à 115.2 mm.	77
Figure A.14 – Plage des charges simulées (en gris) par rapport à l’hydrogramme observé (en bleu) pour les simulations avec des plages restreintes d’erreur RMSE et de valeurs de paramètres hydrologiques (figure A.13).	78
Figure A.15 – Plages des valeurs de la recharge annuelle (années hydrologiques) estimée de 1981 à 2020 à partir des données météorologiques pour cette période en utilisant les plages d’erreur RMSE et de paramètres hydrologiques montrés à la figure A.13.	78
Figure A.16 – Photographie aérienne des conditions entourant le puits d’observation.	80
Figure A.17 – Distribution de l’erreur RMSE (à gauche) et des paramètres utilisés pour estimer la recharge (à droite) pour les simulations avec des erreurs inférieures à 115.2 mm.	81
Figure A.18 – Plage des charges simulées (en gris) par rapport à l’hydrogramme observé (en bleu) pour les simulations avec des plages restreintes d’erreur RMSE et de valeurs de paramètres hydrologiques (figure A.17).	81
Figure A.19 – Plages des valeurs de la recharge annuelle (années hydrologiques) estimée de 1981 à 2020 à partir des données météorologiques pour cette période en utilisant les plages d’erreur RMSE et de paramètres hydrologiques montrés à la figure A.17.	82
Figure A.20 – Composantes du bilan hydrologique pour la période considérée pour l’estimation de la recharge.	82
Figure A.21 – Composantes moyennes du bilan hydrologique mensuel pour la période considérée pour l’estimation de la recharge.	82
Figure A.22 – Composantes moyennes du bilan hydrologique annuel pour la période considérée pour l’estimation de la recharge.	83

LISTE DES CARTES

(Les cartes sont présentées à la fin du rapport après les annexes)

- Carte 1 – Municipalités dans la région d'étude.
- Carte 2 – Piézométrie de l'aquifère rocheux.
- Carte 3 – Suivi environnemental.
- Carte 4 – Topographie, hydrographie et bassins versants.
- Carte 5 – Géologie du roc.
- Carte 6 – Géologie des dépôts quaternaires.
- Carte 7 – Utilisation du sol pour l'année 2017.
- Carte 8 – Épaisseur totale des dépôts meubles.
- Carte 9 – Épaisseur de l'unité de till.
- Carte 10 – Épaisseur de l'unité fluvioglaciale (esker).
- Carte 11 – Épaisseur de l'unité argileuse.
- Carte 12 – Relief de la région d'étude.
- Carte 13 – Données dans la zone sans estimation de la recharge.
- Carte 14 – Recharge de l'aquifère rocheux.
- Carte 15 – Recharge moyenne (mm/an) par municipalité.
- Carte 16 – Recharge totale (Mm^3 /an) par municipalité.
- Carte 17 – Prélèvements totaux (Mm^3 /an) d'eau souterraine par municipalité.
- Carte 18 – Prélèvements (%) par rapport à la recharge par municipalité.
- Carte 19 – Centroïdes des mailles de la grille de recharge potentielle.
- Carte 20 – Grille de recharge potentielle pour la période de référence (1981-2010).
- Carte 21 – Grille de recharge potentielle pour le milieu du siècle (2041-2070).
- Carte 22 – Grille de recharge potentielle pour la fin du siècle (2071-2095).
- Carte 23 – Distribution spatiale de la recharge présente et en climat futur.
- Carte 24 – Distribution spatiale des types d'usage de l'eau souterraine présents et en climat futur.
- Carte 25 – Distribution spatiale de l'usage total d'eau souterraine présent et en climat futur.
- Carte 26 – Distribution spatiale de la recharge effective présente et en climat futur.
- Carte 27 – Distribution spatiale sans l'effet des GPE sur la recharge effective présente et en climat futur.
- Carte 28 – Conditions présentes et en climat futur de l'eau souterraine dans les bassins versants.
- Carte 29 – Proportion (%) présente et en climat futur de l'usage de la recharge dans les bassins versants.
- Carte A.1 – Grands préleveurs d'eau (GPE) souterraine.
- Carte A.2 – Usage total réseau de l'eau souterraine.
- Carte A.3 – Usage agricole hors-réseau de l'eau souterraine.
- Carte A.4 – Usage ICI hors-réseau de l'eau souterraine.
- Carte A.5 – Usage résidentiel hors-réseau de l'eau souterraine.

1 CONTEXTE ET MANDAT

L'INRS réalise présentement un mandat pour le MELCC afin de supporter la gestion environnementale du site des anciennes lagunes de Mercier. Ces travaux sont requis dans le cadre du projet de remplacement de la présente Unité de traitement des eaux souterraines (UTES), c'est-à-dire du système de pompage et de traitement des eaux souterraines contaminées (Lefebvre 2007; Martel et al. 2018). Dans le cadre de ce mandat, l'INRS développe un modèle géologique des dépôts meubles ainsi qu'un modèle numérique d'écoulement des eaux souterraines. Ces deux modèles doivent permettre à l'INRS d'évaluer trois concepts de confinement hydraulique définis par le MELCC et visant à assurer l'interception du panache de contaminants dissous émis par le site contaminé, tout en minimisant le volume journalier d'eau contaminée à prélever et à traiter. Pour arriver à cette fin et à la lumière des informations disponibles, l'INRS a formulé des recommandations au MELCC visant à compléter la caractérisation du secteur entourant le site des anciennes lagunes. Ces recommandations comprenaient notamment l'acquisition de données supplémentaires relatives aux propriétés hydrauliques des formations hydrogéologiques trouvées sur le site à l'étude, ainsi qu'une estimation de la répartition spatiale de la recharge et des prélèvements d'eau souterraine dans l'aquifère rocheux régional du site à l'étude.

Afin d'être représentatifs des conditions réelles, les travaux de modélisation numérique nécessitent une meilleure définition des propriétés hydrauliques à l'échelle locale, notamment les propriétés de l'esker et du roc à l'intérieur desquels se fait la migration du panache de contaminants émis par le site contaminé. Ces travaux doivent aussi s'appuyer sur une connaissance à l'échelle régionale de la recharge du système aquifère ainsi que des prélèvements d'eau souterraine. La recharge et les prélèvements en amont vont contrôler le flux d'eau souterraine qui atteint le site contaminé et ainsi influencer les conditions requises pour assurer un confinement hydraulique efficace. Il est aussi nécessaire d'évaluer l'évolution de la recharge et des prélèvements en climat futur. En effet, le nouveau concept de système de confinement hydraulique devra être efficace même si les conditions de recharge et les prélèvements évoluent et le modèle numérique doit donc considérer ces changements possibles.

Le présent rapport porte uniquement sur le volet du mandat relié à l'estimation de la recharge et des prélèvements dans l'aquifère rocheux régional. À part les eskers (Mercier et rivière Saint-Jacques), les dépôts meubles de la région d'étude ne permettent pas l'exploitation de l'eau souterraine et c'est donc l'aquifère rocheux fracturé qui est exploité pour différents usages. Un rapport séparé va documenter les travaux à réaliser sur l'interprétation des essais visant à mesurer les propriétés hydrauliques. Le présent rapport documente les travaux suivants :

- Extension du modèle géologique régional des dépôts meubles;
- Estimation de la recharge dans les conditions présentes;
- Estimation de l'usage de l'eau souterraine dans les conditions présentes;
- Distribution spatiale de l'usage de l'eau souterraine à l'échelle intramunicipale;
- Recharge et usage de l'eau souterraine en climat futur.

Notre mandat ne prévoyait pas que la distribution spatiale de l'usage de l'eau souterraine soit définie à l'échelle intramunicipale. Nous avons toutefois jugé important d'appliquer à la région d'étude l'approche récemment développée pour estimer les pressions sur l'eau souterraine à l'intérieur des municipalités (Huchet et al. 2021).

Une évaluation a aussi été faite du niveau des pressions sur les ressources en eau souterraine, sur les origines de ces pressions et sur leurs effets potentiels sur les ressources. De plus, le rapport compare l'estimation de l'usage de l'eau avec celles réalisées dans le cadre des travaux réalisés par Technorem (2008a et 2008b) ainsi que le projet RADEAU 1 (Ageco 2019).

Enfin, bien que non plus prévu dans notre mandat, nous avons aussi estimé plus précisément la recharge dans l'esker de Mercier. Ce travail a été réalisé parce que la résolution de l'estimation de la recharge à l'échelle régionale avec HELP ne permet pas nécessairement de représenter les conditions spécifiques de l'esker. La recharge de l'esker doit être bien définie pour les fins de la modélisation des options de piège hydraulique qui remplaceraient l'UTES. L'annexe 3 du rapport documente le travail fait avec le logiciel GWHAT développé par Gosselin (2016) (voir aussi Gosselin et al. 2020) pour estimer la recharge sur la base de l'hydrogramme d'un puits de suivi du RSESQ localisé dans l'esker en amont de l'UTES.

2 DÉFINITION DE LA RÉGION D'ÉTUDE

La figure 2.1 montre l'étendue des secteurs où les travaux ont été réalisés par l'INRS. Dans le cadre d'un autre mandat en voie de réalisation, un modèle numérique d'écoulement du site des anciennes lagunes de Mercier a été développé sur la base d'un modèle géologique des dépôts meubles à haute résolution. Dans le cadre des travaux documentés dans le présent rapport, un nouveau modèle géologique « étendu » couvrant le territoire où sera faite l'évaluation de la recharge doit être développé, ce qui couvre une région plus grande que le secteur où sera faite l'estimation de l'usage de l'eau. Plusieurs considérations motivent les différences entre les couvertures spatiales des divers travaux.

Le modèle géologique des dépôts meubles à haute résolution a été réalisé pour les fins de la modélisation numérique du nouveau piège hydraulique du site des anciennes lagunes de Mercier. Ce modèle numérique doit représenter avec précision le contexte hydrogéologique local du site des anciennes lagunes de Mercier, c'est-à-dire à un niveau de précision permettant de définir le nouveau concept du système de confinement hydraulique. Ce modèle géologique à haute résolution considère à la fois les données géologiques, hydrauliques et géophysiques acquises dans le secteur du site de Mercier. Les limites du modèle géologique à haute résolution ont été établies en fonction des besoins du modèle numérique d'écoulement (figure 2.1). Les limites du modèle numérique ne doivent pas être trop près du site des anciennes lagunes, afin que les conditions qui y seront imposées (charge hydraulique ou flux) ne biaisent pas les résultats du modèle numérique d'écoulement au site des anciennes lagunes. De plus, les limites doivent être suffisamment éloignées pour considérer les effets « régionaux » (prélèvements d'eau souterraine, recharge) susceptibles d'influencer le comportement des eaux souterraines au site des anciennes lagunes. Le territoire couvert par le modèle numérique d'écoulement est limité à l'ouest par la rivière Châteauguay. Au sud, le domaine est en partie limité par la rivière des Fèves, ainsi que par la limite du bassin versant de la rivière des Anglais. À l'est, la limite du modèle englobe le secteur urbanisé de la ville de Saint-Rémi et suit grossièrement la limite municipale trouvée entre Saint-Rémi et Saint-Michel qui représente une ligne de partage des eaux souterraines. Au nord, les limites du modèle suivent un haut topographique représentant une ligne de partage des eaux de surface entre les écoulements allant vers le nord et les écoulements allant vers le sud et l'ouest pour atteindre la rivière Châteauguay.

Un modèle géologique est aussi requis afin d'estimer la recharge du système aquifère régional à l'aide du modèle d'infiltration HELP selon l'approche définie par Croteau et al. (2010) et utilisée dans le cadre du projet PACES Montérégie Est (Carrier et al. 2013). Ce modèle géologique régional pourrait aussi éventuellement servir de base au développement d'un modèle numérique d'écoulement régional dont la fonction centrale serait d'évaluer des scénarii d'exploitation durable de l'eau souterraine dans le secteur en amont du site des anciennes lagunes de Mercier, et ce, afin de protéger l'intégrité du système de confinement hydraulique. L'estimation de la recharge doit couvrir au complet des bassins hydrologiques jaugés afin de permettre sa calibration. Dans la région d'étude, les bassins jaugés disponibles sont ceux des rivières des Anglais et l'Acadie qui représentent un vaste territoire (figure 2.1). Croteau et al. (2010) ont calé leur évaluation de la recharge couvrant le bassin versant de la rivière Châteauguay sur la station de jaugeage de la rivière des Anglais (voir aussi Croteau 2006). La recharge estimée dans le cadre du projet PACES Montérégie Est a été basée sur la station de jaugeage de la rivière l'Acadie, en plus de trois autres stations hors

de la région d'étude (Carrier et al. 2013). L'estimation de la recharge n'exige pas un modèle géologique à haute résolution car cette estimation est faite avec des mailles de 250 m par 250 m. Le modèle géologique régional « étendu » va donc être développé avec une plus faible résolution à partir du modèle géologique à haute résolution et du modèle géologique produit par la Commission géologique du Canada (CGC) et qui couvre tout le sud du Québec (Nastev et al. 2016a et 2016b).

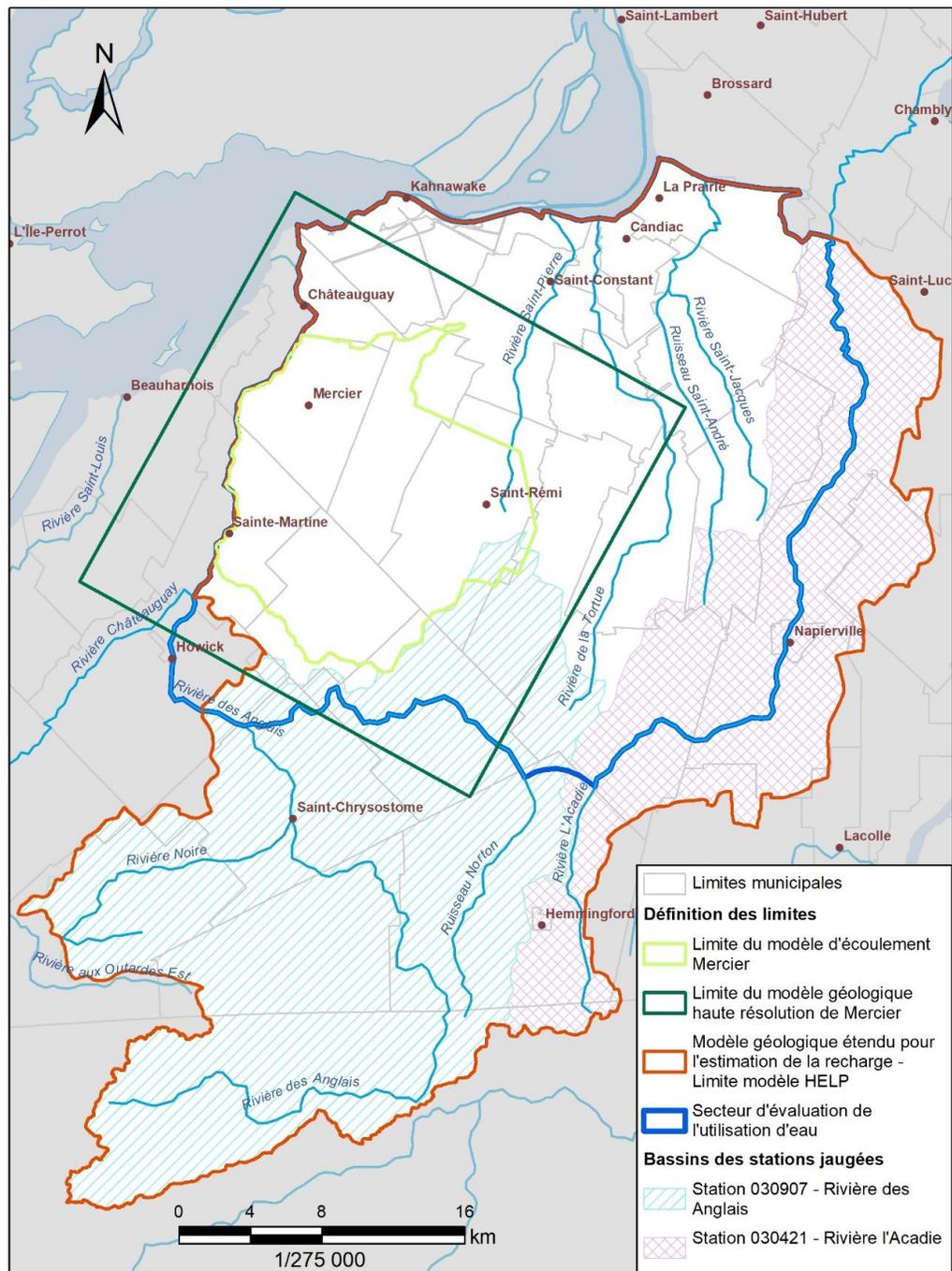


Figure 2.1 - Localisation des secteurs où les travaux seront réalisés : modèle numérique d'écoulement du site des anciennes lagunes de Mercier; modèle géologique à haute résolution; modèle géologique « étendu » couvrant le territoire où sera faite l'évaluation de la recharge et secteur où sera faite l'estimation de l'usage de l'eau.

Finally, the estimation of the use of groundwater will cover a sector that would correspond to the extent of a potential regional flow model. Such a model would be limited as far as possible by natural hydrological limits corresponding notably to important water courses of the study region: the Châteauguay River to the west, the Saint-Laurent River to the north, the Acadie River to the east and the Norton Stream to the south. This sector covering a total surface area of 954 km² is called « study region » in the present report. The map 1 shows the distribution of municipalities covered by the study region while table 2.1 compiles the total surface area of these municipalities and the proportion of their territory that is included in the study region.

Tableau 2.1 – Municipalités couvertes par la région d'étude.

Municipalité	Aire totale (km ²)	Aire incluse (km ²)	Ratio (%)
Candiac	17.28	17.28	100.0
Châteauguay	37.45	18.07	48.3
Delson	7.68	7.68	100.0
Kahnawake	46.20	46.18	100.0
La Prairie	43.62	39.63	90.9
Mercier	46.42	46.41	100.0
Napierville	4.49	1.58	35.1
Saint-Chrysostome	100.43	5.38	5.4
Saint-Constant	57.09	57.09	100.0
Saint-Cyprien-de-Napierville	97.92	34.24	35.0
Sainte-Catherine	8.36	8.36	100.0
Sainte-Clotilde	78.44	39.84	50.8
Saint-Édouard	52.47	52.47	100.0
Sainte-Martine	64.47	40.75	63.2
Saint-Isidore	52.01	52.01	100.0
Saint-Jacques-le-Mineur	67.65	67.65	100.0
Saint-Jean-sur-Richelieu	233.66	31.90	13.7
Saint-Mathieu	31.36	31.36	100.0
Saint-Michel	60.09	60.09	100.0
Saint-Patrice-de-Sherrington	92.40	73.15	79.2
Saint-Philippe	61.90	61.90	100.0
Saint-Rémi	78.76	78.76	100.0
Saint-Urbain-Premier	53.51	53.51	100.0
Très-Saint-Sacrement	98.88	24.50	24.8
TOTAL	1492.52	949.79	63.6

The total surface area of the municipalities in table 2.1 (950 km²) is slightly less than the surface area of the study region (954 km²) because the municipalities of Hemmingford, Brossard and Howick were not considered. In fact, the surface areas of the municipal territories included in the project limits were not significant (respectively 1.93, 0.23 and 0.04 km²). The estimation of the recharge of the fractured aquifer presented in the present report covers only the territory of the municipalities inside the study region. The estimation of the use of water (surface and groundwater) must cover the entire territory of a municipality since the necessary data to

l'estimation ne sont disponibles qu'à cette échelle (puits municipaux, population, activités agricoles). La supposition a donc été faite que l'usage de l'eau pour les municipalités partiellement dans la région d'étude était proportionnel à l'étendue de la municipalité dans la région d'étude.

3 TRAVAUX ANTÉRIEURS ET DONNÉES DISPONIBLES

3.1 Travaux antérieurs

La figure 3.1 montre la couverture de la région d'étude par certaines études antérieures. Tel que mentionné à la section précédente, les présents travaux sont reliés au contrôle de la contamination émise par le site des anciennes lagunes de Mercier. De nombreuses études locales ont été réalisées sur ce site, mais Pontlevoy (2004) a développé un modèle régional du secteur entourant le site de Mercier afin d'en définir le contexte (étendue du modèle régional indiquée à la figure 3.1; voir aussi Pontlevoy et al. 2002). Afin de permettre le développement d'un modèle d'écoulement régional, les travaux régionaux de Pontlevoy (2004) ont répertorié les données disponibles sur la stratigraphie des dépôts meubles, les propriétés hydrauliques des dépôts meubles et du roc, et la piézométrie. Ses travaux ont aussi documenté les débits des puits municipaux à l'époque ainsi que les problématiques reliées au niveau d'exploitation de l'eau souterraine, notamment par les puits municipaux et les activités agricoles. Le modèle régional de Pontlevoy (2004) a aussi permis d'estimer la recharge de l'aquifère rocheux régional. Pontlevoy (2004) a aussi développé un modèle numérique d'écoulement local dans le secteur des anciennes lagunes de Mercier puis Racine (2005) a utilisé ce modèle pour évaluer des solutions de contrôle ou de réhabilitation qui pourraient être envisageables. Lefebvre (2007) a fait une synthèse du contexte hydrogéologique du site des anciennes lagunes de Mercier et du potentiel de réhabilitation du site. Martel et al. (2018) ont récemment fait une nouvelle évaluation des technologies de réhabilitation qui pourraient être appliquées au site.

À l'échelle régionale, la Commission géologique du Canada (CGC) et le MELCC ont réalisé conjointement une étude hydrogéologique couvrant le bassin versant de la rivière Châteauguay à l'intérieur duquel se trouve une grande partie de la région d'étude (Côté et al. 2006). Cette étude, qui a servi de modèle au PACES, a produit des résultats détaillés à plusieurs niveaux, notamment un modèle géologique 3D des dépôts meubles (Tremblay 2008; Tremblay et al. 2010), la géochimie de l'eau souterraine (Blanchette 2006; Blanchette et al. 2010), l'estimation de la recharge de l'aquifère rocheux régional (Croteau 2006; Croteau et al. 2010) et la modélisation numérique de l'écoulement de l'eau souterraine (Lavigne 2006; Lavigne et al. 2010). Les travaux de Lavigne (2006) ont notamment impliqué la compilation des propriétés hydrauliques du roc fracturé ainsi que des données piézométriques et des débits des puits d'approvisionnement en eau dont les aires d'alimentation ont été définies. Sur la figure 3.1, la trame jaune montre l'étendue de l'estimation de la recharge ainsi que du modèle numérique qui ont été faits dans le cadre du projet Châteauguay.

Le PACES Montérégie Est a impliqué une étude hydrogéologique régionale couvrant en détail les ressources régionales en eau souterraine de cette région (Carrier et al. 2013). En plus des aspects couverts de façon systématique dans le cadre des projets PACES, cette étude a aussi impliqué la définition des propriétés hydrauliques du roc fracturé, notamment la réduction de la conductivité hydraulique du roc fracturé avec la profondeur (Laurencelle 2018). Sur la figure 3.1, la trame bleue montre la partie de la région d'étude qui a été couverte par le PACES Montérégie Est. Cette étude a notamment impliqué l'estimation de la recharge de l'aquifère rocheux dans le bassin versant de la rivière l'Acadie qui fait partie de la région d'étude. Encore une fois à l'échelle régionale, la SCABRIC, qui est l'OBV couvrant la zone du bassin versant de la rivière Châteauguay, a produit un portrait de ce bassin (Audet et al. 2015), incluant les eaux de surface et souterraines.

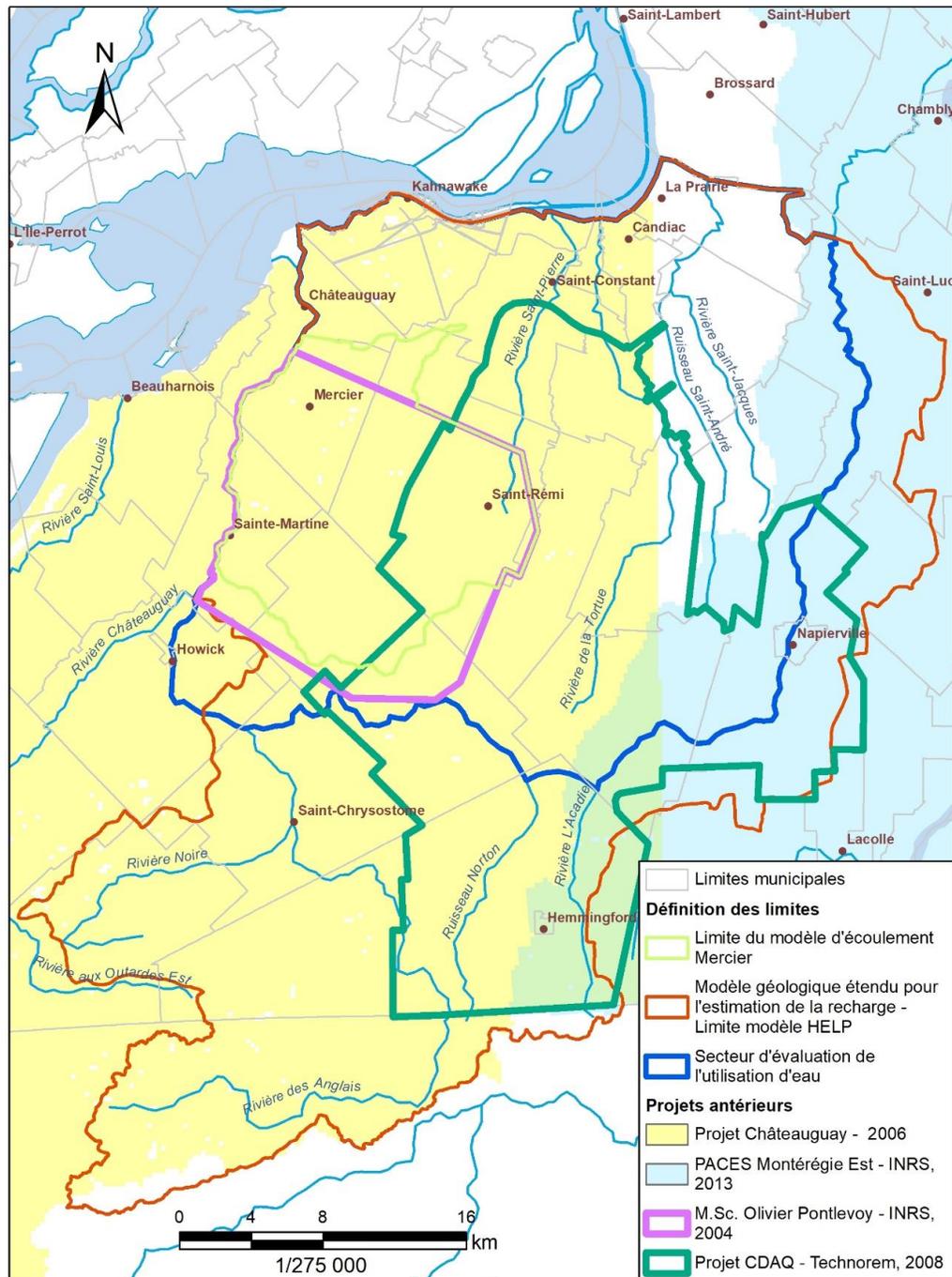


Figure 3.1 - Secteurs couverts par les études antérieures de Pontlevo (2004), dans le bassin de la rivière Châteauguay (Côté et al. 2006; Tremblay 2008), du programme CDAQ (Technorem 2008a et 2008b) et du PACES Montérégie Est (Carrier et al. 2013).

Encore une fois, à l'échelle régionale, la Commission géologique du Canada (CGC) a produit une carte Quaternaire couvrant l'ensemble du sud du Québec (Parent et al. 2017) ainsi qu'un modèle géologique 3D des dépôts meubles (Nastev et al. 2016a et 2016b). Ce modèle géologique est plus détaillé dans les secteurs où la CGC a été impliquée dans la réalisation d'études hydrogéologiques régionales, ce qui est le cas du bassin de la rivière Châteauguay et du PACES Montérégie Est.

Deux études portant sur les ressources en eau souterraine et leur usage dans la région d'étude se démarquent particulièrement, soit l'étude de Technorem (2008a et 2008b) et le projet RADEAU 1 (Ageco 2019). Technorem (2008a et 2008b) a caractérisé et modélisé le système aquifère régional des bassins versants des rivières Norton, Esturgeon, Saint-Pierre, de la Tortue et l'Acadie qui se trouvent dans la partie amont de la région d'étude du présent rapport. Les travaux ont été réalisés pour les producteurs maraîchers de la région et avaient pour but « d'accroître les connaissances sur le potentiel des nappes à fournir de l'eau à long terme pour l'irrigation en tenant compte des changements climatiques et des besoins actuels et futurs » (Technorem 2008a). À la figure 3.1, le polygone vert montre la région d'étude de Technorem.

La carte 2 montre la piézométrie de l'aquifère rocheux régional qui a été définie dans le cadre des travaux de Technorem (2008a et 2008b). Cette carte est basée sur la mesure sur le terrain de niveaux d'eau souterraine dans des puits ainsi que sur l'élévation de l'eau dans les cours d'eau qui, dans les deux cas, ont été basés sur des levés d'arpentage. Cette carte piézométrique correspond ainsi à la définition la plus représentative de l'écoulement de l'eau souterraine dans la région d'étude. Cette carte montre qu'à partir d'un haut piézométrique situé à l'est de Saint-Rémi, l'écoulement de l'eau souterraine se fait radialement vers les cours d'eau importants de la région où se fait l'émergence de l'écoulement régional dans l'aquifère rocheux.

Le mandat du projet RADEAU 1 (Ageco 2019) était « de dresser un portrait des besoins hydriques à échelle régionale des différents usagers pour comprendre quels usages et usagers de l'eau pourraient être les plus affectés dans le futur par les changements climatiques ». Le projet RADEAU 1 a mis une emphase particulière sur l'usage agricole de l'eau (de surface et souterraine) et a évalué des innovations qui permettraient d'atténuer les conflits d'usage de l'eau dans les secteurs avec de plus fortes pressions sur les ressources hydriques. Ce projet a couvert les régions de la Montérégie, de l'Estrie, de Chaudière-Appalaches, de Lanaudière et du Centre-du-Québec, mais la région de Saint-Rémi a fait l'objet d'une des deux études de cas à une échelle plus locale.

3.2 Données disponibles

Le tableau 3.1 compile les données disponibles sur la région d'étude, notamment les données obtenues du MELCC et du MAPAQ. Certaines données supplémentaires ont aussi été demandées à Technorem qui a réalisé des travaux importants dans la région d'étude, notamment les coordonnées des puits répertoriés dans leurs rapports (Technorem 2008a et 2008b). Enfin, certaines données hydrogéologiques (piézométrie, propriétés hydrauliques) et « historiques » devront être compilées dans une prochaine phase des travaux afin de vérifier s'il y a eu évolution des conditions, notamment les débits des puits municipaux recensés par Technorem (2008a et 2008b), Pontlevoy (2004) et Lavigne (2006).

Tableau 3.1 – Données disponibles dans la région d'étude.

Nature des données	Sources	Disponibilité
Fonds cartographiques		
Topographie	<i>Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)</i> - NASA	Obtenu
Géologie du roc	Système d'information géomineière du Québec (SIGÉOM) - MERN	Obtenu
Géologie du Quaternaire	RNCan et MERN	Obtenu
Utilisation du sol	Utilisation du territoire de 2017 (Données Québec) - MELCC	Obtenu
Suivi environnemental		
Données météorologiques (ID des stations météorologiques d'intérêt : 7023075, 702LED4, 7024100, 7027039 et 7027540)	Environnement et Changement climatique Canada	Obtenu
Débits des cours d'eau (ID des stations de jaugeage d'intérêt : 030907 et 030421)	Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) - MELCC	Obtenu
Niveaux d'eau souterraine (ID des puits d'observation d'intérêt : 03090001 et 03097102)	Réseau de suivi des eaux souterraines (RSESQ) - MELCC	Obtenu
Données stratigraphiques		
Descriptions de forages	SIH	Obtenu
	BADGEQ	Obtenu
	SIGÉOM	Obtenu
	Consultants	Obtenu
Modèle géologique des dépôts meubles	CGC	Obtenu
	Tremblay	Obtenu
	PACES	Obtenu
Propriétés hydrogéologiques		
Niveau d'eau souterraine	SIH	SIH
	Technorem	Obtenu
	Pontlevoy	À saisir ¹
Propriétés hydrauliques	Lavigne	À saisir ¹
	Technorem	Obtenu
	Pontlevoy	À saisir ¹
Propriétés hydrauliques	Lavigne	À saisir ¹
Utilisation de l'eau		
Grands préleveurs d'eau	MELCC	Obtenu
Débit des puits municipaux	Source pour notre estimation	Obtenu
	Technorem	À demander ²
	Pontlevoy	À saisir ¹
Activités agricoles	Lavigne	À saisir ¹
	MAPAQ	Obtenu
Estimation de l'usage de l'eau	RADEAU 1	Obtenu
	Technorem	Obtenu
Enquête sur l'irrigation	Technorem	À demander ²

1 : Les documents ont été obtenus mais les données n'ont pas été saisies électroniquement.

2 : Les données de Technorem (2008a et 2008b) devront être complétées dans le cadre de futurs travaux (pourrait exiger une entente de confidentialité).

La carte 3 montre la localisation des stations actives de suivi environnemental dans la région d'étude (stations météorologiques, puits d'observation et stations de jaugeage) alors que le tableau 3.2 indique leurs coordonnées et la période des mesures disponibles. Trois principales stations météorologiques sont présentes dans la région d'étude (Sainte-Martine, La Prairie et Hemmingford Four Winds). La figure 3.2 ainsi que les tableaux 3.3 à 3.5 montrent les normales à ces stations entre 1981 et 2010.

Plusieurs puits d'observation du RSESQ d'intérêt sont présents dans la région d'étude, notamment les deux puits indiqués au tableau 3.2 et dont les hydrogrammes sont montrés à l'annexe 1. La figure 3.3 montre l'hydrogramme du puits du RSESQ dans la région de Saint-Rémi qui est influencé par les captages présents dans ce secteur, notamment les puits d'irrigation dont l'effet saisonnier est visible sur l'hydrogramme. Ce puits montre que le niveau piézométrique a baissé de 6 à 8 m depuis les années 1980, ce qui indiquerait un effet important des prélèvements sur les conditions hydrogéologiques de l'aquifère rocheux régional.

Tableau 3.2 – Description du suivi environnemental actuellement en place dans la région d'étude.

Stations météorologiques - Environnement Canada					
ID	Nom	Latitude	Longitude	Altitude	Suivi
7023075	Hemmingford Four Winds	45.07	-73.72	61.00	1960-actuel
702LED4	L'Acadie	45.29	-73.35	43.80	1994-actuel
7024100	La Prairie	45.38	-73.43	30.00	1963-actuel
7027039	Sainte-Clotilde	45.17	-73.68	56.40	1993-actuel
7027540	Sainte-Martine	45.22	-73.85	38.10	1963-actuel

Puits d'observation - RSESQ (MELCC)							
ID	Nom	Latitude	Longitude	Altitude	Suivi	Aquifère	Confinement
03090001	1-MT	45.30	-73.72	51.53	2004-actuel	Dépôts meubles	Libre
03097102	-	45.26	-73.63	53.90	1980-actuel	Roc	Captif

Stations de jaugeage - CEHQ (MELCC)						
ID	Nom	Latitude	Longitude	Altitude	Suivi	Aire bassin (km ²)
030907	Des Anglais	45.16	-73.82	36.90	1973-actuel	642
030421	L'Acadie	45.39	-73.37	21.30	1979-actuel	367

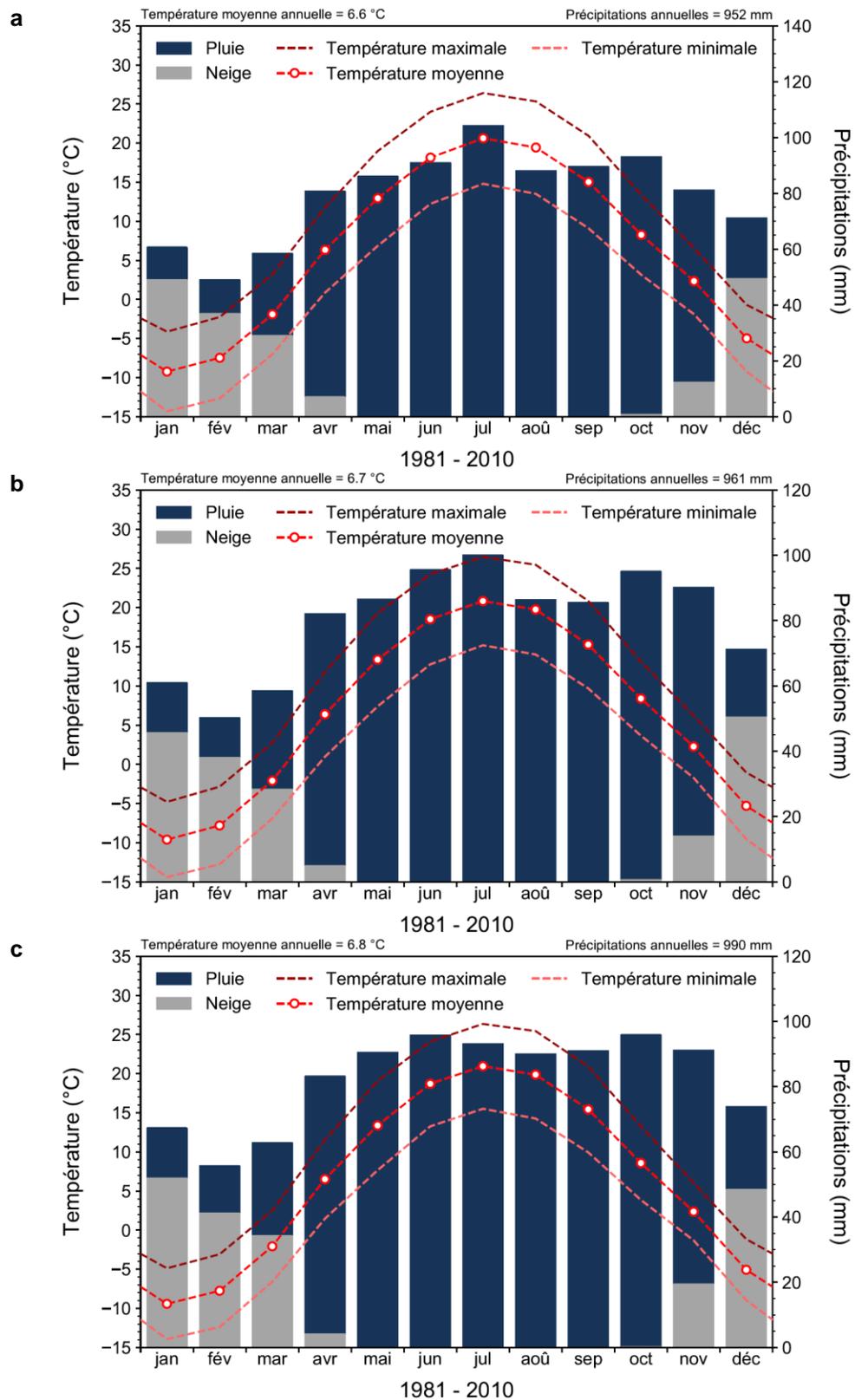


Figure 3.2 – Normales climatiques mensuelles pour la température et les précipitations de trois des cinq stations météorologiques d'intérêt dans la région d'étude pour la période de 1981 à 2010 (a : Hemmingford Four Winds – 7023075 ; b : La Prairie – 7024100 ; c : Sainte-Martine – 7027540).

Tableau 3.3 – Normales climatiques (1981 – 2010) à la station météorologique d’Hemmingford Four Winds (7023075).

Données	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Annuel
T _{min} journalière (°C)	-14.3	-12.7	-7.0	0.9	6.9	12.2	14.8	13.5	9.1	3.1	-1.9	-9.2	1.3
T _{moy} journalière (°C)	-9.2	-7.5	-1.9	6.3	13.0	18.2	20.6	19.4	15.0	8.3	2.3	-5.0	6.6
T _{max} journalière (°C)	-4.1	-2.3	3.2	11.8	19.0	24.0	26.4	25.3	20.9	13.4	6.6	-0.7	12.0
Pluie (mm)	12	12	29	74	86	91	104	88	89	92	69	22	768
Neige (mm)	49	37	29	7	0	0	0	0	0	1	12	49	184
P _{tot} (mm)	61	49	58	81	86	91	104	88	89	93	81	71	952
ETP (mm)	1	2	8	35	81	117	136	118	78	37	12	2	626

Tableau 3.4 – Normales climatiques (1981 – 2010) à la station météorologique de La Prairie (7024100).

Données	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Annuel
T _{min} journalière (°C)	-14.4	-12.7	-6.9	1.0	7.4	12.8	15.2	14.0	9.7	3.7	-1.7	-9.5	1.5
T _{moy} journalière (°C)	-9.6	-7.8	-2.1	6.4	13.4	18.5	20.8	19.8	15.3	8.4	2.3	-5.3	6.7
T _{max} journalière (°C)	-4.8	-2.8	2.7	11.8	19.3	24.3	26.5	25.5	20.9	13.1	6.2	-1.0	11.8
Pluie (mm)	15	12	30	77	86	95	100	86	85	94	76	21	780
Neige (mm)	46	38	28	5	0	0	0	0	0	1	14	50	181
P _{tot} (mm)	61	50	58	82	86	95	100	86	85	95	90	71	961
ETP (mm)	1	1	7	34	82	119	137	119	78	37	12	2	628

Tableau 3.5 – Normales climatiques (1981 – 2010) à la station météorologique de Sainte-Martine (7027540).

Données	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Annuel
T _{min} journalière (°C)	-13.9	-12.4	-6.6	1.5	7.7	13.3	15.5	14.3	9.9	3.9	-1.3	-9.0	1.9
T _{moy} journalière (°C)	-9.4	-7.8	-2.1	6.5	13.4	18.7	21.0	19.9	15.4	8.6	2.4	-5.1	6.8
T _{max} journalière (°C)	-4.9	-3.1	2.5	11.5	19.1	24.1	26.4	25.4	20.9	13.2	6.0	-1.2	11.7
Pluie (mm)	15	14	28	79	90	96	93	90	91	96	72	25	791
Neige (mm)	52	41	34	4	0	0	0	0	0	0	19	48	199
P _{tot} (mm)	67	56	63	83	90	96	93	90	91	96	91	74	990
ETP (mm)	1	1	7	35	82	120	137	120	79	38	12	2	635

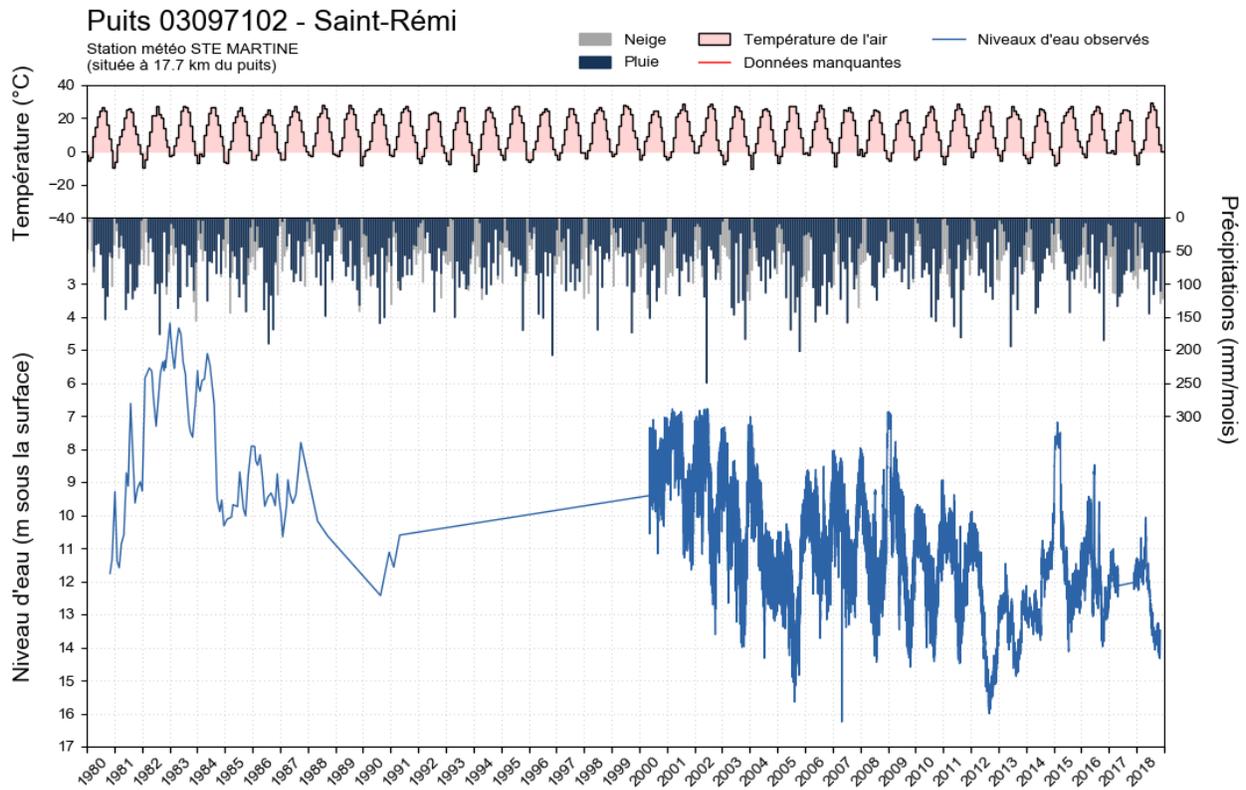


Figure 3.3 – Hydrogramme du puits 03097102 du RSEQ à l’ouest de Saint-Rémi associé aux données météorologiques de la station de Sainte-Martine (7027540) située à 17.7 km du puits.

4 DESCRIPTION DE LA RÉGION D'ÉTUDE

La carte 4 montre la topographie de la région d'étude qui est relativement plane. Un haut topographique à un peu plus de 70 m d'altitude est présent au sud et à l'est de Saint-Rémi et l'élévation est réduite dans toutes les directions, jusqu'à environ 50 m au sud où se trouve le ruisseau Norton, à environ 40 m à l'ouest en bordure de la rivière Châteauguay ainsi qu'à l'est en bordure de la rivière l'Acadie et à environ 25 m au nord près du fleuve Saint-Laurent. Le bassin versant de la rivière des Anglais, incluant le ruisseau Norton, occupe la limite sud de la région d'étude, alors que la moitié ouest de la région fait partie du bassin de la rivière Châteauguay. L'important bassin de la rivière l'Acadie recouvre la partie est de la région d'étude, alors que plusieurs bassins mineurs s'étirent en direction nord (rivières Saint-Régis, Suzanne, de la Tortue et Saint-Jacques).

La carte 5 montre la géologie du roc dans la région d'étude. La région d'étude se trouve à l'intérieur de la Plate-forme du Saint-Laurent et l'aquifère régional est constitué de roc sédimentaire peu déformé mais fracturé du Paléozoïque inférieur. Lavigne et al. (2005) ont montré que la conductivité hydraulique des unités géologiques est similaire alors que Laurencelle (2018) a défini un profil de conductivité hydraulique qui diminue avec la profondeur, passant de valeurs de l'ordre de 10^{-5} m/s dans la partie superficielle du roc jusqu'à des valeurs de l'ordre de 10^{-9} m/s à 100 m de profondeur. Lavigne et al. (2005) ont obtenu une conductivité hydraulique K moyenne de 5.1×10^{-5} m/s sur la base d'une compilation des essais hydrauliques disponibles sur l'ensemble du bassin de la rivière Châteauguay. La moyenne géométrique des 281 valeurs de K compilées par Technorem (2008a et 2008b) est de 3.7×10^{-5} m/s, pour une région un peu plus restreinte que la présente région d'étude. Toutefois, les valeurs de K compilées par Lavigne et al. (2005) ainsi que Technorem (2008a et 2008b) variaient grandement entre 10^{-6} et 10^{-3} m/s.

La figure 4.1 (gauche) montre la séquence stratigraphique complète des dépôts meubles qui se retrouvent dans la région d'étude établie par Tremblay et al. (2010) (détails dans Tremblay 2008). Toutefois, pour les fins des études hydrogéologiques, cette séquence peut être considérablement simplifiée. La figure 4.1 (droite) montre la séquence hydrostratigraphique considérée par Croteau et al. (2010) pour le bassin de la rivière Châteauguay (détails dans Croteau 2006). C'est la même hydrostratigraphie simplifiée qui a été considérée pour le développement du modèle numérique d'écoulement de l'eau souterraine représentant le site des anciennes lagunes de Mercier et la région entourant le site.

De la base au sommet, la séquence de dépôts meubles est composée de till peu perméable, d'argile marine très peu perméable et d'alluvions. Localement, des sédiments fluvioglaciaires (esker) érodent le till et sont partiellement recouverts par l'argile. La topographie de la surface du roc contrôle l'épaisseur et la nature des dépôts meubles retrouvés en surface. La carte 6 montre la distribution des dépôts meubles alors que les cartes 8 à 11 présentent les épaisseurs des dépôts meubles. En surface, on retrouve du till au centre de la région d'étude, alors que l'argile recouvre la région à l'ouest et au nord-est. Des alluvions récentes sont présentes au nord en bordure du fleuve Saint-Laurent. Un esker est présent à l'est de Mercier et un autre à l'est de la partie amont de la rivière Saint-Jacques. L'épaisseur totale des sédiments recouvrant le roc va de 0 à 45 m. L'épaisseur de till est typiquement comprise entre 5 et 15 m et celle de l'argile est généralement inférieure à 5 m mais peut atteindre plus de 10 m dans la partie nord-est de la région d'étude ainsi qu'entre Mercier et Sainte-Martine. L'esker de Mercier peut avoir plus de 15 m d'accumulation de sable et gravier.

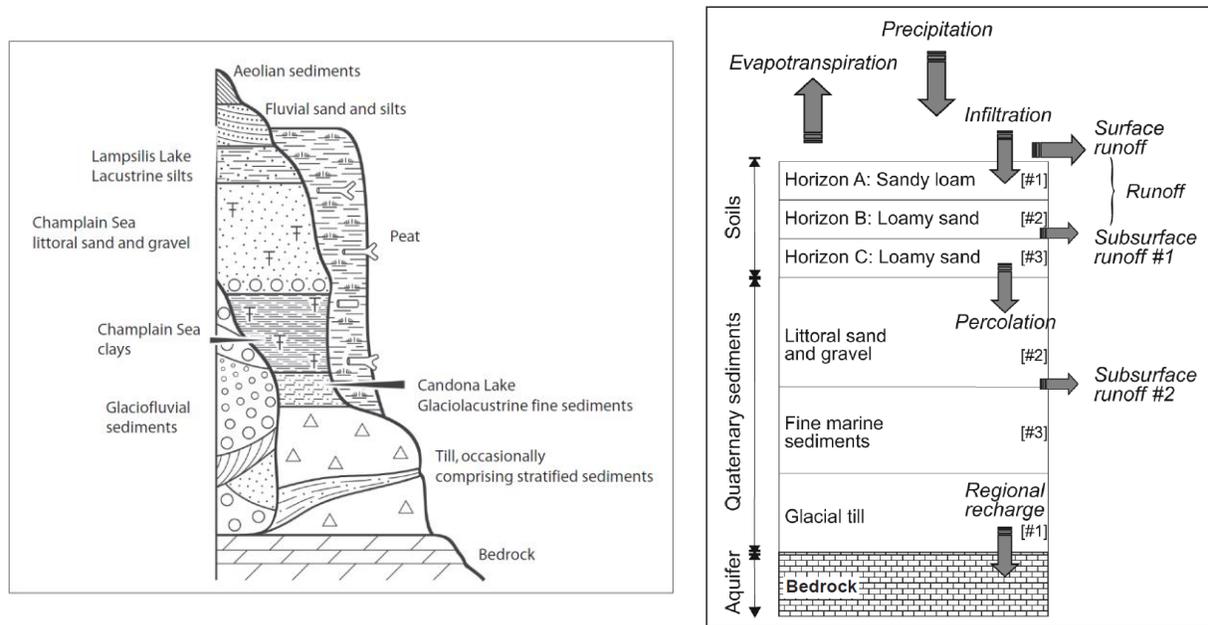


Figure 4.1 – Stratigraphie détaillée des dépôts meubles (à gauche : Tremblay et al. 2010) et hydrostratigraphie des dépôts meubles dans la région d'étude (à droite : Croteau et al. 2010).

La carte 7 montre l'utilisation du sol alors que la figure 4.2 présente la proportion des différentes utilisations du sol des municipalités de la région d'étude. La marge nord de la région d'étude en bordure du fleuve Saint-Laurent est fortement urbanisée, sauf pour Kahnawake dont le territoire est majoritairement boisé. On retrouve aussi des secteurs forestiers dans la partie sud de la région d'étude. Sinon, l'occupation du sol est majoritairement agricole, particulièrement au centre de la région où de 70 à 80% du territoire des municipalités est occupé par l'agriculture (figure 4.2). La figure 4.3 montre la proportion des différentes cultures dans les secteurs agricoles des municipalités. Les cultures du soya et du maïs sont dominantes, mais les cultures maraîchères sont relativement importantes (autour de 10% des surfaces agricoles) dans certaines municipalités (Mercier, Saint-Constant, Sainte-Clotilde, Saint-Édouard, Saint-Isidore, Saint-Michel, Saint-Patrice-de-Sherrington et Saint-Rémi). Les secteurs où les cultures maraîchères sont présentes sont distingués sur la carte 7. Cette carte de l'utilisation du sol obtenue du MELCC semble toutefois sous-estimer la superficie du territoire des municipalités qui est dédié aux cultures maraîchères par rapport à la compilation des activités agricoles obtenue du MAPAQ (section 8, figure 8.2). Les secteurs identifiés comme étant dédiés aux cultures maraîchères de la carte 7 correspondent en partie aux endroits cartographiés comme ayant des sédiments de marécage ou organiques sur la carte des dépôts meubles (carte 6).

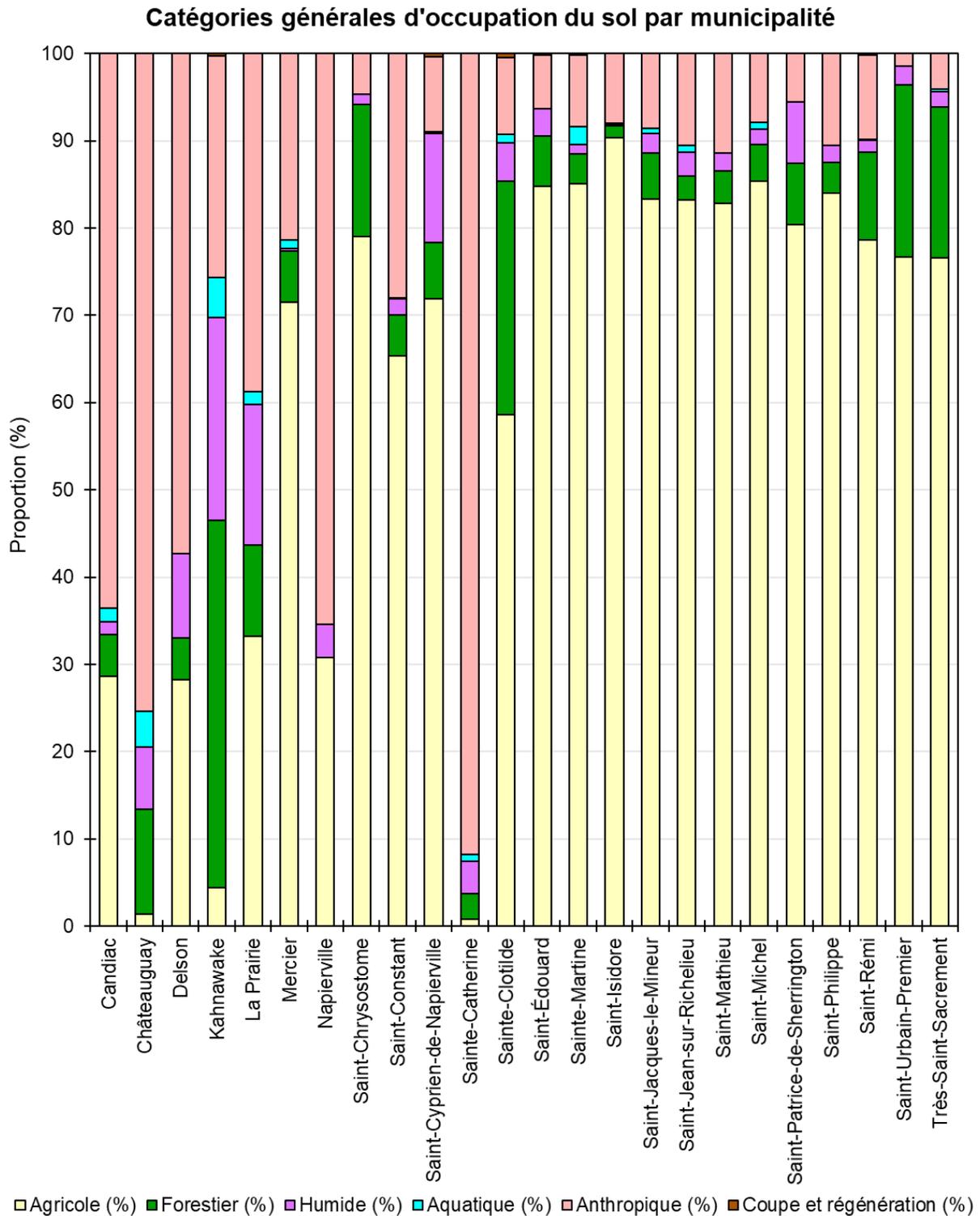


Figure 4.2 – Proportions de l'occupation du sol par municipalité (MELCC 2020).

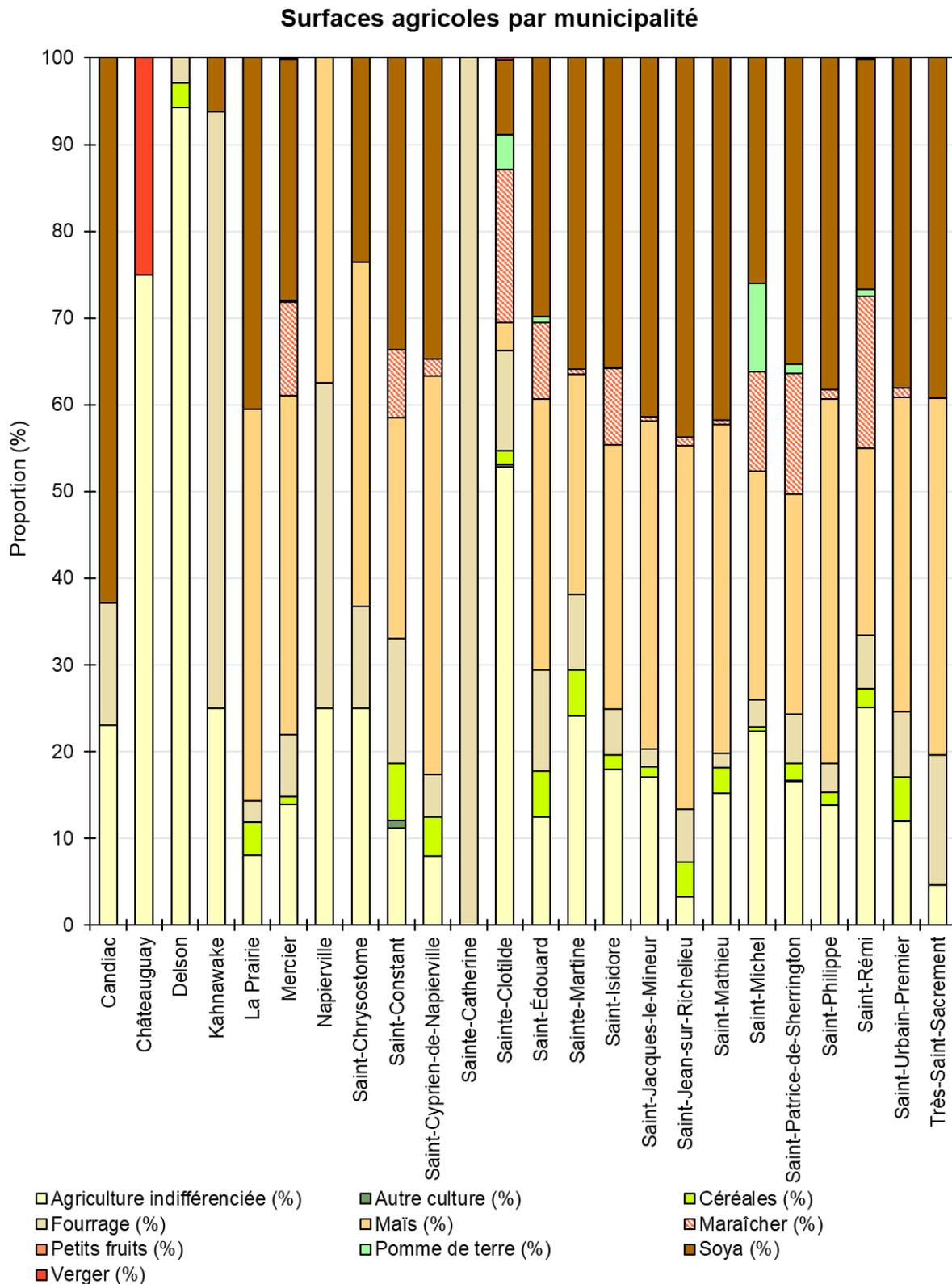


Figure 4.3 – Proportions des types de culture dans les secteurs agricoles par municipalité (MELCC 2020).

5 EXTENSION DU MODÈLE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL

Tel que mentionné précédemment, Tremblay (2008) a développé un modèle géologique 3D des dépôts meubles couvrant le bassin versant de la rivière Châteauguay. En fait, ce modèle excède les limites du bassin (figure 3.1) car il a servi de base à l'estimation de la recharge par Croteau et al. (2010) qui a aussi servi d'intrant dans le modèle numérique d'écoulement de Lavigne et al. (2010). Ce modèle géologique couvre tout le territoire du modèle numérique d'écoulement présentement en voie de réalisation pour évaluer les concepts de contrôle de la contamination émise par le site des anciennes lagunes de Mercier (polygone vert pâle à la figure 2.1). D'importants travaux de caractérisation géophysique et hydrogéologique ont toutefois été réalisés dans le secteur du site contaminé, ce qui fait qu'un nouveau modèle géologique à haute résolution a été développé pour les fins du développement du modèle numérique d'écoulement (rectangle vert foncé à la figure 2.1). Ce nouveau modèle géologique utilise la même hydrostratigraphie simplifiée que Croteau et al. (2010) visible sur la figure 4.1. Toutefois, ce modèle géologique ne couvre pas tout le territoire de la région d'étude et il faut donc étendre le modèle géologique récemment développé. Ce modèle géologique récent a aussi une résolution spatiale détaillée qui n'est pas requise dans le cadre des travaux documentés dans le présent rapport.

Un autre modèle géologique développé par la Commission géologique du Canada (CGC) couvre tout le sud du Québec (Nastev et al. 2016a et 2016b). Ce modèle a généralement une faible résolution spatiale et une précision limitée, mais il est plus précis dans la région d'étude car il est basé sur les travaux réalisés dans le bassin de la rivière Châteauguay (Tremblay 2008) ainsi que du PACES Montérégie Est (Carrier et al. 2013) auxquels la CGC a participé. Ainsi, pour produire un nouveau modèle géologique servant à la réalisation du présent mandat, le modèle à haute résolution récemment développé a été fusionné au modèle de la CGC. Cette fusion a été faite en « échantillonnant » les épaisseurs des deux modèles sur une maille avec un espacement de 100 m. Sur les zones où le modèle récent est disponible, ce modèle a été utilisé, alors qu'en dehors de son étendue c'est le modèle de la CGC qui a été échantillonné.

Comme pour le modèle géologique de Mercier, le nouveau modèle représente une séquence stratigraphique simplifiée en 3 contextes qui regroupent, du bas vers le haut, le till, l'esker (incluant les dépôts granulaires plus grossiers comme les sables) et l'argile. Le modèle est construit à partir de l'élévation du roc et en ajoutant successivement les épaisseurs des dépôts. L'élévation du roc est interpolée par des étapes successives de krigeage en utilisant en premier les données les plus éparses et les moins fiables, jusqu'aux données les plus fiables et les plus denses pour obtenir la carte finale. À chaque nouvelle itération, l'interpolation obtenue à l'itération précédente est utilisée afin de représenter les variations à honorer de façon à minimiser le degré d'incertitude sur les nouveaux éléments créés. Pour le moment, le modèle ne représente pas les sédiments littoraux qui pourraient être présents par endroits ainsi que des sédiments fluviaux à l'extrémité nord (près du fleuve). Dans une éventuelle prochaine phase de travaux, la représentativité de ce nouveau modèle devrait être vérifiée sur la base des travaux de Tremblay (2008) ainsi que des coupes géologiques présentées par Technorem (2008a et 2008b). Il serait notamment souhaitable d'obtenir un bon niveau de compatibilité avec le modèle géologique de Tremblay (2008) qui avait servi de base aux travaux d'estimation de la recharge par Croteau (2006).

En plus des modèles existants, toutes les informations disponibles et pertinentes afin d'obtenir une meilleure représentation de la stratigraphie devront être comparées et utilisées pour la validation du modèle géologique. En particulier, les données stratigraphiques ponctuelles, dont les coupes, les données de puits de la Banque de Données Géochimiques du Québec (BADGEQ), le Système d'information hydrogéologique (SIH), les captages municipaux, les données arpentées de Technorem et d'autres sources de données de forages. Ces données sont regroupées dans la base de données sur une nouvelle structure basée sur les standards de l'OGC (Open Geospatial Consortium) (Lefebvre et al. 2019). L'intégralité de ces données ponctuelles a été extraite des bases de données ministérielles, de rapports ou d'études antérieures. Les informations intégrées à cette base de données à référence spatiale peuvent être de natures diverses : géochimiques (résultats d'analyse), géologiques (affleurements), stratigraphiques (descriptions de forage), hydrauliques (essais de pompage) ou encore piézométriques (niveaux de nappe). Les descriptions de matériaux des données de forage ont été transformées en code CGC pour fournir de l'information uniformisée.

Les cartes 8 à 11 montrent les épaisseurs des sédiments dans le modèle géologique alors que la carte 12 montre la topographie détaillée de la surface du sol obtenue de levés LiDAR. La carte 8 présente l'épaisseur totale de sédiments recouvrant le roc qui va de 0 à 45 m. L'épaisseur totale de sédiments varie généralement entre 5 et 20 m, mais il y a des accumulations plus importantes entre Mercier et Sainte-Martine ainsi qu'au sud de Sainte-Martine, alors que les épaisseurs sont généralement faibles à la limite sud de la région d'étude. La carte 9 montre que l'épaisseur de till est typiquement comprise entre 5 et 15 m mais que cette épaisseur est assez variable. La carte 11 présente l'épaisseur d'argile qui est souvent absente et dont l'épaisseur maximale est généralement inférieure à 5 m, mais cette épaisseur peut atteindre plus de 10 m dans la partie nord-est de la région d'étude ainsi qu'entre Mercier et Sainte-Martine où il y a une forte accumulation dans une dépression présente au-dessus du till. Enfin, la carte 10 montre l'épaisseur de sable et gravier accumulé dans l'esker de Mercier qui peut avoir plus de 15 m. Cet esker est le seul aquifère granulaire qui a été défini dans le modèle géologique. Toutefois, un autre esker a été cartographié dans la partie amont à l'est de la rivière Saint-Jacques (carte 6). Il sera nécessaire de vérifier si les données de forage permettent de définir l'épaisseur et l'étendue de cet esker en profondeur.

6 ESTIMATION DE LA RECHARGE

Dans la région d'étude, les aquifères sont essentiellement représentés par deux types de matériaux : (1) les dépôts fluvioglaciaires et (2) le roc fracturé. Les premiers sont formés par les eskers constitués de sables et graviers sous-glaciaires très perméables (Tremblay 2008) dont l'étendue est limitée, dont l'esker de Mercier à l'ouest de la zone d'étude. Quant au roc fracturé, il forme l'aquifère régional à partir duquel la majorité des prélèvements d'eau souterraine sont effectués. Cet aquifère rocheux régional représente donc la principale ressource en eau souterraine de la région d'étude. Il est donc nécessaire de connaître la recharge de cet aquifère dans le but de pouvoir estimer la pression qui peut être exercée par les prélèvements sur cette ressource (section 8).

La recharge de l'aquifère régional rocheux a pu être obtenue en majeure partie grâce à des études antérieures (carte 13, partie de gauche) utilisant le modèle d'infiltration HELP (*Hydrologic Evaluation of Landfill Performance*). En effet, la recharge de la portion ouest de la zone d'étude a déjà été estimée lors d'une caractérisation régionale couvrant le bassin versant de la rivière Château-guay (Croteau et al. 2010) pour la période allant de 1963 à 2001. De même, la portion est de la zone d'étude a auparavant été couverte par le PACES Montérégie Est (Carrier et al. 2013) et la recharge annuelle moyenne y a été évaluée entre 1970 et 2010.

Toutefois, une portion d'environ 150 km² de la région d'étude n'a pas été couverte par ces deux études. La recharge de l'aquifère régional rocheux de cette zone (polygone noir sur la carte 13, partie de droite) a néanmoins pu être estimée par une méthode indirecte en utilisant la carte des dépôts quaternaires (Parent et al. 2017). En effet, comme les propriétés des unités des dépôts meubles présents en surface contrôlent en majeure partie la quantité d'eau s'infiltrant jusqu'à la nappe, il est alors possible d'estimer la recharge de l'aquifère régional sur la zone non couverte par une estimation. Cette approche simple et rapide permet alors d'éviter de refaire tous les processus de production des fichiers d'entrée du modèle HELP, de faire tourner le modèle puis de traiter les données en sortie.

La procédure suivie pour estimer la recharge de l'aquifère rocheux régional est donc basée sur l'attribution de données de recharge typiques des matériaux de surface puisque ceux-ci influencent directement le taux de recharge de l'aquifère rocheux sous-jacent. Une zone tampon de 10 km autour de la zone sans données a été utilisée pour extraire les données de recharge des mailles de 250 m par 250 m des grilles des deux projets antérieurs. Il a été décidé de ne pas prendre une zone tampon trop large afin de ne pas s'éloigner des conditions climatiques locales tout en ayant suffisamment de données de recharge par type de matériaux pour l'analyse statistique (tableau 6.1). Pour les quelques mailles incluses sur le secteur où les deux anciens projets se recoupent au sud de la zone d'étude (carte 13, partie de gauche), les données de recharge issues du projet le plus récent, le PACES Montérégie Est, ont été retenues. Ainsi, 11 697 mailles de recharge ont été sélectionnées dans cette zone tampon pour déterminer le taux de recharge par unité quaternaire sur les 2 313 mailles de la zone sans données de recharge (tableau 6.1). Finalement, la médiane de la recharge a été attribuée à chacune des 12 unités quaternaires localisées sur la zone à combler (tableau 6.1). Sur cette zone, les sédiments fins d'eau profonde correspondent à l'unité la plus représentée (N = 1 299 mailles) avec une recharge médiane de 17 mm/an tandis que la recharge médiane sur cette zone est égale à 48 mm/an. La carte résultante de la recharge de l'aquifère rocheux (carte 14) montre d'ailleurs une bonne continuité entre les anciens projets et la zone comblée.

Tableau 6.1 – Attribution du taux de recharge selon le type d'unité quaternaire.

Unité quaternaire	Recharge (mm/an) estimée à partir des anciens projets sur une zone tampon de 10 km							Recharge (mm/an) choisie sur la zone sans données	
	Min	Moy	Max	Q1	Méd	Q3	N	Valeur	N
Séd. de marécage et de marais	0	49	284	23	32	39	862	32	68
All. actuelles	27	27	27	27	27	27	1	27	3
All. des terrasses fluviales	0	29	277	16	17	29	724	17	141
All. des terrasses fluviales anciennes	0	30	282	10	12	21	241	12	81
Séd. littoraux et pré-littoraux	0	97	250	34	103	142	84	103	22
Séd. littoraux et pré-littoraux	0	85	308	28	49	129	984	49	128
Séd. fins d'eau profonde	0	45	368	10	17	37	4138	17	1299
Séd. juxtaglaciaires	0	179	326	33	230	285	58	230	4
Séd. proglaciaires non différenciés	23	206	287	193	256	268	4	256	8
Till remanié en couverture continue	0	166	332	144	187	207	518	187	151
Till en couverture généralement continue	0	127	305	102	108	162	3962	108	404
Till en couverture mince et discontinue	16	122	272	111	130	135	121	130	4

Selon la carte finale de la recharge de l'aquifère régional (carte 14), les secteurs où la recharge est la moins importante (< 50 mm/an) sont associés à la présence de dépôts argileux en surface qui correspondent généralement aux sédiments fins d'eau profonde. La recharge de l'aquifère rocheux est plus élevée au centre de la zone d'étude (entre 50 et 150 mm/an) où la couverture de till est généralement continue. Localement, des zones de recharge importante (> 200 mm/an) sont localisées au droit des sédiments fluvioglaciaires associées notamment à l'esker de Mercier où les dépôts grossiers et perméables reposent directement sur le roc, facilitant alors l'infiltration de l'eau vers l'aquifère régional. La recharge est également importante au droit d'une zone restreinte de roc affleurant au sud-ouest de la zone d'étude et quelques secteurs de tills plus perméables à l'est.

Dans l'ensemble, la recharge annuelle moyenne de l'aquifère régional sur la zone d'étude est de l'ordre de 72 mm/an et peut atteindre localement un maximum de 326 mm/an. Sur le secteur de recharge importante au centre de la zone d'étude (autour de Saint-Rémi), la recharge avoisine plutôt les 100 mm/an. Ce résultat est confirmé par les travaux de Technorem (2008a) où la recharge estimée grâce à la modélisation numérique avoisinait les 91 mm/an sur un secteur couvrant essentiellement l'amont de la zone d'étude actuelle.

À partir de la carte de recharge produite, la recharge annuelle moyenne par municipalité a pu être calculée (carte 15) (voir également l'annexe 2). Le taux de recharge annuel moyen est le plus élevé (> 100 mm/an) pour la municipalité de Saint-Jacques-le-Mineur à l'est et le territoire autochtone de Kahnawake au nord-ouest. La recharge du roc est également importante (entre 75 et 100 mm/an) à Saint-Cyprien-de-Napierville, Saint-Patrice-de-Sherrington, Saint-Édouard, Saint-Michel, Châteauguay et Saint-Rémi. À l'inverse, elle peut être qualifiée de faible (< 25 mm/an) dans les municipalités de Saint-Chrysostome et Sainte-Martine au sud-ouest de la zone d'étude et de plutôt faible (entre 25 et 50 mm/an) à Delson, La Prairie, Saint-Jean-sur-Richelieu et Saint-Philippe.

Afin d'avoir une estimation du volume d'eau annuel moyen atteignant l'aquifère rocheux par municipalité, le taux de recharge moyen par municipalité (mm/an) a été multiplié par la superficie du territoire municipal (km²) inclus dans la zone d'étude. La carte obtenue présente donc la recharge de l'aquifère rocheux par municipalité en Mm³/an (soit en million de m³/an ou 10⁶ m³/an; carte 16) (voir aussi l'annexe 2). Comme les superficies de certaines municipalités sont importantes, la distribution de la recharge par municipalité varie quelque peu au regard de la carte précédente (carte 15). Ainsi, c'est la municipalité de Saint-Rémi qui présente le volume de recharge annuel le plus élevé avec 7.85 Mm³/an. D'autres municipalités ont des volumes annuels de recharge au roc importants (entre 5.00 et 7.50 Mm³/an) : Saint-Michel, Saint-Patrice-de-Sherrington et Saint-Jacques-le-Mineur ainsi que le territoire autochtone de Kahnawake. À l'inverse, la recharge de l'aquifère rocheux régional est peu importante (entre 1.00 et 2.50 Mm³/an) à Saint-Mathieu, Châteauguay, Saint-Philippe, La Prairie, Très-Saint-Sacrement, Saint-Jean-sur-Richelieu et Candiac et même assez faible (< 1.00 Mm³/an) à Sainte-Martine, Sainte-Catherine, Delson et Saint-Chrysostome. Sur l'ensemble de la région d'étude, les 72 mm/an de recharge annuelle moyenne de l'aquifère rocheux représentent au final un volume de l'ordre de 68.65 Mm³/an. La compilation des taux de recharge du roc par municipalité est présentée dans le tableau A.1 de l'annexe 2.

Cette estimation de la recharge de l'aquifère rocheux régional par municipalité sert de base à l'élaboration de l'indicateur de stress sur les eaux souterraines présenté dans la section 8 du présent rapport. La grille de recharge élaborée dans la présente section à partir des données antérieures sera également utilisée comme donnée de référence pour établir les relations avec les conditions climatiques et hydrologiques historiques. Comme les estimations de recharge de la zone à combler paraissent cohérentes avec les données des études antérieures proches, le travail d'estimation de la recharge sur toute la zone d'étude n'a pas été refait avec le modèle d'infiltration HELP.

Bien que non plus prévu dans notre mandat, nous avons estimé plus précisément la recharge dans l'esker de Mercier. Ce travail a été réalisé parce que la résolution de l'estimation de la recharge à l'échelle régionale avec HELP ne permet pas nécessairement de représenter les conditions spécifiques de l'esker. La recharge de l'esker doit être bien définie pour les fins de la modélisation des options de piège hydraulique qui remplaceraient l'UTES. L'annexe 3 du rapport documente le travail fait avec le logiciel GWHAT développé par Gosselin (2016) (voir aussi Gosselin et al. 2020) pour estimer la recharge sur la base de l'hydrogramme d'un puits de suivi du RSESQ localisé dans l'esker en amont de l'UTES. Ces travaux montrent que la recharge est en moyenne de l'ordre de 500 mm/an dans l'esker, mais qu'elle varie de moins de 350 mm/an à plus de 650 mm/an en relation avec la variation interannuelle des précipitations. Cette recharge se produit principalement suite à la fonte du couvert de neige en mars et avril, mais de la recharge se produit aussi à l'automne entre octobre et décembre. La recharge est faible de mai à septembre, inclusivement, alors que la forte évapotranspiration ne permet pas l'infiltration des précipitations.

7 ESTIMATION DE L'USAGE DE L'EAU À L'ÉCHELLE MUNICIPALE

Un bilan complet des usages de l'eau a été réalisé sur la région d'étude. L'exercice a aussi permis de comparer et de valider les résultats avec les bilans antérieurs réalisés sur la région d'étude par RADEAU 1 (Ageco 2019) et par Technorem (2008a et 2008b) (voir section 9). Des travaux complémentaires sont à prévoir afin d'évaluer plus précisément l'usage de l'eau pour l'irrigation ainsi que la variation des besoins en eau en fonction des conditions météorologiques.

Ces travaux ont demandé la collaboration de différents organismes afin d'obtenir les données de base nécessaires à la compilation des usages puis de faire une estimation juste des besoins actuels de l'irrigation : le ministère de l'Agriculture, des Pêches et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), l'Institut de Recherche et de Développement en Agriculture (IRDA), la fédération locale de l'Union des producteurs agricoles (UPA) et les producteurs agricoles.

Les travaux suivants ont aussi été réalisés afin d'évaluer l'usage de l'eau :

- Inventaire des usages municipaux et des grands préleveurs actuels (base de données du MELCC sur les Grands préleveurs d'eau, GPE);
- Inventaire des réseaux de distribution d'eau municipaux et statistiques de populations (MELCC et ministère des Affaires municipales et de l'Habitation, MAMH);
- Compilation des données d'usages agricoles (collaboration RADEAU, MAPAQ, UPA, IRDA);
- Carte de la distribution spatiale des cultures (conditions actuelles);
- Inventaire des puits résidentiels (SIH ou hors réseau);
- Inventaire des utilisateurs de l'eau souterraine et évaluation de l'usage actuel de l'eau sur la région d'intérêt à l'échelle municipale;
- Carte montrant la distribution spatiale de l'usage de l'eau souterraine à l'intérieur des municipalités sur la base de l'utilisation du sol et des localisations des puits ayant des prélèvements importants.

Les travaux suivants restent à compléter ultérieurement :

- Carte de la distribution spatiale des cultures (évolution future prévisible);
- Carte de la distribution des puits d'irrigation et leurs débits (UPA et producteurs);
- Définir les usages spécifiques au niveau municipal (consulter l'enquête sur l'usage de l'eau auprès des agriculteurs des municipalités par Technorem; accès à l'enquête demandé);
- Identification d'usages ponctuels particuliers non répertoriés (carrières);
- Enquêtes auprès de municipalités afin d'avoir les débits réels de l'eau distribuée;
- Évaluation des besoins agricoles en eau en fonction du climat ou des conditions météorologiques (MAPAQ et producteurs);
- Projection plus précise des usages futurs de l'eau sur la base d'une enquête auprès des utilisateurs d'eau (RADEAU 1, MAPAQ, producteurs, municipalité de Saint-Rémi).

L'usage actuel de l'eau a été évalué en utilisant la même procédure que pour les projets PACES (Carrier et al. 2013). Les détails méthodologiques sont repris ici et résumés à la figure 7.1 (protocole 26, PACES Chaudière-Appalaches; Lefebvre et al. 2015). Globalement, la même procédure méthodologique est appliquée pour les calculs des bilans pour l'eau de surface et l'eau souterraine. Pour les besoins du présent rapport, l'accent est mis sur les résultats du bilan d'utilisation de l'eau souterraine.

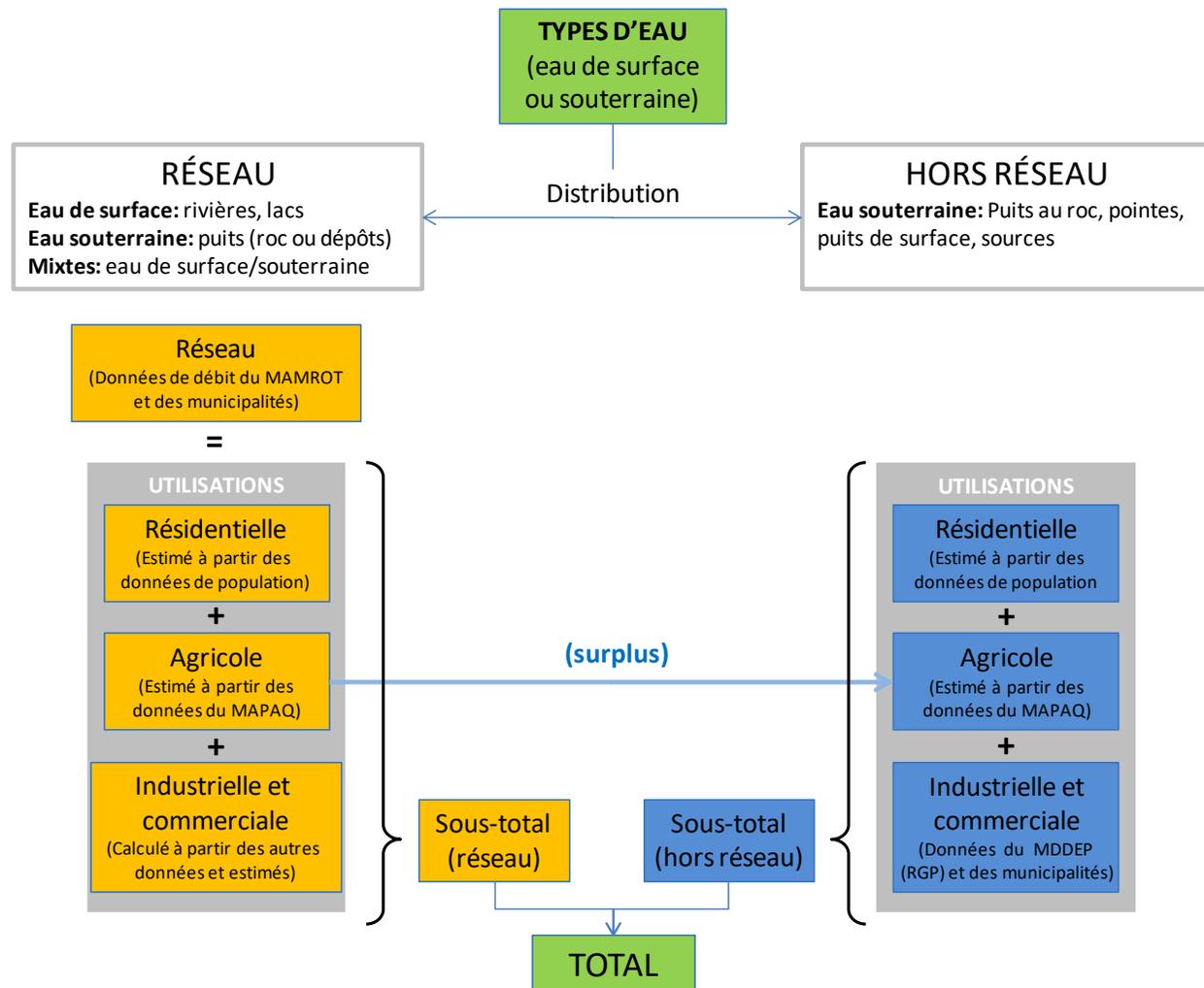


Figure 7.1 – Organisation des usages de l'eau en fonction du type d'utilisation et de la provenance de l'eau servant de base à l'estimation de l'usage de l'eau (Lefebvre et al. 2015).

Les usages de l'eau sont regroupés en 3 catégories : résidentiel, agricole et industriel/commercial/institutionnel (ICI). Afin d'obtenir un portrait complet de tous les usages, il est nécessaire de compiler les informations pour l'eau souterraine et l'eau de surface. Les informations recueillies doivent permettre de définir la provenance (surface ou souterraine) et la façon dont l'eau est distribuée (par aqueduc ou puits privés). Les bilans d'eau sont colligés par municipalité parce que la majorité des informations sont disponibles seulement au niveau municipal. Lorsqu'il n'y a pas de réseau d'aqueduc, l'approvisionnement est présumé être fait à partir de l'eau souterraine.

Pour l'usage de l'eau distribuée par réseau, le bilan total est donné par les débits d'eau distribués par les municipalités. À cet effet, le MAMH et le MELCC compilent les débits annuels d'eau distribués pour chaque municipalité, ainsi que les statistiques de population totale et celle qui reçoit l'eau distribuée par réseau. Ensuite, le total d'eau distribuée est réparti entre les 3 différents usages. La première catégorie d'usage calculée est celle de l'utilisation résidentielle à partir des données de population desservie (MAMH) en attribuant un taux fixe de consommation de 250 L/personne/jour. Le deuxième usage calculé est celui de l'eau utilisée à des fins agricoles. Pour la région d'étude, aucune information n'indique qu'il y ait une utilisation de l'eau de réseaux à des fins agricoles, mais il est possible qu'une telle information devienne disponible (notamment provenant des enquêtes réalisées auprès des agriculteurs par Technorem 2008a et 2008b), auquel cas le bilan pourrait être ajusté. Le bilan de l'usage à des fins ICI est l'eau restante des débits d'eau totale distribuée avec les portions résidentielle et agricole en moins. Le bilan d'eau ICI est donc une catégorie qui inclut par défaut tout ce qui n'est pas résidentiel et agricole, incluant les pertes de réseau et les autres types d'usages non répertoriés (de même que les erreurs possibles sur les débits d'eau distribués qui sont disponibles).

Le bilan des usages provenant des approvisionnements privés est calculé différemment de celui des approvisionnements par réseaux. La majorité de ces approvisionnements se fait via les puits privés. L'utilisation est aussi estimée pour les 3 catégories d'usages (résidentiels, ICI et agricoles) et la somme représente le total du bilan pour l'eau souterraine. La même procédure est appliquée pour l'eau de surface. Pour l'utilisation résidentielle, le bilan est calculé à partir du nombre de résidents non desservis par réseau, provenant du recensement du MAMH, avec le même taux de consommation par personne (250 L/jour). L'utilisation ICI est basée sur le recensement des grands préleveurs d'eau (GPE) compilé par le MELCC et en sélectionnant spécifiquement les activités ICI. La version des GPE de 2019 a été utilisée de même que la version de 2018 (révisée) et le plus grand des deux volumes d'eau a été retenu pour le bilan. Les enregistrements des GPE comprennent des activités assignées à différents usages, notamment les captages municipaux, les ICI et des usages agricoles. Des données ponctuelles, non recensées dans les GPE pourraient aussi être ajoutées au bilan si elles étaient disponibles. Pour l'usage agricole, les données utilisées proviennent des estimations de productions végétales (superficies par type de culture en ha) et animales (têtes de bétail) compilées par municipalité par le MAPAQ. Les estimations d'usages d'eau sont réalisées à partir des taux applicables pour chaque type de production agricole animale et végétale. Ces taux proviennent principalement de RADEAU 1 (Ageco 2019), complétés par les taux qui avaient été utilisés pour le projet PACES Montérégie Est (Carrier et al. 2013). Les bilans produits à partir des données sources du MAPAQ ont été comparés aux bilans produits par RADEAU 1 ainsi qu'au bilan produit par Technorem (2008a et 2008b) (voir section 9). Pour le bilan de Technorem (2008), puisque la région d'étude ne comprenait pas exactement les mêmes municipalités que le projet actuel, les résultats de notre estimation de l'usage de l'eau ont été utilisés pour les municipalités de notre région d'étude non couvertes par Technorem. De plus, les usages estimés par Technorem ont été normalisés en proportion des municipalités présentes dans notre région d'étude.

Le tableau 7.1 résume les résultats de l'estimation de l'usage de l'eau (total, surface et souterraine) pour la région d'étude. L'annexe 2 compile l'usage de l'eau souterraine par municipalité (pour la partie des municipalités comprise dans la région d'étude). L'usage total de l'eau dans la région d'étude est évalué à 46.2 Mm³/an, dont 41% des prélèvements proviennent de l'eau souterraine (18.8 Mm³/an) et 59% des eaux de surface (27.4 Mm³/an). Les usages ICI de l'eau souterraine

représentent 51% (9.6 Mm³/an) du total, alors que 32% (6.0 Mm³/an) sont dédiés aux usages résidentiels et 17% (3.2 Mm³/an) aux usages agricoles. Les grands usagers d'eau souterraine ICI sont surtout attribuables aux carrières alors que les usages agricoles sont dominés par l'irrigation des cultures maraîchères (71%). La section 9 documente la comparaison de nos estimés des prélèvements d'eau à ceux faits dans le cadre des études de Technorem (2008a et 2008b) et RADEAU 1 (Ageco 2019).

Tableau 7.1 – Estimation des prélèvements d'eau dans la région d'étude.

Source des prélèvements totaux (Mm³/an)				
Souterrain		Surface		Total
18.8		27.4		46.2
41%		59%		100%
Utilisation des prélèvements totaux (Mm³/an)				
Résidentiel	ICI	Agricole	Total	
18.7	21.7	5.8	46.2	
40%	47%	13%	100%	
Utilisation de l'eau souterraine (Mm³/an)				
Résidentiel	ICI	Agricole	Total	
6.0	9.6	3.2	18.8	
32%	51%	17%	100%	
Utilisation de l'eau de surface (Mm³/an)				
Résidentiel	ICI	Agricole	Total	
12.6	12.1	2.6	27.4	
46%	44%	10%	100%	

La carte 17 montre les prélèvements totaux (Mm³/an) de l'eau souterraine par municipalité dans la région d'étude, de même que la localisation des puits privés, des puits municipaux et des grands préleveurs d'eau (GPE) exploitant l'eau souterraine. La présence plus importante de GPE est à noter dans le secteur de Saint-Rémi. À l'échelle municipale, les bilans montrent que les pressions sur les ressources en eau souterraine ne sont pas réparties uniformément dans les municipalités de la région d'étude (annexe 2). Il faut cependant rappeler que les statistiques sont compilées en proportion de la superficie des municipalités présentes dans la région d'étude, ce qui peut induire un biais par rapport à la présentation de l'importance relative des bilans totaux d'utilisation de l'eau. Plusieurs municipalités se démarquent par la quantité d'eau souterraine utilisée avec plus de 1 Mm³/an (carte 17) : Châteauguay, Mercier, Saint-Constant, Sainte-Clotilde, Saint-Isidore, Saint-Jacques-le-Mineur et Saint-Rémi. Au niveau de l'usage agricole, trois municipalités dépassent 50% d'utilisation sur le total en eau souterraine, pour cet usage, Saint-Édouard, Saint-Michel et Saint-Patrice-de-Sherrington. Pour l'usage ICI, six municipalités ont des taux d'utilisation supérieurs à 50% sur le total en eau souterraine : Châteauguay, Mercier (à cause du piège hydraulique des anciennes lagunes), Saint-Constant, Sainte-Clotilde, Saint-Jacques-le-Mineur et Saint-Philippe.

8 PRESSIONS SUR L'EAU SOUTERRAINE À L'ÉCHELLE MUNICIPALE

8.1 Niveau, répartition et sources des pressions sur l'eau souterraine

Globalement, pour toute la région d'étude, l'usage total de l'eau souterraine (18.8 Mm³/an) correspond à 27% de la recharge (68.7 Mm³/an). Cette proportion de l'usage de la recharge a été représentée à l'échelle municipale sur la carte 18 afin d'évaluer la répartition des pressions sur l'eau souterraine dans la région d'étude. Le tableau A.1 de l'annexe 2 compile la recharge et l'usage de l'eau souterraine pour les superficies des municipalités comprises dans la région d'étude ainsi que le pourcentage de la recharge qui est exploitée à l'échelle des municipalités. La figure 8.1 montre sous forme graphique la recharge, les prélèvements et la proportion de la recharge représentée par les prélèvements pour toutes les municipalités de la région d'étude. De plus, la figure 8.1 montre les principaux usages des prélèvements de l'eau souterraine dans les municipalités. Bien que l'eau souterraine circulant dans une municipalité puisse provenir de la recharge s'étant produite en amont de la municipalité, ce rapport des prélèvements sur la recharge permet tout de même d'évaluer l'importance et la distribution spatiale des pressions sur l'eau souterraine à l'échelle municipale. La section 11 va présenter les résultats de l'évaluation de la distribution des pressions sur l'eau souterraine à l'intérieur des municipalités.

La carte 18, la figure 8.1 ainsi que le tableau A.1 montrent que les pressions sur les ressources en eau souterraine ne sont pas réparties uniformément entre les municipalités de la région d'étude. La section 11 va aussi montrer que les pressions sont aussi hétérogènes à l'intérieur même des municipalités. Pour 14 des 24 municipalités couvertes par la région d'étude, l'usage d'eau souterraine correspond à moins de 20% de la recharge sur leur territoire, et pour 10 de ces municipalités c'est en fait moins que 10% de la recharge. À l'opposé, deux municipalités utilisent beaucoup plus que 100% de la recharge sur leur territoire, il s'agit de Châteauguay (160%) et Napierville (175%). Ces résultats reflètent toutefois des situations particulières. Châteauguay est une municipalité située en aval du système d'écoulement et reçoit relativement peu de recharge (carte 16) alors que son important captage municipal exploite une bonne partie de l'eau souterraine prélevée dans cette municipalité, le reste étant surtout relié à l'usage ICI sur le réseau (figure 8.1D). Quant à Napierville, le prélèvement relativement faible de l'eau souterraine dans cette municipalité, principalement par le puits municipal, n'est simplement pas compensé par la recharge se produisant à l'intérieur de l'étendue très restreinte de la municipalité.

À part Châteauguay, six autres municipalités ont d'importants prélèvements d'eau souterraine sur leur territoire dépassant 1 Mm³/an et de fortes proportions d'usage de la recharge (figure 8.1.D et annexe 2) : Mercier (2.53 Mm³/an; 89%), Saint-Constant (1.86 Mm³/an; 53%), Saint-Clotilde (2.22 Mm³/an; 77%), Saint-Isidore (1.23 Mm³/an; 34%), Saint-Jacques-le-Mineur (1.93 Mm³/an; 28%) et Saint-Rémi (2.48 Mm³/an; 32%). Saint-Rémi se distingue par la combinaison d'importants captages municipaux, d'un usage ICI sur le réseau significatif et de grands préleveurs agricoles (figure 8.1.D). Mercier combine un important captage municipal (en fait alimenté par la ville de Châteauguay) et le système de pompage et traitement du site des anciennes lagunes de Mercier. Enfin, les quatre autres municipalités ont de grands préleveurs ICI qui sont des carrières sur leur territoire. Ces pressions ICI dépassent largement celles des autres usages de l'eau souterraine, notamment les grands préleveurs agricoles.

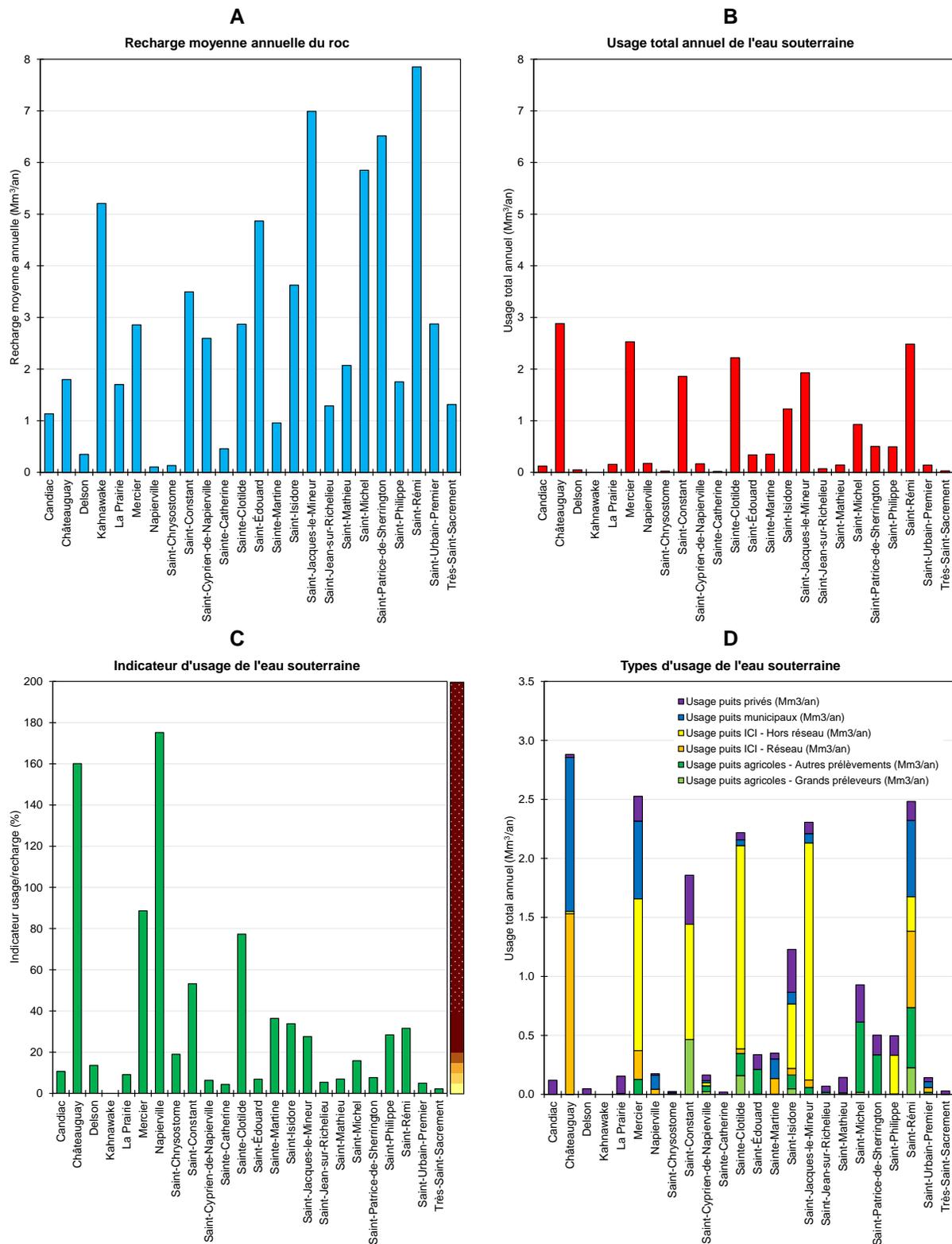


Figure 8.1 – Recharge (A), usage total (B), proportion de l'usage de la recharge (C) et principaux types d'usage de l'eau souterraine (D) pour les municipalités de la région d'étude (la trame de proportion de l'usage de la recharge est utilisée pour chaque municipalité sur la carte 18).

La figure 8.2.A montre l'usage agricole de l'eau souterraine en fonction de la superficie des cultures maraîchères dans les municipalités de la région d'étude. On constate que la corrélation est importante et qu'effectivement, ce sont les cultures maraîchères qui contribuent le plus à l'usage agricole de l'eau souterraine. La figure 8.2.B montre la relation entre la surface des cultures maraîchères obtenues de la carte d'utilisation du sol du MELCC comparée à la superficie des cultures maraîchères obtenue de la compilation du MAPAQ par municipalité. Bien que la corrélation soit bonne entre ces données, il y a une sous-estimation importante de la superficie des cultures maraîchères sur la carte d'utilisation du sol. Idéalement, cette carte ne devrait donc pas être utilisée pour estimer l'usage d'eau pour l'irrigation des cultures.

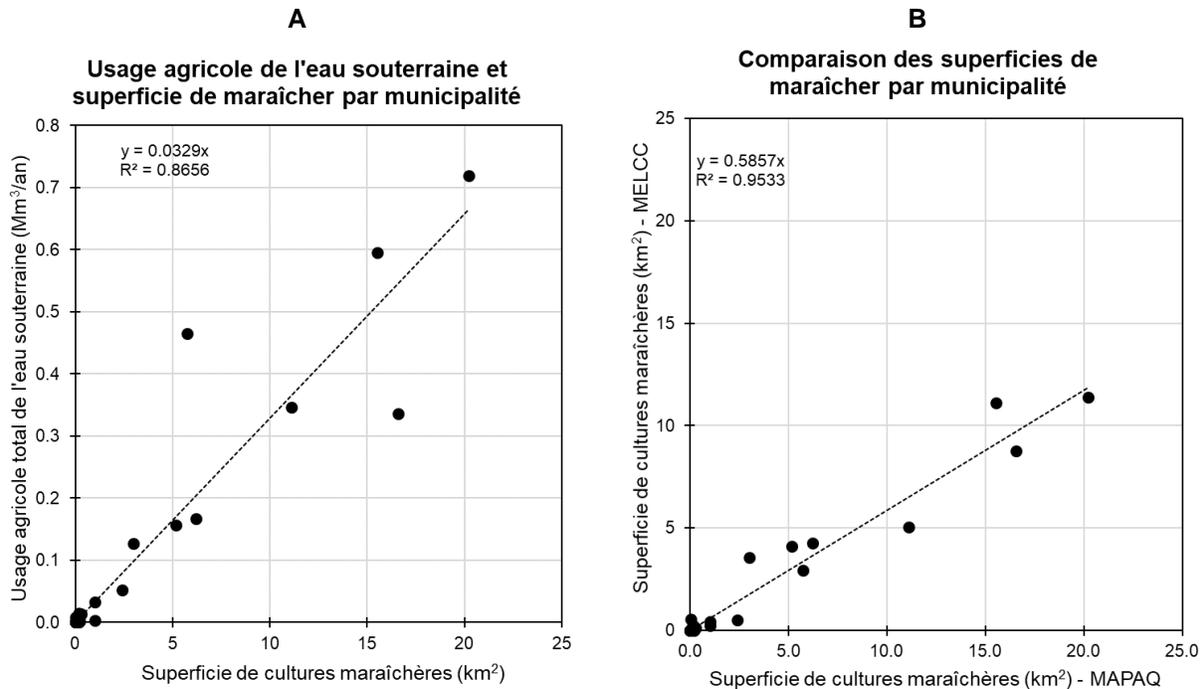


Figure 8.2 – Relation entre la superficie des cultures maraîchères par municipalité du MAPAQ et l'usage agricole total de l'eau souterraine (A) et comparaison de la superficie de cultures maraîchères obtenues de la compilation des activités agricoles à l'échelle municipale du MAPAQ et la superficie obtenue de la carte d'utilisation du sol du MELCC (B).

8.2 Incidences des pressions sur l'eau souterraine

Le niveau d'usage de la recharge dans plusieurs municipalités dépasse le seuil d'alerte de 20% sous lequel l'usage est considéré durable et sans incidence sérieuse sur la ressource en eau souterraine (Carrier et al. 2013; Raskin 1997). Régionalement, l'ensemble des usages de l'eau souterraine utilisent près de 30% de la recharge dans l'aquifère rocheux régional. Afin d'évaluer l'effet de cette proportion d'usage sur les niveaux piézométriques, la solution analytique de Dupuit-Forchheimer a été appliquée (Dupuit 1863; Forchheimer 1901; Chesnaux et al. 2005). Cette approche implique des hypothèses simplificatrices importantes et elle n'a pour but que d'obtenir un ordre de grandeur de la réduction des niveaux d'eau souterraine qui pourrait être causée par l'usage de l'eau souterraine à l'échelle régionale.

La figure 8.3 illustre le système d'écoulement en deux dimensions (coupe verticale) représenté par la solution de Dupuit-Forchheimer. Une nappe libre reçoit une recharge constante qui est distribuée de façon uniforme à la surface de la nappe. Cette nappe possède une base imperméable horizontale et elle est limitée de chaque côté par un cours d'eau qui pénètre tout l'aquifère et dont le niveau d'eau est constant. La conductivité hydraulique de l'aquifère est homogène et isotrope. Suite à l'infiltration de la recharge, l'eau souterraine va s'écouler latéralement vers les cours d'eau. La solution analytique définit la forme de la nappe dont l'élévation dépend de la géométrie de l'aquifère (épaisseur saturée) et de sa conductivité hydraulique, du taux de recharge ainsi que des élévations des charges dans les cours d'eau bordant l'aquifère.

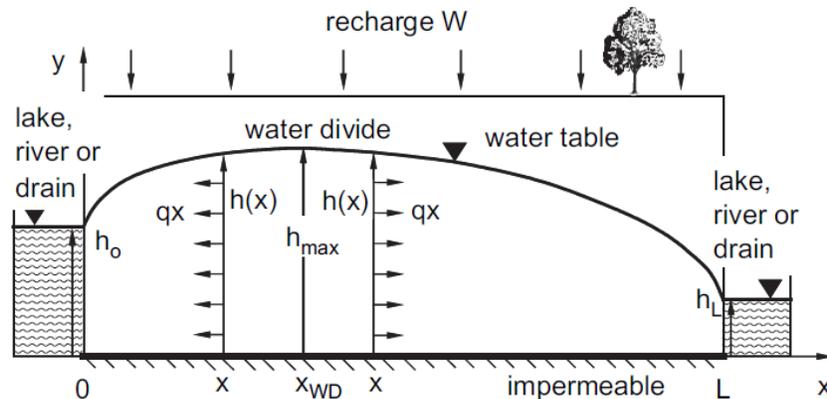


Figure 8.3 – Système d'écoulement représenté par la solution de Dupuit-Forchheimer (Chesnaux et al. 2005).

Afin d'appliquer la solution de Dupuit-Forchheimer à la région d'étude, une coupe nord-sud a été choisie sur la carte piézométrique produite par Technorem (2008a et 2008b) (carte 2). Cette coupe de 23.7 km débute au nord à l'isopièze de 30 m d'élévation situé au sud de Saint-Constant, passe par le haut piézométrique à 65 m d'élévation qui se trouve à l'est de Saint-Rémi et se termine au ruisseau Norton à 50 m d'élévation au sud de Saint-Patrice-de-Sherrington. Une charge hydraulique a été imposée à une élévation de 30 m au nord et à une élévation de 50 m au sud de la coupe. La base de l'aquifère a été présumée être située à une altitude de -70 m, ce qui implique une section d'écoulement d'une épaisseur de 100 m à la limite nord de la coupe. Une recharge uniforme de 100 mm/an a été imposée, ce qui correspond à la recharge moyenne dans le secteur central de la région d'étude (section 6). La conductivité hydraulique K de l'aquifère a été « calée » à une valeur de 6.0×10^{-5} m/s afin que le niveau de la nappe ne dépasse pas la topographie qui est à 70 m d'élévation au centre de la région d'étude. Cette valeur de K est similaire aux valeurs moyennes de 5.1×10^{-5} m/s et de 3.7×10^{-5} m/s obtenues respectivement par Lavigne et al. (2005) et Technorem (2008a et 2008b).

La figure 8.4 montre la piézométrie calculée en appliquant trois niveaux de recharge « effective », soit la recharge moins l'utilisation de l'eau souterraine. La recharge de 100 mm/an représente le niveau de la nappe en condition naturelle sans prélèvement d'eau souterraine. La recharge de 70 mm/an correspond aux conditions présentes où l'équivalent de 30% de la recharge est prélevé. Enfin, la valeur de recharge de 40 mm/an montre l'effet que pourrait avoir un niveau d'usage « extrême » de l'eau souterraine de 60% de la recharge. Tel qu'attendu (figure 8.3), la surface piézométrique forme un dôme entre les niveaux à charge imposée aux deux extrémités de la ligne d'écoulement (30 m au nord et 50 m au sud). Le prélèvement de 30% de la recharge mène à une

baisse de 8 m du niveau maximum de la nappe, ce qui est dans le même ordre de grandeur que la baisse observée du niveau piézométrique depuis les années 1980 (figure 3.3). Des prélèvements atteignant 60% de la recharge aurait pour effet d'abaisser le niveau du maximum piézométrique d'encore 8 m, ce qui ferait pratiquement disparaître le dôme piézométrique.

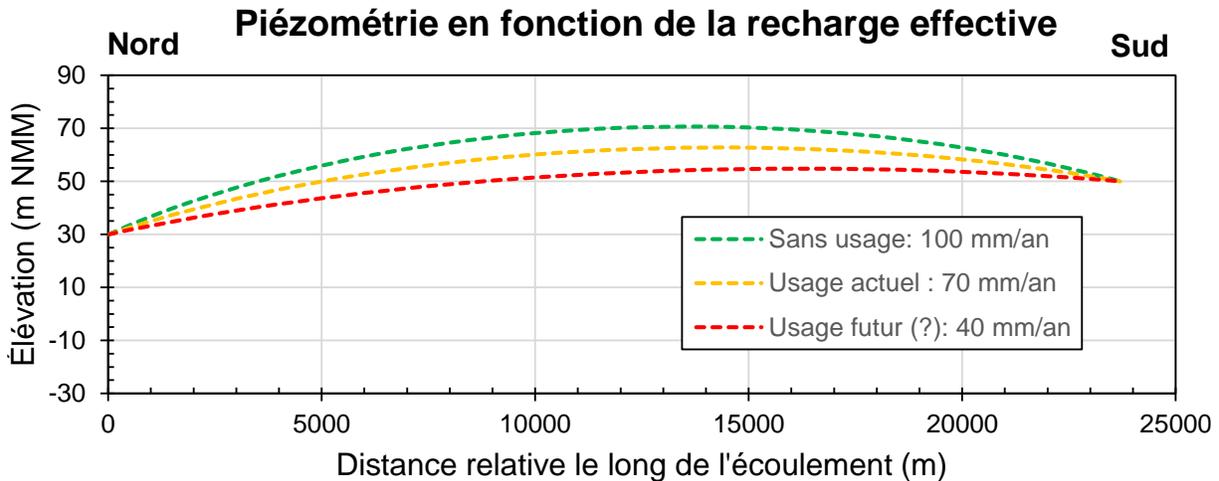


Figure 8.4 – Effet de la recharge effective (recharge moins prélèvements) sur la charge hydraulique telle qu'estimée par la solution de Dupuit-Forchheimer (Chesnaux et al. 2005).

Sur la base de modélisations numériques de l'écoulement souterraine, Pontlevoy (2004; voir aussi Pontlevoy et al. 2002) ainsi que Technorem (2008a et 2008b) ont aussi prédit que l'exploitation de l'eau souterraine dans le système aquifère rocheux régional de la région d'étude mènerait à une baisse du niveau piézométrique. La modélisation numérique est en fait plus appropriée pour faire une estimation de l'impact de l'exploitation de l'eau souterraine parce qu'elle repose sur moins d'hypothèses simplificatrices que la solution analytique. Les simplifications les plus importantes de la solution analytique sont les conditions libres sur l'ensemble de l'aquifère, la distribution homogène et isotrope de la conductivité hydraulique, la répartition uniforme de la recharge et l'assignation de charges constantes sur toute l'épaisseur des limites de l'aquifère. De plus, la solution ne permet pas de représenter les effets transitoires qui mèneraient à une réduction progressive du niveau piézométrique par la perte d'emménagement de l'eau souterraine exploitée.

Le bilan de la recharge et de l'utilisation de l'eau souterraine dans la région d'étude indique que l'exploitation serait de l'ordre de 30% de la recharge de l'aquifère rocheux régional. Ce niveau d'exploitation ne dépasse pas le renouvellement de l'eau souterraine dans l'aquifère et la solution analytique montre que la baisse du niveau piézométrique qui a été observée depuis les années 1980 pourrait refléter un nouvel équilibre dynamique relié à une recharge effective réduite (recharge moins prélèvements). Bien que la situation actuelle puisse mener à un nouvel équilibre dynamique du système aquifère, certains impacts négatifs pourraient découler de la baisse du niveau piézométrique. Ces impacts comprennent une réduction du débit de base des cours d'eau, la perte de productivité des puits d'approvisionnement et une possible dégradation de la qualité de l'eau souterraine. La réduction du débit de base des cours d'eau résulte simplement du fait que l'eau souterraine exploitée n'atteint plus les exutoires naturels du système aquifère. La perte de productivité des puits d'approvisionnement découle d'abord de la réduction de l'épaisseur saturée et de la longueur de la section des puits d'où peut provenir l'eau souterraine captée par le puits. De plus, des

travaux antérieurs ont montré que la partie supérieure du roc est plus fracturée et plus perméable et que la conductivité hydraulique diminue avec la profondeur (Lavigne et al. 2005 et 2010; Laurencelle 2018). La désaturation de la partie supérieure du roc pourrait donc réduire considérablement la productivité des puits d’approvisionnements. Enfin, la désaturation de la partie supérieure du roc pourrait mener à l’oxydation de sulfures et à la production de sulfate. On observe d’ailleurs de fortes concentrations en sulfates dans la partie nord du système aquifère, ce qui indique que ce processus opère déjà, bien que cela pourrait être présentement relié à des processus naturels (Technorem et al. 2008a et 2008b). La baisse du niveau de la nappe pourrait aussi engendrer l’exploitation d’eau souterraine plus profonde dont la géochimie et la qualité d’eau peut être moindre, tel qu’observé dans une autre région d’étude située dans la Plate-forme du Saint-Laurent (Bordeleau et al. 2018).

Au niveau de l’effet sur le débit de base des cours d’eau, ce sont les rivières Saint-Régis et de la Tortue qui sont susceptibles d’en ressentir les effets les plus importants puisque leurs bassins sont entièrement compris dans la région d’étude. Malheureusement, ces bassins ne sont pas jaugés. Certaines études antérieures ont tout de même estimé les débits de ces cours d’eau (Asseau Inc. 1992; Fortin et al. 1997; Genivar 2003; JFSA 2015; Consortium Axio-Avizo-JFSA 2016). Afin de suivre l’effet de l’exploitation de l’eau souterraine sur les débits de base des cours d’eau, il pourrait être d’intérêt d’aménager des stations de jaugeages sur les rivières Saint-Régis et de la Tortue et de comparer les débits de base aux estimations historiques de ces débits.

9 COMPARAISON AVEC LES TRAVAUX ANTÉRIEURS

La présente section fait la comparaison des estimations des prélèvements d'eau de notre étude avec celles de Technorem (2008a et 2008b) et RADEAU 1 (Ageco 2019) afin de vérifier si les estimés sont cohérents. Tout comme l'INRS, RADEAU 1 a estimé à la fois les prélèvements d'eau de surface et d'eau souterraine alors que Technorem (2008a et 2008b) n'a estimé que les prélèvements d'eau souterraine. Afin de comparer les bilans pour la région d'étude considérée dans le présent rapport, les bilans municipaux de RADEAU 1 et de Technorem ont été ajustés selon les proportions des superficies des municipalités dans la région d'étude. De plus, pour l'étude de Technorem qui n'a pas porté sur toutes les municipalités de la région d'étude, nos bilans INRS ont été ajoutés à ceux de Technorem pour les municipalités manquantes.

Le détail de l'estimation de l'usage de l'eau fait par RADEAU 1 est donné à l'annexe 4. Le tableau 9.1 et la figure 9.1 comparent les estimations des prélèvements totaux d'eau pour les usages résidentiels, ICI et agricoles dans la région d'étude. Le tableau indique aussi la source d'approvisionnement, soit l'eau de surface ou l'eau souterraine. Ces données montrent que l'estimation de RADEAU 1 est considérablement inférieure à celle de la présente étude pour l'usage total de l'eau ainsi que pour les sources des prélèvements, particulièrement l'eau souterraine. Les données montrent que la grande différence entre les deux estimations est reliée aux usages ICI. Cette différence dans les estimations pourrait être causée par notre accès aux données sur les grands préleveurs d'eau (GPE), tant de surface que souterraine, pour faire l'estimation des usages pour la présente étude. Les données sur les GPE ont montré un usage ICI très important, particulièrement par les carrières localisées dans la région d'étude.

Tableau 9.1 – Comparaison de l'estimation de l'INRS des prélèvements d'eau totaux (Mm^3/an) dans la région d'étude avec l'estimation de RADEAU 1 (Ageco 2019).

Étude	Résidentiel	ICI ¹	Agricole	Total	Surface	Souterrain
INRS	18.7	21.7	5.8	46.2	27.4	18.8
	40%	47%	13%	100%	59%	41%
RADEAU	8.3	12.6	6.6	27.5	14.5	13.0
	30%	46%	24%	100%	53%	47%

1 : industriel, commercial et institutionnel (ICI).

Au niveau de l'usage agricole total de l'eau, les estimations de RADEAU 1 et de la présente étude sont du même ordre, même si l'estimation de RADEAU 1 est plus élevée. Ces estimations de l'usage agricole total de l'eau peuvent être comparées à l'estimation de Technorem (2008a et 2008b) qui est de $6.1 Mm^3/an$, soit entre les deux autres estimations. Technorem (2008a et 2008b) a estimé l'usage agricole total d'eau requis et évalué que la source de l'eau utilisée à des fins agricoles était à 55% d'eau souterraine et 45% d'eau de surface.

Le tableau 9.2 et la figure 9.2 comparent les estimations des usages de l'eau souterraine faites par la présente étude avec celles de Technorem (2008a et 2008b) et de RADEAU 1 (Ageco 2019). Les estimations des usages résidentiel et agricole sont similaires, mais RADEAU 1 a estimé des usages ICI moindres que les deux autres études.

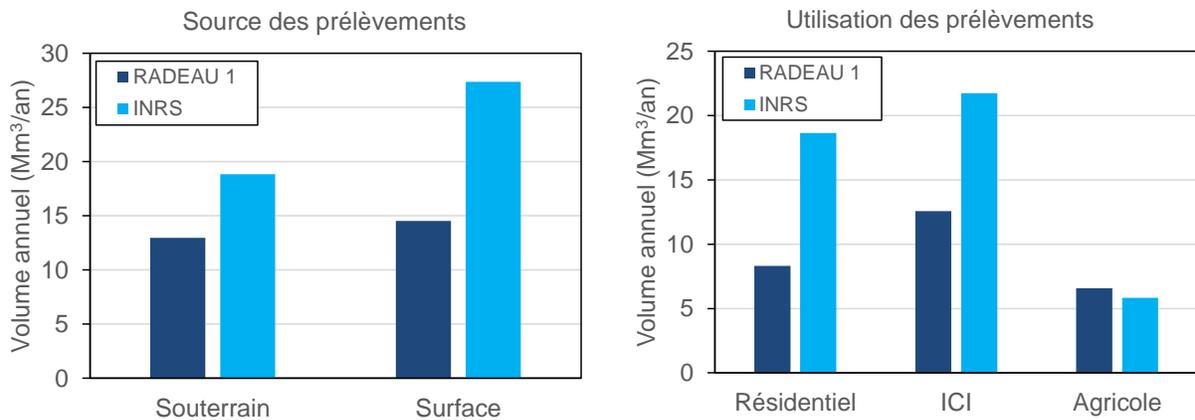


Figure 9.1 – Comparaison de la source et de l'utilisation des prélèvements totaux (de surface et souterrains) estimés par la présente étude (INRS) et celle de RADEAU 1 (Ageco 2019).

Tableau 9.2 – Comparaison de l'estimation de l'INRS des prélèvements d'eau souterraine (Mm³/an) dans la région d'étude avec les estimations des études de Technorem (2008a et 2008b) et RADEAU 1 (Ageco 2019).

Étude	Résidentiel	ICI	Agricole	Total
INRS	6.0	9.6	3.2	18.8
	32%	51%	17%	100%
Technorem	5.0	7.8	3.4	16.5
	31%	48%	21%	100%
RADEAU	5.1	4.7	3.1	13.0
	40%	36%	24%	100%

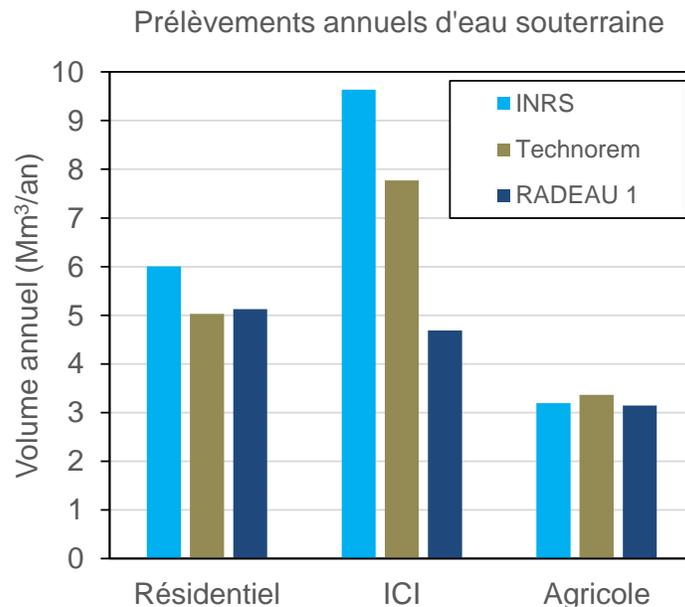


Figure 9.2 – Comparaison de l'estimation des prélèvements annuels d'eau souterraine par catégorie d'usage de la présente étude (INRS) par rapport aux estimations de Technorem (2008a et 2018b) et de RADEAU 1 (Ageco 2019).

Tout comme pour l'estimation de l'usage total ICI, l'estimation moindre de l'usage ICI de l'eau souterraine par RADEAU 1 pourrait être reliée aux données sur les GPE utilisées par la présente étude. De son côté, Technorem (2008a et 2008b) avait estimé les prélèvements d'eau souterraine par les carrières qui sont les plus grands préleveurs ICI d'eau souterraine, ce qui peut faire en sorte que les estimations de l'usage ICI de l'eau souterraine de Technorem (2008a et 2008b) et de la présente étude se rapprochent. La présente étude a possiblement considéré des GPE autres que les carrières ou qui se sont ajoutés depuis l'étude de Technorem (2008a et 2008b), ce qui donnerait une estimation plus élevée de l'usage ICI de l'eau souterraine.

Il est important de noter que pour faire la comparaison de l'estimation de l'usage de l'eau souterraine de la présente étude avec celle de Technorem (2008a et 2008b), il a été nécessaire de faire certains ajustements. D'abord, le canton d'Hemmingford qui faisait partie de la région d'étude de Technorem (2008a et 2008b) mais pas de la présente étude a été exclu de l'estimation pour les fins de comparaison. De plus, pour toutes les municipalités considérées par les deux études, la proportion de la superficie de la municipalité dans la région d'étude considérée pour le présent rapport a été utilisée pour pondérer l'usage total de l'eau souterraine obtenu par Technorem (2008a et 2008b), en supposant que l'usage était proportionnel à la superficie. Enfin, pour les municipalités qui ne faisaient pas partie de la région d'étude de Technorem (2008a et 2008b), les estimations de l'usage de l'eau souterraine de la présente étude ont été utilisées. Pour une éventuelle révision de l'estimation de l'usage de l'eau souterraine, il pourrait être préférable de considérer la proportion des cultures maraîchères pour les estimations de l'usage agricole de l'eau plutôt que la proportion du territoire des municipalités. Enfin, il faut rappeler que l'estimation de l'usage agricole de la présente étude a utilisé la même proportion de la source d'approvisionnement en eau que Technorem (2008a et 2008b), soit 55% d'eau souterraine et 45% d'eau de surface.

Bien que l'estimation de l'usage agricole de l'eau souterraine de la présente étude concorde avec celle de Technorem (2008a et 2008b), la présente étude n'a considéré que l'usage agricole de l'eau relié aux activités compilées par le MAPAQ (cultures et élevage), alors que Technorem (2008a et 2008b) a en plus considéré l'usage de l'eau pour le lavage de légumes et la pulvérisation qui représentent respectivement 18% et 1% de l'usage agricole total de l'eau. Un usage agricole additionnel d'eau souterraine de 20% correspondrait à 0.8 Mm³/an et porterait l'usage agricole total de l'eau souterraine de la présente étude à 4.0 Mm³/an.

Nous avons vérifié que les GPE faisant un usage agricole de l'eau souterraine ne correspondent pas à l'ensemble des puits d'irrigation répertoriés par Technorem (2008a et 2008b). Dans les faits il y a donc plus de puits d'irrigation que ce qui est montré par les GPE agricoles. La demande des coordonnées des puits identifiés dans ces rapports a été faite à Technorem car les coordonnées ne sont pas documentées dans les rapports. La comparaison des localisations des GPE avec celles des puits d'irrigation pourrait permettre d'évaluer s'il y a eu une évolution du nombre ou des volumes prélevés par ces puits. Cela pourrait peut-être permettre d'identifier les puits qui sont plutôt dédiés au lavage de légumes et ainsi de mieux estimer le volume d'eau souterraine utilisé à cette fin. Cette comparaison pourrait aussi aider à résoudre le problème posé par les GPE répertoriés à Saint-Constant et dont les débits dépassent largement l'estimation de l'usage de l'eau souterraine basé sur les activités agricoles fournie par le MAPAQ.

Cette comparaison des estimations des usages de l'eau souterraine par la présente étude avec les études antérieures montre qu'il y a une bonne cohérence entre les estimés des usages résidentiels et agricoles mais des différences notables des estimés de l'usage ICI qui pourraient être liées à la considération des GPE dans l'estimation faite par l'INRS. Plusieurs points doivent tout de même faire l'objet de vérifications afin de préciser les pressions sur les ressources en eau souterraine. Les volumes d'eau souterraine prélevés pour les usages ICI étant dominants, une comparaison détaillée des estimations des volumes prélevés par les carrières basées sur les GPE avec les estimations de Technorem (2008a et 2008b) devrait être faite, ainsi qu'une vérification de la représentativité des volumes cités par la base de données des GPE. Au niveau de l'usage agricole de l'eau souterraine, les volumes utilisés pour le lavage des légumes devraient être précisés. De plus, la répartition spatiale et temporelle des prélèvements à des fins agricoles devrait être précisée afin de mieux évaluer l'effet de cette pression saisonnière sur l'eau souterraine. La répartition spatiale de l'usage de l'eau souterraine pourrait être précisée à l'aide de la répartition et de l'étendue des cultures maraîchères ainsi que de l'inventaire des puits d'irrigation fait par Technorem (2008a et 2008b) (voir section 11). Enfin, la variabilité des besoins en eau pour l'irrigation selon les conditions météorologiques saisonnières devrait être évaluée afin de mieux estimer à la fois l'usage historique d'eau souterraine pour l'irrigation en fonction des données météorologiques et l'usage futur sur la base des modélisations des changements climatiques.

10 SCÉNARII DE RECHARGE ET D'USAGE EN CLIMAT FUTUR

Cette section décrit les travaux réalisés pour quantifier les changements potentiels de la recharge « effective » (recharge totale moins prélèvements) en climat futur. Les changements de la recharge effective pourront être utilisés pour alimenter le modèle servant à évaluer les options de piège hydraulique pour le remplacement de l'UTES. Éventuellement, ce changement de la recharge effective pourrait aussi servir dans un modèle régional qui serait développé pour représenter l'écoulement à l'échelle de la région d'étude considérée dans le cadre des présents travaux. La recharge effective serait appliquée aux différents modèles pour les conditions actuelles et pour représenter les conditions en climat futur avec un pourcentage de changement par rapport aux conditions actuelles. La section 10.1 décrit l'estimation de la recharge en climat futur. La section 10.2 présente des scénarii d'usage de l'eau souterraine en climat futur. Enfin, la section 10.3 résume les scénarii de modélisation numérique qui pourraient être considérés en termes de changements de la recharge effective combinant le changement de recharge et les modifications d'usage.

10.1 Estimation de la recharge en climat futur

Trois approches ont été utilisées pour estimer la plage du changement de la recharge envisageable en climat futur. Les deux premières approches sont basées sur le calcul d'un bilan hydrologique mensuel qui est fait à partir des conditions météorologiques mensuelles moyennes pour la température et les précipitations (de Marsily 1986; Lefebvre et al. 2011). La troisième approche est basée sur les simulations numériques réalisées dans le cadre du projet PACC de l'Université Laval (Deltotier et al. 2021).

10.1.1 Bilan hydrologique mensuel avec les conditions historiques

La présente section présente les résultats du bilan hydrologique mensuel utilisant les conditions météorologiques historiques. Ces travaux ont pour but de caler les paramètres hydrologiques utilisés pour le bilan en comparant la recharge obtenue du bilan à la recharge moyenne obtenue avec HELP. Le bilan hydrologique mensuel a été calculé avec les données de la grille météorologique produite par Info-Climat (Bergeron 2017). La figure 10.1 montre la localisation du centre des mailles de la grille d'Info-Climat par rapport à la région d'étude. Les croix en caractère gras indiquent les 12 mailles qui ont été considérées pour calculer les normales météorologiques mensuelles entre 1981 et 2010 pour la région d'étude.

Le bilan hydrologique est calculé à l'aide de la relation suivante :

$$Re = P_{avail} - Ru - ETR - \Delta RAS \quad \text{Équation 1}$$

Où Re est la recharge totale (infiltration), P_{avail} représente les précipitations disponibles, Ru est le ruissellement, ETR est l'évapotranspiration réelle, et ΔRAS est le changement de la réserve en eau utile dans le sol. Toutes les composantes du bilan sont exprimées en termes de lame d'eau équivalente (par unité de surface du sol) en mm. Le tableau 10.1 présente les normales pour la température (T) et les précipitations (P) ainsi que les composantes du bilan hydrologique calculé.

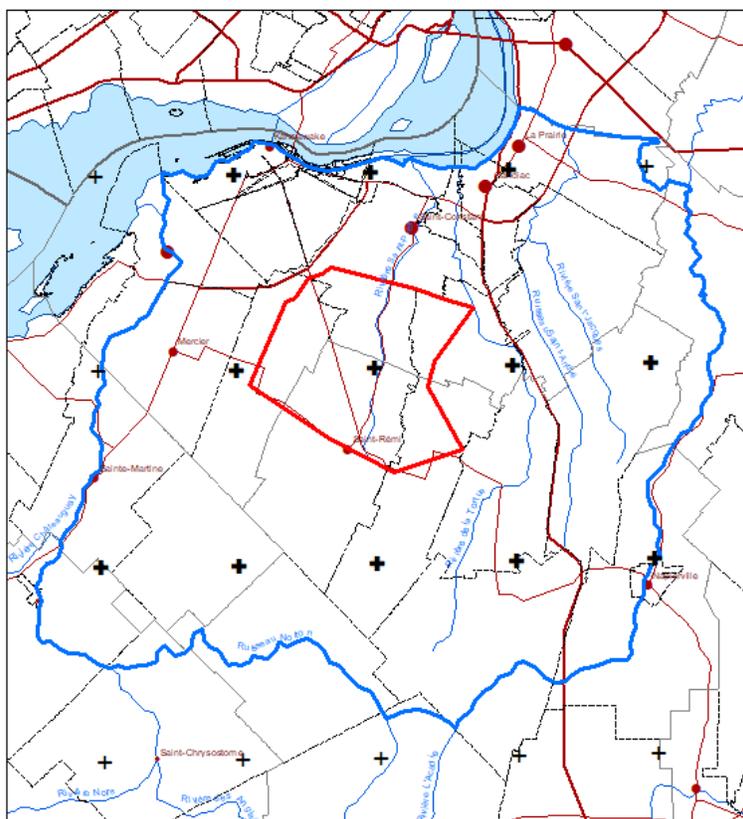


Figure 10.1 – Croix marquant la localisation des centres des mailles de la grille d'Info-Climat (Bergeron 2017) par rapport à la région d'étude. Les croix en caractère gras ont été considérées pour calculer les normales météorologiques pour la période entre 1981 et 2010.

Tableau 10.1 – Bilan hydrologique mensuel utilisant la température (T) et les précipitations (P) normales entre 1981 et 2010 pour la région d'étude.

Mois	T (°C)	P (mm)	P_{avail} (mm)	Ru (mm)	ETR (mm)	Re (mm)
Janvier	-9.5	66.2	0.0	0.0	0.0	0.0
Février	-7.6	55.6	0.0	0.0	0.0	0.0
Mars	-2.0	62.7	0.0	0.0	0.0	0.0
Avril	6.4	83.7	344.0	79.1	25.3	235.6
Mai	13.3	84.1	84.1	19.3	72.3	0.0
Juin	18.5	92.3	92.3	21.2	110.8	0.0
Juillet	20.8	94.9	94.9	21.8	130.8	0.0
Août	19.7	89.8	89.8	20.7	74.1	0.0
Septembre	15.3	88.9	88.9	20.4	68.4	0.0
Octobre	8.4	93.8	93.8	21.6	29.7	0.0
Novembre	2.3	88.6	88.6	20.4	4.8	0.0
Décembre	-5.2	75.8	0.0	0.0	0.0	0.0
Annuel	6.7	976.6	976.6	224.6	516.3	235.6

T : température. P : précipitations. P_{avail} : précipitations disponibles. Ru : ruissellement. ETR : évapotranspiration réelle. Re : Recharge totale (infiltration).

Les précipitations disponibles P_{avail} tiennent compte de l'accumulation des précipitations qui est présumée être sous forme de neige lorsque la température moyenne mensuelle est inférieure à 0 °C. Ces précipitations sont accumulées jusqu'à ce que la température mensuelle passe au-dessus de 0 °C. Le ruissellement Ru est obtenu en multipliant les précipitations disponibles P_{avail} par le coefficient de ruissellement (Cr) ($Ru = Cr \cdot P_{avail}$). La recharge va se produire lorsque l'apport d'eau dans le sol permet d'excéder la réserve en eau utile maximale dans le sol RAS_{max} . RAS_{max} dépend de la profondeur racinaire et de la différence entre la capacité de rétention du sol et le point de flétrissement. La méthode de Thornthwaite (1948) est utilisée pour estimer l'évapotranspiration potentielle (ETP) qui peut se produire lorsque ce processus n'est pas limité par la disponibilité de l'eau emmagasinée dans le sol. Toutefois, lorsque l'eau disponible dans le sol est inférieure à l' ETP , alors l'évapotranspiration réelle (ETR) sera inférieure à l' ETP . Ainsi, en fonction des apports d'eau par l'infiltration et des retraits par l' ETR , il y aura des changements dans la réserve en eau utile dans le sol (ΔRAS) et la valeur de RAS pourra varier entre zéro (0) et RAS_{max} .

Deux paramètres hydrologiques sont requis pour calculer le bilan hydrologique mensuel avec l'équation 1, soient (1) la réserve en eau utile maximale dans le sol RAS_{max} et (2) le coefficient de ruissellement Cr . Les valeurs de ces paramètres ont été choisies de façon à ce que les composantes du bilan hydrologique mensuel soient similaires aux résultats obtenus par le modèle d'infiltration HELP. À cette fin, les composantes du bilan hydrologique mensuel ont été comparées aux composantes obtenues par Croteau (2006) pour le bassin de la rivière des Anglais. Ce bassin jaugé a été utilisé par Croteau (2006) pour caler les paramètres de HELP. Les dépôts meubles dans ce bassin sont dominés par le till et ce contexte est donc représentatif des zones de recharge de la région d'étude. En utilisant 110 mm comme valeur de RAS_{max} ainsi que 0.23 pour le coefficient de ruissellement Cr , le tableau 10.2 montre que les proportions des composantes hydrologiques annuelles pour HELP et pour le bilan hydrologique sont très similaires. Puisque le territoire et la période considérés pour les deux estimations sont différents, il y a un écart dans les précipitations totales et ce sont donc les proportions des composantes qui ont été ciblées pour guider le choix des paramètres hydrologiques. Le bilan hydrologique mensuel ne permet pas de distinguer l'infiltration totale (eau qui pénètre sous la profondeur racinaire) et la recharge qui atteint l'aquifère rocheux. Ces deux paramètres sont différents parce qu'une partie de l'eau qui s'infiltre dans le sol va s'écouler sous forme de ruissellement hypodermique et n'atteindra pas l'aquifère de roc. Le bilan obtenu par HELP montre que 56% de l'infiltration s'écoule en fait sous forme de ruissellement hypodermique. La même proportion a été appliquée au bilan hydrologique afin d'estimer la recharge au roc.

Tableau 10.2 – Comparaison des composantes hydrologiques de HELP pour le bassin de la rivière des Anglais (Croteau 2006) et du bilan hydrologique mensuel.

Composantes du bilan	HELP	HELP (%)	Bilan	Bilan (%)
Précipitations totales	956	100.0%	977	100.0%
ETR	505	52.8%	516	52.9%
Ruissellement	217	22.7%	225	23.0%
Infiltration totale	234	24.5%	236	24.1%
Ruissellement hypodermique	131	13.7%	132	13.5%
Recharge au roc	103	10.8%	104	10.6%

Le tableau 10.1 et la figure 10.2 montrent la distribution des composantes du bilan hydrologique à chaque mois de l'année. Les résultats indiquent que la recharge ne se produirait qu'à la fonte (avril) alors que les précipitations disponibles P_{avail} sont suffisantes pour que les précipitations efficaces (précipitations moins ruissellement) mènent à une infiltration de l'eau. En avril, la fonte de la neige mène à des précipitations disponibles P_{avail} qui comblent l'emmagasinement d'eau dans le sol (RAS) et excèdent l'ETR. Le reste de l'année, il n'y a pas de recharge : en été, l'ETR excède P_{avail} ; à l'automne, P_{avail} sert à combler le déficit en eau du sol, alors qu'à l'hiver les précipitations s'accumulent sous forme de neige.

**Bilan hydrologique annuel de la région de Mercier / Saint-Rémi: Till en surface
avec normales météorologiques 1981-2010**

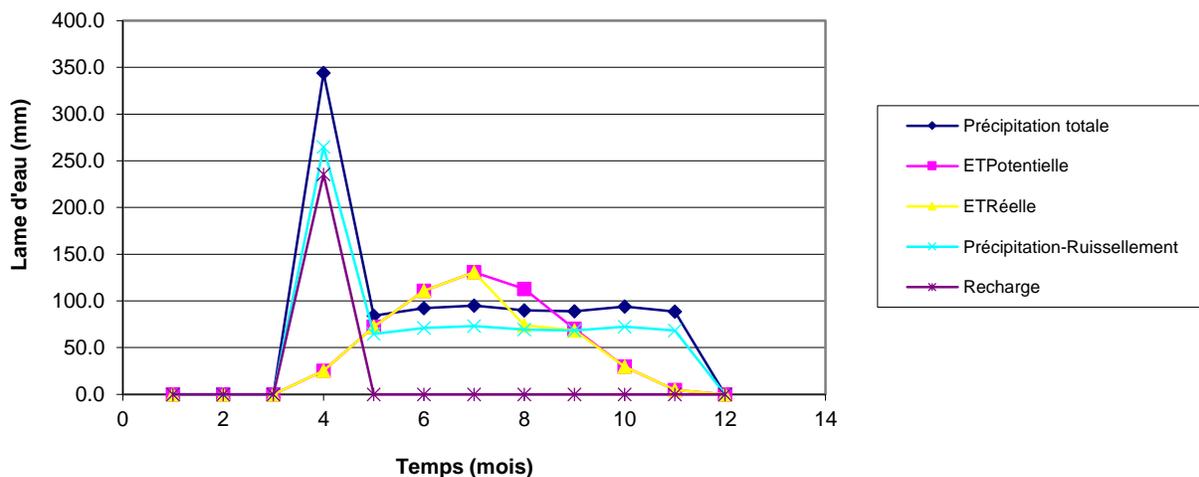


Figure 10.2 – Bilan hydrologique mensuel avec les normales climatiques entre 1981 et 2010 pour la région d'étude.

10.1.2 Bilan hydrologique mensuel basé sur les simulations climatiques

Les conditions en climat futur ont été obtenues d'Ouranos (2021a) (voir aussi Charron 2016) qui a produit de l'information climatique des régions du Québec à partir d'un ensemble de 11 simulations climatiques globales (*Coupled Model Intercomparison Project*, CMIP5) considérant deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre, dont un est jugé « modéré » (RCP 4.5) et l'autre est jugé « élevé » (RCP 8.5). En plus des variables climatiques qui peuvent être téléchargées (Ouranos 2021a; figure 10.3), des fiches synthèses régionales expliquant les implications des simulations climatiques sont distribuées par le MAMH, notamment pour la Montérégie (Ouranos 2021b). Ces simulations climatiques permettent de considérer les changements des conditions météorologiques pour deux horizons de temps, soit 2050 et 2080. Malgré les différences entre les conditions simulées pour les scénarios modéré et élevé, surtout à l'horizon 2080, le choix a été fait de ne considérer que des changements « intermédiaires » de la température et des précipitations. Ainsi, le tableau 10.3 montre les écarts entre les conditions climatiques moyennes annuelles (température et précipitations) observée historiquement en Montérégie et les conditions moyennes simulées aux horizons 2050 et 2080 qui peuvent être comparées aux valeurs intermédiaires qui ont été choisies pour représenter les conditions climatiques en climat futur.

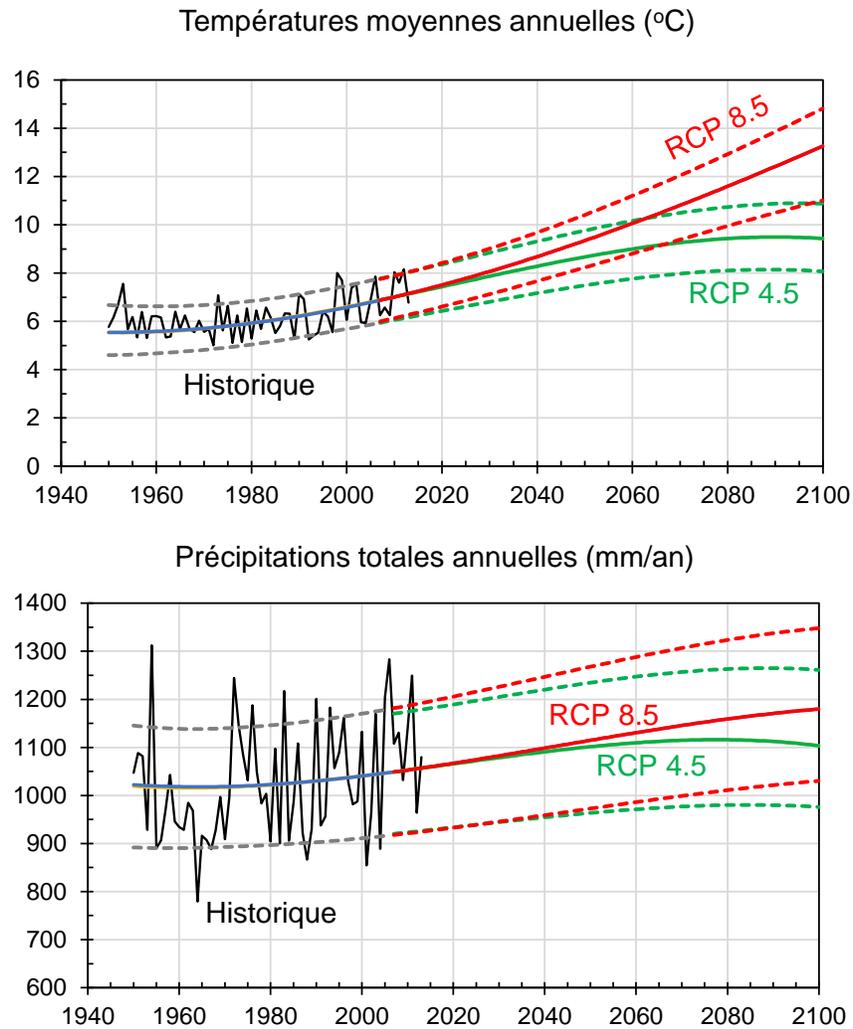


Figure 10.3 – Conditions climatiques observées historiquement et simulées en climat futur pour la Montérégie (données obtenues d’Ouranos 2021a). Les lignes pleines représentent les conditions simulées médianes tandis que les lignes pointillées représentent la plage de variation des simulations.

Tableau 10.3 – Changements météorologiques annuels moyens pour les scénarios climatiques aux horizons 2050 et 2080. Un scénario « intermédiaire » a été retenu sur la base des changements de température et de précipitations prévus pour les simulations avec des scénarios de climatiques « modérés » et « élevés » (Ouranos 2021a).

Température (°C)	Actuelle	2050	2080
Changement modéré simulé		+2.5	+3.2
Changement élevé simulé		+3.2	+5.8
Changement intermédiaire retenu		+2.8	+3.8
Température moyenne annuelle (°C)	6.7	9.5	10.5
Précipitations (mm/an)	Actuelles	2050	2080
Changement modéré simulé		+40	+73
Changement élevé simulé		+92	+122
Changement intermédiaire retenu		+63.5	+81.7
Précipitations moyennes annuelles (mm/an)	976.6	1040.1	1058.3

Les conditions simulées en climat futur d'Ouranos (2021a) pour la Montérégie montrent que les augmentations de température seraient relativement uniformes pour toute l'année mais que des précipitations plus importantes se produiraient surtout en hiver et plus modérément au printemps, alors que les précipitations ne changeraient pas significativement à l'été et à l'automne. Ouranos (2021a) documente les changements par saison, mais ces changements ont été répartis sur une base mensuelle en atténuant les changements entre les différents mois (tableau 10.4). Ces changements mensuels de la température (ΔT) et des précipitations (ΔP) ont été appliqués aux normales mensuelles afin d'obtenir les conditions météorologiques à utiliser dans le bilan hydrologique mensuel pour estimer le changement de recharge en climat futur.

Tableau 10.4 – Changements mensuels de la température (ΔT) et des précipitations (ΔP) pour les horizons 2050 et 2080 sur la base des changements saisonniers simulés estimés par Ouranos (2021a) pour la Montérégie.

Mois	Horizon 2050		Horizon 2080	
	ΔT (°C)	ΔP (%)	ΔT (°C)	ΔP (%)
Janvier	2.8	23.1%	3.8	27.1%
Février	2.8	17.6%	3.8	23.1%
Mars	2.8	12.5%	3.8	17.5%
Avril	2.8	12.5%	3.8	15.0%
Mai	2.8	6.2%	3.8	10.0%
Juin	2.8	5.0%	3.8	5.0%
Juillet	2.8	0.0%	3.8	0.0%
Août	2.8	0.0%	3.8	0.0%
Septembre	2.8	0.0%	3.8	0.0%
Octobre	2.8	0.0%	3.8	0.0%
Novembre	2.8	0.0%	3.8	0.0%
Décembre	2.8	13.6%	3.8	19.0%

Les tableaux 10.5 et 10.6 ainsi que les figures 10.4 et 10.5 montrent les bilans hydrologiques calculés avec les conditions météorologiques retenues pour les horizons 2050 et 2080, respectivement. Les résultats indiquent que la recharge serait plus hâtive au printemps et qu'elle serait étalée sur les mois de mars et d'avril. Toutefois, comme le montre le tableau 10.7, annuellement, l'augmentation des précipitations serait annulée par l'augmentation du ruissellement et de l'ETR, de sorte que la recharge (infiltration totale) serait pratiquement inchangée en 2050 et 2080. La recharge au roc passerait de 103 mm/an actuellement à 105 et 106 mm/an aux horizons 2050 et 2080, respectivement, ce qui représente des augmentations de l'ordre de 2 à 3%. De tels changements sont jugés être à l'intérieur de la plage d'incertitude de l'estimation de la recharge à l'aide d'un bilan hydrologique mensuel (Larose-Charrette et al. 2000).

Tableau 10.5 – Bilan hydrologique mensuel utilisant la température (T) et les précipitations (P) simulées à l'horizon 2050 pour la région d'étude.

Mois	T (°C)	P (mm)	P_{avail} (mm)	Ru (mm)	ETR (mm)	Re (mm)
Janvier	-6.7	81.5	0.0	0.0	0.0	0.0
Février	-4.8	65.4	0.0	0.0	0.0	0.0
Mars	0.8	70.5	303.5	69.8	1.7	206.6
Avril	9.2	94.2	94.2	21.7	40.0	32.5
Mai	16.1	89.4	89.4	20.6	92.1	0.0
Juin	21.3	97.0	97.0	22.3	132.5	0.0
Juillet	23.6	94.9	94.9	21.8	101.9	0.0
Août	22.5	89.8	89.8	20.7	69.2	0.0
Septembre	18.1	88.9	88.9	20.4	68.4	0.0
Octobre	11.2	93.8	93.8	21.6	42.7	0.0
Novembre	5.1	88.6	88.6	20.4	13.2	0.0
Décembre	-2.4	86.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Annuel	9.5	1040.1	1040.1	239.2	561.8	239.1

Tableau 10.6 – Bilan hydrologique mensuel utilisant la température (T) et les précipitations (P) simulées à l'horizon 2080 pour la région d'étude.

Mois	T (°C)	P (mm)	P_{avail} (mm)	Ru (mm)	ETR (mm)	Re (mm)
Janvier	-5.7	84.2	0.0	0.0	0.0	0.0
Février	-3.8	68.5	0.0	0.0	0.0	0.0
Mars	1.8	73.7	316.5	72.8	3.9	210.3
Avril	10.2	96.3	96.3	22.1	42.6	31.5
Mai	17.1	92.5	92.5	21.3	96.4	0.0
Juin	22.3	97.0	97.0	22.3	138.6	0.0
Juillet	24.6	94.9	94.9	21.8	94.0	0.0
Août	23.5	89.8	89.8	20.7	69.2	0.0
Septembre	19.1	88.9	88.9	20.4	68.4	0.0
Octobre	12.2	93.8	93.8	21.6	45.1	0.0
Novembre	6.1	88.6	88.6	20.4	15.0	0.0
Décembre	-1.4	90.2	0.0	0.0	0.0	0.0
Annuel	10.5	1058.3	1058.3	243.4	573.1	241.8

Tableau 10.7 – Comparaison des bilans hydrologiques annuels pour les conditions météorologiques actuelles par rapport aux conditions attendues aux horizons 2050 et 2080 pour la région d'étude.

Période	T (°C)	P (mm)	Ru (mm)	ETR (mm)	Re total (mm)	Re roc (mm)	ΔRe roc (%)
Actuelle	6.7	977	225	516	236	103	0.0%
Horizon 2050	9.5	1040	239	562	239	105	1.9%
Horizon 2080	10.5	1058	243	573	242	106	2.9%

T : température. P : précipitations. P_{avail} : précipitations disponibles. Ru : ruissellement. ETR : évapotranspiration réelle. Re total : recharge totale (infiltration). Re roc : recharge au roc. ΔRe roc : changement.

Bilan hydrologique annuel de la région de Mercier / Saint-Rémi: Till en surface avec scénario climatique à l'horizon 2050

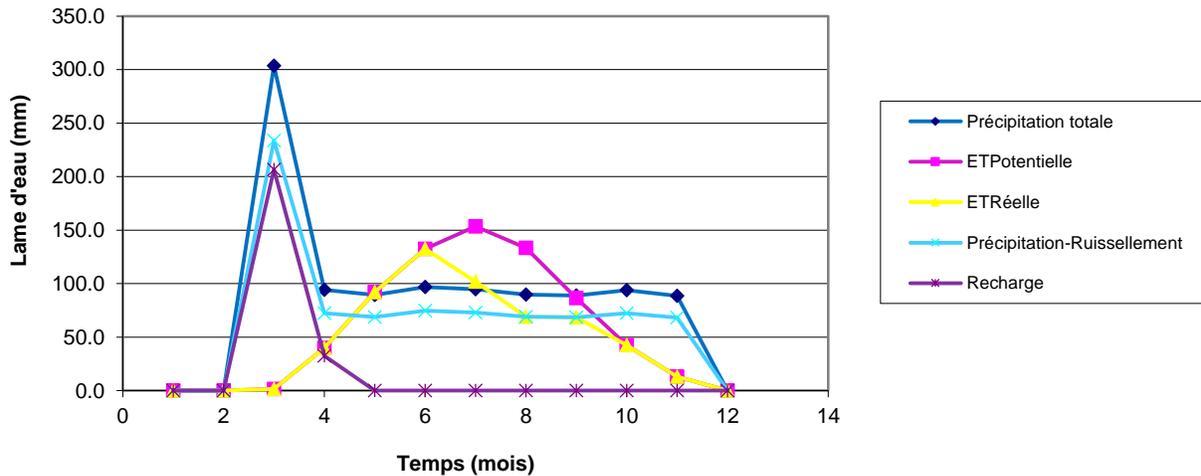


Figure 10.4 – Bilan hydrologique mensuel avec les conditions climatiques à l'horizon 2050 pour la région d'étude.

Bilan hydrologique annuel de la région de Mercier / Saint-Rémi: Till en surface avec scénario climatique à l'horizon 2080

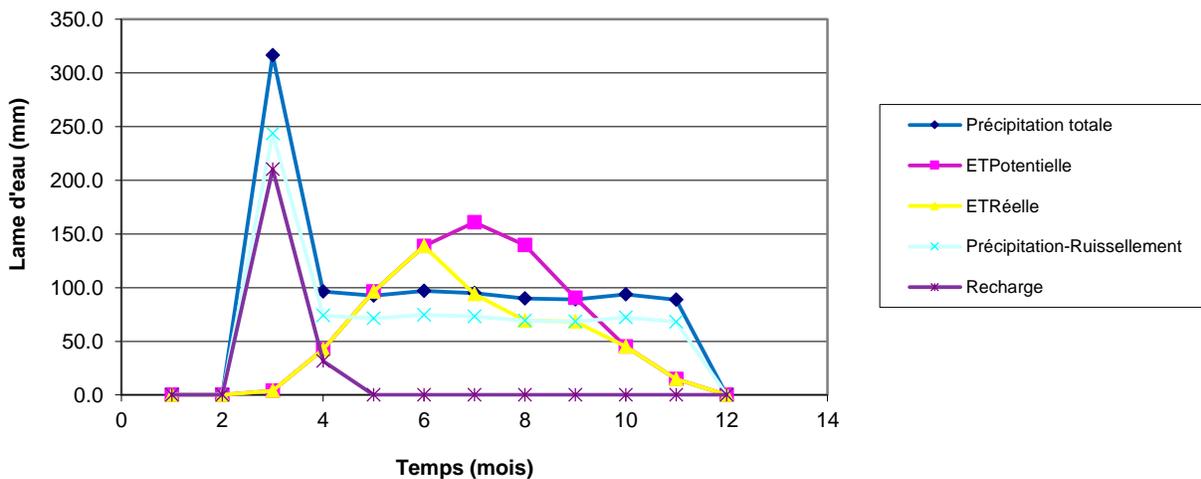


Figure 10.5 – Bilan hydrologique mensuel avec les conditions climatiques à l'horizon 2080 pour la région d'étude.

10.1.3 Bilan hydrologique mensuel basé sur l'Atlas hydroclimatique

Sur la base de modélisations hydrologiques réalisées à partir d'un ensemble de simulations climatiques, l'Atlas hydroclimatique (MDDELCC 2018) décrit le régime hydrique actuel et futur du Québec méridional. Cet atlas a pour but de soutenir la gestion de l'eau résiliente dans la perspective des changements climatiques. Le site Internet de l'Atlas (<https://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/Hydraulcite/Qmoy.htm>) permet le téléchargement des fiches synthèses associées à chaque tronçon de rivière considéré dans les modélisations hydrologiques. Ces fiches donnent les conditions hydrologiques aux horizons 2030, 2050 et 2080. Nous avons considéré les conditions aux horizons 2050 et 2080, comme pour la section précédente.

Ainsi, puisque l'Atlas considère déjà l'effet hydrologique potentiel du climat futur, ces conditions hydrologiques ont été utilisées pour obtenir une indication du changement possible de la recharge en climat futur. Le tronçon de l'Atlas représentant la rivière des Anglais (MON0411) a été sélectionné afin d'avoir des conditions similaires à celles considérées pour le bilan basé sur la grille d'Info-Climat et les simulations climatiques d'Ouranos présentées à la section précédente. Les composantes hydrologiques ont d'abord été déduites des données de l'Atlas et ensuite les valeurs des deux paramètres hydrologiques RAS_{max} et Cr ont été choisies pour que les composantes du bilan hydrologique mensuel soient similaires à celles tirées de l'Atlas. Le tableau 10.8 présente les composantes du bilan hydrologique pour 1) la station de jaugeage 02OA057 à l'exutoire de la rivière des Anglais dont les données ont été utilisées par Croteau (2006) pour caler les paramètres de HELP, 2) le tronçon MON0411 de l'Atlas hydroclimatique représentant la rivière des Anglais, et 3) le bilan hydrologique mensuel calé sur le tronçon MON0411.

Dans le cas de la station de jaugeage 02OA057, le débit total annuel moyen réparti sur l'aire du bassin (Q/A) représente les précipitations efficaces (P_{eff}) ($Q/A = P_{eff} = P - ETR$) qui sont aussi la somme du ruissellement (Ru) et de l'infiltration totale ($Re\ total$) ($Q/A = P_{eff} = Ru + Re\ total$). L' ETR est donc obtenue de la différence entre les précipitations totales et le débit total moyen sur l'aire du bassin ($ETR = P - Q/A$). Croteau (2006) a distingué les proportions du ruissellement de l'infiltration totale par la séparation de l'hydrogramme de cours d'eau de la station 02OA057. Les proportions du ruissellement hypodermique et de la recharge au roc ont été obtenues de HELP.

Dans le cas du tronçon MON0411, seul le débit moyen est disponible. Les mêmes précipitations totales obtenues des normales climatiques de la région ont été utilisées pour le bilan du tronçon MON0411 et le calcul du bilan hydrologique mensuel. L' ETR a été obtenue encore une fois de la différence entre les précipitations et le débit total moyen sur l'aire du bassin ($ETR = P - Q/A$). Les proportions des autres composantes du bilan ont été présumées les mêmes que celles obtenues de HELP par rapport aux précipitations efficaces qui sont équivalentes au débit par aire ($P_{eff} = Q/A$).

Le tableau 10.8 montre les composantes du bilan hydrologique qui ont été obtenues en utilisant 130 mm comme valeur de RAS_{max} ainsi que 0.21 pour le coefficient de ruissellement Cr . Le bilan hydrologique mensuel calé sur HELP avait utilisé des valeurs de 110 mm pour RAS_{max} et 0.23 pour Cr (tableau 10.2). On constate que les proportions du bilan hydrologique sont très similaires pour le tronçon MON0411 et pour le bilan mensuel. Le tableau 10.9 présente les composantes du bilan en climat futur. Deux approches ont été utilisées pour estimer le bilan et la recharge. D'abord, la même approche basée sur le débit du tronçon MON0411 a été utilisée avec les valeurs de débit moyen annuel fournies par l'Atlas hydroclimatique pour les horizons 2050 et 2080. Ensuite, comme à la section 10.1.2, les conditions climatiques en climat futur aux horizons 2050 et 2080 (tableau 10.4) ont été utilisées avec les paramètres hydrologiques pour calculer un bilan hydrologique mensuel. Les résultats obtenus à l'aide du tronçon MON0411 impliquent une augmentation importante de l' ETR puisque le débit simulé en climat futur diminue (9.17 m³/s en 2050 et 8.69 m³/s en 2080 par rapport à 9.69 m³/s en climat actuel). L' ETR estimé à l'aide du bilan hydrologique mensuel est moindre, ce qui impliquerait plutôt que le débit de la rivière des Anglais augmenterait en climat futur (10.1 m³/s en 2050 et 10.3 m³/s en 2080). Globalement, les informations obtenues de l'Atlas hydroclimatique impliqueraient donc une réduction de la recharge au roc de l'ordre de 5% en climat futur, alors que le bilan hydrologique mensuel indiquerait plutôt une augmentation de l'ordre de 2% à 3% de la recharge en climat futur.

Tableau 10.8 – Comparaison des composantes hydrologiques (mm/an) estimées à partir de l'Atlas hydroclimatique (MON0411) et de la station de jaugeage 02OA057 (Croteau 2006) pour le bassin de la rivière des Anglais avec le bilan hydrologique mensuel.

Composantes du bilan	02OA057	Atlas MON0411	Atlas (%)	Bilan	Bilan (%)
Précipitations totales (<i>P</i>)	956	<u>977</u>	100.0%	977	100.0%
ETR	<i>546</i>	<i>546</i>	56.0%	<i>545</i>	55.8%
Ruissellement (<i>Ru</i>)	<i>224</i>	<i>207</i>	21.2%	<i>205</i>	21.0%
Infiltration totale (<i>Re total</i>)	<i>186</i>	<i>223</i>	22.9%	<i>226</i>	23.2%
Aire bassin des Anglais (km ²)	643	711		711	
Débit rivière des Anglais (m ³ /s)	8.35	9.69		<i>9.7</i>	
Ruissellement hypodermique	<i>125</i>	<i>125</i>	12.8%	<i>127</i>	13.0%
Recharge au roc (<i>Re roc</i>)	<i>61</i>	<i>98</i>	10.1%	<i>100</i>	10.2%

Gras : valeurs mesurées ou simulées. Souligné : valeurs imposées. *Italique bleu* : valeurs calculées.

Tableau 10.9 – Comparaison des composantes hydrologiques (mm/an) estimées à partir de l'Atlas hydroclimatique (MON0411) et du bilan hydrologique mensuel en climat actuel et futur (2050 et 2080).

Composantes du bilan	Atlas actuel	Atlas 2050	Atlas 2080	Bilan 2050	Bilan 2080
Précipitations totales (<i>P</i>)	<u>977</u>	<u>1040</u>	<u>1058</u>	1040	1058
ETR	<i>546</i>	<i>633</i>	<i>673</i>	<i>591</i>	<i>602</i>
Ruissellement (<i>Ru</i>)	<i>207</i>	<i>196</i>	<i>196</i>	<i>218</i>	<i>222</i>
Infiltration totale (<i>Re total</i>)	<i>223</i>	<i>211</i>	<i>211</i>	<i>231</i>	<i>234</i>
Aire bassin des Anglais (km ²)	711	711	711	711	711
Débit rivière des Anglais (m ³ /s)	9.69	9.17	8.69	<i>10.1</i>	<i>10.3</i>
Ruissellement hypodermique	<i>125</i>	<i>118</i>	<i>118</i>	<i>129</i>	<i>131</i>
Recharge au roc (<i>Re roc</i>)	<i>98</i>	<i>93</i>	<i>93</i>	<i>101</i>	<i>103</i>

Gras : valeurs mesurées ou simulées. Souligné : valeurs imposées. *Italique bleu* : valeurs calculées.

10.1.4 Modèle d'infiltration en climat actuel et futur

Dans le cadre d'un projet mené par l'Université Laval (Delottier et al. 2021), un modèle hydrologique couplé (surface et souterrain) a été développé pour le sud du Québec afin d'évaluer l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau de surface et souterraine. Ce modèle couvre une surface 36 900 km² et huit grands bassins versants au sud du fleuve Saint-Laurent. L'approche consiste à utiliser un modèle préliminaire de bilan de masse en surface afin d'obtenir la recharge potentielle qui est ensuite utilisée comme donnée d'entrée au modèle HydroGeoSphere (Therrien et al. 2010). Par la suite, les débits de base simulés sont calés sur des données de débit de base existantes entre septembre 2011 et août 2015. Les simulations du modèle sont également validées régionalement par l'analyse de quatre données : (1) évapotranspiration, (2) accumulation et fonte du couvert neigeux, (3) débit de base des cours d'eau et (4) charges hydrauliques. Après calage du modèle sur la période 2011-2015, des données climatiques historiques (1981-2010) sont utilisées pour simuler les diverses variables en sortie du modèle pour la période référence qui correspond aux normales climatiques. Similairement, des données climatiques futures issues de 12 des 54 simulations de l'ensemble CMIP5 (« *the fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project* » ou « la 5^{ème} phase du projet d'intercomparaison des modèles couplés ») pour les scénarii RCP 4.5 et RCP 8.5 ont été considérées pour deux périodes : milieu (2041-2070) et fin (2070-2095) du siècle, ce qui correspond aux horizons 2050 et 2080 considérés précédemment.

L'Université Laval a transmis les résultats préliminaires des grilles de recharge potentielle pour les trois périodes considérées : référence (1981-2010), milieu du siècle (2041-2070) et fin du siècle (2070-2095). Comme les données climatiques utilisées en entrée étaient disponibles sur une grille avec des mailles de 25 km², les grilles de recharge potentielle obtenues sont elles aussi constituées de mailles de 5 km par 5 km. Pour chaque période simulée, les données recueillies auprès de l'Université Laval comprennent donc 13 grilles de recharge potentielle annuelle ($n = 1$) et mensuelle ($n = 12$) pour chacune des 12 simulations climatiques (A10, A13, B1M, BNU, CE2, CMS, GF3, GIR, INM, MIC, MIE et MRE).

Sur le secteur d'étude du présent projet, 39 centroïdes de maille sont dénombrés (carte 19). Les fichiers (rasters) fournis compilaient les données de recharge potentielle en m/jour ; ces derniers ont donc été convertis en mm/an dans un premier temps. Ensuite, une moyenne des 12 simulations a été appliquée pour obtenir les trois grilles finales : période de référence (carte 20), milieu du siècle (carte 21) et fin du siècle (carte 22). Sur le secteur d'étude, la recharge potentielle augmenterait de 23 % dans un futur proche (129 mm/an) par rapport à la période de référence (105 mm/an) puis atteindra 140 mm/an (+ 34 %) dans un futur éloigné (tableau 10.10).

Tableau 10.10 – Statistiques de la recharge potentielle en climat futur sur le secteur d'étude selon les moyennes des 12 simulations climatiques produites à partir du modèle HydroGeoSphere (Delottier et al. 2021).

Unité : mm/an	Période de référence (1981-2010)	Milieu du siècle (2041-2070)	Fin du siècle (2070-2095)
Maximum	182	223 (+ 27 %)	239 (+ 44 %)
Moyenne	105	129 (+ 23 %)	140 (+ 34 %)
Minimum	36	46 (+ 20 %)	52 (+ 30 %)

Note : les ratios (%) présentent l'évolution de la recharge potentielle par rapport à la période de référence.

La recharge potentielle extraite du projet Châteauguay (Croteau 2006) a été reproduite afin d'obtenir le ratio de recharge au roc par rapport à l'infiltration totale. Le projet est recoupé en partie par le PACES Montérégie Est (Carrier et al. 2013) et le projet Châteauguay (Croteau 2006) mais seules les données du second ont, pour le moment, pu être récupérées. La grille de recharge potentielle obtenue considère une période différente (1963-2001) que les données issues du projet de l'Université Laval (Delottier et al. 2021) mais offre une résolution plus intéressante avec des mailles de 250 m contre 5 km pour le modèle HGS. De plus, cet ancien projet couvre 674 des 974 km² du secteur soit une bonne partie (71 %). Le pourcentage de recharge au roc par rapport à l'infiltration totale a ensuite pu être cartographié sur cette portion du secteur d'étude (figure 6) qui comprend 10 709 mailles de 250 m. Sur la période de 39 ans considérée (1963-2001), la recharge au roc (76 mm/an) représente en moyenne 27 % de l'infiltration totale (283 mm/an), le reste (207 mm/an) étant assimilé au ruissellement souterrain, également appelé ruissellement hypodermique. Pour les sédiments fins d'eau profonde associés aux argiles marines, la recharge nette atteignant l'aquifère régional rocheux représente seulement 10 % de l'infiltration totale. À l'inverse, pour les tills, la portion d'eau infiltrée atteignant l'aquifère au roc est plus importante puisque comprise entre 37 et 40 %. C'est au droit de l'esker que la proportion de recharge nette est la plus importante (74 %) et le ruissellement souterrain le plus faible.

10.1.5 Scénarii de changement de la recharge en climat futur

Le tableau 10.11 résume les estimations de la recharge annuelle au roc en climat futur qui ont été documentées dans les sections précédentes. Ce tableau indique aussi les scénarii de changement de la recharge que nous proposons sur la base de ces résultats. Le scénario 1 représente la perspective « pessimiste » d'une réduction de la recharge à une proportion de 95% de la recharge actuelle, tel qu'indiqué par les résultats obtenus sur la base de l'Atlas hydroclimatique. La réduction de la recharge serait la même aux horizons 2050 et 2080. Le scénario 2 représente une perspective « stable » sans changement de la recharge en climat futur sur la base des bilans hydrologiques calculés à partir des changements climatiques projetés par Ouranos (2021a) et l'Atlas hydroclimatique qui montrent de faibles changements de recharge que nous jugeons être à l'intérieur de la plage de l'incertitude des bilans hydrologiques mensuels. Enfin, le scénario 3 représente une perspective « optimiste » impliquant une augmentation de la recharge en climat futur de l'ordre de 110% et de 120% aux horizons 2050 et 2080, respectivement. Ces augmentations sont considérablement moindres que celles indiquées par les simulations de l'Université Laval (Modèle HGS; Delottier et al. 2021). Toutefois, l'incohérence entre les valeurs de recharge du modèle HGS et celles obtenues avec HELP (Croteau 2006) mène à beaucoup d'incertitude sur les valeurs actuelles de la recharge et sur leur changement en climat futur.

Tableau 10.11 – Sommaire des estimations de la recharge annuelle au roc en climat futur (en mm/an et en % de la recharge actuelle) pour le bassin de la rivière des Anglais et scénarii de changement considérés.

Période	Bilan Ouranos	Bilan Atlas	Atlas	Modèle HGS*	Scénarii (%)		
					1	2	3
Actuelle	103/100%	100/100%	98/100%	105/100%	100%	100%	100%
Horizon 2050	105/102%	101/101%	93/95%	129/123%	95%	100%	110%
Horizon 2080	106/103%	103/103%	93/95%	140/133%	95%	100%	120%

*: pour le modèle HGS, la valeur représente la recharge totale (infiltration) sur toute la région d'étude.

Globalement, les différentes approches utilisées pour estimer la recharge en climat futur donnent des indications divergentes sur les changements potentiels de la recharge future. Ces résultats montrent que dans le cadre de la modélisation du piège hydraulique des anciennes lagunes de Mercier il sera nécessaire de considérer une réduction ou une augmentation de la recharge en climat futur. L'incidence du changement de la recharge en climat futur à la fois sur le piège hydraulique et sur l'exploitation durable de l'eau souterraine dans la région mériterait que des travaux plus détaillés soient réalisés sur la recharge en climat futur dans le cadre d'éventuels travaux futurs.

10.2 Scénarii d'usage en climat futur

Des scénarii d'usage de l'eau souterraine en climat futur ont été produits sur la base des travaux du projet RADEAU 1 (Ageco 2019). Les projections de RADEAU 1 sur les prélèvements d'eau souterraine sont comparées aux estimations de la recharge actuelle et en climat futur afin de produire une plage de changements (en pourcentage de la recharge actuelle) applicables en termes de recharge effective (recharge moins usage). Au final, trois scénarii de changement de la recharge et trois scénarii de changement de l'usage mènent à neuf combinaisons possibles, mais nous proposons de sélectionner trois combinaisons qui seraient testées par modélisation numérique afin de couvrir la gamme des effets combinés de l'évolution de la recharge et de l'usage en climat futur.

10.2.1 Scénarii d'usage futur proposés par RADEAU

RADEAU 1 a développé une approche par scénarii narratifs afin de cerner de façon réaliste les changements sur les prélèvements en eau souterraine à l'horizon de 2050. Les changements des usages sont détaillés au niveau résidentiel, ICI (industriel, institutionnel et commercial) et agricole. De façon générale, le déploiement des scénarios narratifs s'appuie sur les prévisions de la croissance démographique et des activités économiques qui mènerait à un usage croissant des ressources en eau dans le futur. Les scénarios narratifs prennent aussi en compte les projections de changements climatiques (CC) produits par Ouranos (Ageco 2019) qui affecteraient particulièrement les prélèvements pour les activités agricoles.

RADEAU 1 a généré deux versions des scénarios narratifs, soit à une échelle régionale, incluant la Montérégie, et à une échelle plus locale, avec un cas détaillé pour la municipalité de Saint-Rémi. Le choix de la municipalité de Saint-Rémi est justifié par le fait que l'eau consommée provient essentiellement des ressources en eau souterraine. De plus, la pression sur la ressource en termes d'utilisation y est très forte, ce qui peut se traduire par des conflits d'usage et donc des restrictions évidentes sur le plan du développement économique régional. RADEAU 1 note que la situation à Saint-Rémi a été particulièrement critique au cours des dernières années alors que des problèmes d'assèchement des puits ont été observés parallèlement à une baisse généralisée des niveaux piézométriques de l'aquifère au roc.

Le tableau 10.12 résume l'usage actuel et les 5 scénarii narratifs pour toute la région de la Montérégie. Les changements d'usages totaux pour le futur varient de -3.7% à +18.5% par rapport aux volumes totaux d'eau prélevés actuellement (incluant l'eau de surface et l'eau souterraine). Pour la Montérégie, les pourcentages de changements d'usage s'appliquent de la même façon pour les eaux de surface et les eaux souterraines puisque chacune des sources d'approvisionnement représente 50% du volume total d'eau prélevé.

Tableau 10.12 – Scénarii d'usage futur de l'eau souterraine en Montérégie proposés par le projet RADEAU 1 (Ageco 2019).

Scénario	Prélèvement (Mm ³ /an)	Changement (%)
Scénario 1	246	18.5%
Scénario 2	230	11.1%
Scénario 3	218	5.3%
Scénario 4	233	12.4%
Scénario 5	200	-3.7%
Scénario 6	246	18.5%

Pour le cas détaillé de Saint-Rémi, RADEAU 1 a produit 3 scénarii narratifs qui prévoient des augmentations des prélèvements, selon les types d'usages, qui varient de plus 3.9% à 73.4% (tableau 10.13). Pour l'usage résidentiel, les 3 scénarii prévoient de 17.6% à 76.5% d'augmentations de la population et des réductions de 11.6% à 21.8% en termes de consommation individuelle (en litre par personne par jour). Au final, ces changements se traduisent par des augmentations de l'usage résidentiel pour 2050 qui varient de 3.9% à 55.9% en termes de volume d'eau annuel par rapport aux prélèvements actuels.

Pour les usages ICI, RADEAU 1 a détaillé séparément les usages industriels (I) des usages des commerces et de l'institutionnel (CI). Pour les usages industriels, les scénarios futurs proposent des augmentations d'usages de l'eau allant de 16.2% à 160.6% et pour les CI des augmentations de 4.0% à 56.0%. RADEAU 1 mentionne que « ces projections se basent sur le potentiel de croissance des activités économiques reflétant à la fois des données historiques et tenant compte de l'environnement d'affaire projeté ». Soulignons qu'il n'y a pas de carrière dans la municipalité de Saint-Rémi et que les augmentations des prélèvements pour les usages ICI suggérées par RADEAU 1 n'incluent pas ce type d'activité. Pour les prélèvements liés aux commerces et institutions (CI), RADEAU 1 applique systématiquement les mêmes prévisions de changement que pour les usages résidentiels, ce qui est logique si on considère que ces usages sont principalement liés à la consommation pour les besoins humains.

Pour les usages agricoles, RADEAU 1 propose des augmentations futures sur les prélèvements qui varient de 29.9% à 73.4% par rapport au niveau actuel. La majorité des prélèvements agricoles pour le secteur de Saint-Rémi servent à l'irrigation des cultures maraîchères, ce qui inclut les productions en serres. Les scénarii d'usages futurs prévoient un accroissement des volumes de productions pour le maraîcher, ce qui est cohérent avec les tendances récentes montrant 10% de croissance sur les 10 dernières années. Durant la même période, il y a eu 11% de décroissance sur les cultures ornementales. Au final, l'augmentation des prélèvements en eau pour le secteur agricole proviendra surtout de l'accroissement des superficies cultivées, non seulement des cultures maraîchères traditionnelles, mais aussi pour des cultures nouvellement irriguées comme le maïs sucré et les pommes de terre.

Les changements climatiques devraient aussi contribuer à l'augmentation des besoins en eau pour l'irrigation des cultures afin de compenser une plus importante évapotranspiration des plantes. Les prélèvements pour l'agriculture sont surtout réalisés de mai à septembre, soit au moment de l'année où la recharge des aquifères est à peu près inexistante, ce qui a d'autant plus d'impact sur les ressources en eau souterraine. Le bilan général des prélèvements en eau souterraine pour le cas de Saint-Rémi montre qu'actuellement 27% des ressources sont utilisées en comparaison des volumes estimés de la recharge (annexe 2). Globalement, les 3 scénarii futurs de RADEAU 1 prévoient des usages en augmentation de 17% à 53% par rapport aux prélèvements actuels.

Tableau 10.13 – Bilans des trois scénarii narratifs proposés pour Saint-Rémi par le projet RADEAU 1 (Ageco 2019).

Scénarii futurs Radeau				
	actuel	2050	Augm. 2050 vs actuel	% de l'augm. total par usage
Superficie (km ²)	78.8			
Recharge (m/an)	0.100			
Recharge (Mm ³ /an)	7.9			
Scenario 1				
Consom. (L/pers/j)	216	169	-21.8%	
Population	8500	12000	41.2%	
Résidentiel tot (Mm ³ /an)	0.7	0.7	10.5%	21%
Industriel (Mm ³ /an) *	0.2	0.3	16.2%	12%
CI (Mm ³ /an)	0.5	0.6	10.4%	17%
ICI (Mm ³ /an)	0.8	0.9	12.2%	29%
Agricole (Mm ³ /an)	0.6	0.7	29.9%	50%
TOTAL (Mm ³ /an)	2.0	2.4	16.5%	100%
% changement	0.0%	16.5%	16.5%	
Scenario 2				
Consom. (L/pers/j)	216	191	-11.6%	
Population	8500	10000	17.6%	
Résidentiel tot (Mm ³ /an)	0.7	0.7	3.9%	3%
Industriel (Mm ³ /an) *	0.2	0.6	160.6%	46%
CI (Mm ³ /an)	0.5	0.6	4.0%	3%
ICI (Mm ³ /an)	0.8	1.2	52.7%	49%
Agricole (Mm ³ /an)	0.6	1.0	73.4%	48%
TOTAL (Mm ³ /an)	2.0	2.9	42.2%	100%
% changement	0.0%	42.2%	42.2%	
Scenario 3				
Consom. (L/pers/j)	216	191	-11.6%	
Population	8500	15000	76.5%	
Résidentiel tot (Mm ³ /an)	0.7	1.0	55.9%	35%
Industriel (Mm ³ /an) *	0.2	0.4	46.1%	11%
CI (Mm ³ /an)	0.5	0.9	56.0%	29%
ICI (Mm ³ /an)	0.8	1.2	52.9%	39%
Agricole (Mm ³ /an)	0.6	0.8	49.1%	26%
TOTAL (Mm ³ /an)	2.0	3.1	52.8%	100%
% changement	0.0%	52.8%	52.8%	

10.2.2 Modifications des scénarii d'usage futur proposés par RADEAU 1

Les bilans des prélèvements actuels et futurs ont été produits pour la région d'étude en se basant sur les prévisions fournies par les scénarii du cas d'étude de Saint-Rémi du projet RADEAU 1. Pour chaque type d'usage résidentiel, ICI et agricole, les bilans qui proviennent des estimations des prélèvements d'eau souterraine actuels (section 7) sont adaptés aux 3 scénarii narratifs du cas de Saint-Rémi (tableau 10.14). Pour chacun des 3 scénarii, les estimations des prélèvements futurs sont produites à partir des pourcentages d'augmentation appliqués aux volumes spécifiques des prélèvements, selon les types d'usages.

Pour les usages résidentiels, les pourcentages d'augmentations définis par RADEAU 1 sont directement appliqués aux bilans des prélèvements actuels définis pour la région d'étude. Cette procédure est aussi appliquée aux prélèvements agricoles. Pour les usages ICI, il n'y a pas de carrière en exploitation dans la municipalité de Saint-Rémi et RADEAU 1 n'a pas pris en compte ce type d'activité dans ses prévisions de croissances économiques pour les usages industriels. Cependant, il y a 7 carrières dans la région d'étude et les bilans au niveau des prélèvements industriels montrent qu'une grande partie des volumes sont associés à des carrières, soit 5.2 Mm³/an d'eau sur un total de 7.0 Mm³/an. Pour les scénarii adaptés, il a été jugé peu probable que les activités liées à l'exploitation des carrières connaissent une grande croissance future. Les volumes d'eau prélevés pour les carrières sont donc gardés constants pour les scénarii d'usage futur proposés. Soulignons que les 7 carrières en activité dans les municipalités entourant Saint-Rémi n'affectent pas directement les ressources en eau disponibles au niveau local, mais il est possible que les volumes importants d'eau prélevés en périphérie de la zone d'étude aient une influence sur l'écoulement à l'échelle de la région. L'évolution future des activités liées à l'exploitation des carrières est donc un point important à définir dans une perspective de gestion des ressources en eau souterraine.

Pour les activités industrielles, les prévisions d'augmentation définies par RADEAU 1 sont appliquées seulement à la portion du bilan en excluant les prélèvements par les carrières. De plus, le bilan pour les activités industrielles représente l'eau souterraine hors réseau seulement et correspond essentiellement aux déclarations de prélèvements des GPE. Pour les activités commerciales et institutionnelles, seule la portion eau souterraine réseau a été considérée en appliquant les prévisions d'augmentation de RADEAU 1.

Les bilans futurs compilés pour tous les types d'usage avec les 3 scénarii RADEAU 1 proposent des augmentations des volumes de prélèvements de 11.3% à 38.4% par rapport au niveau actuel (tableau 10.14). La section suivante présente les estimations d'accroissement d'usage par rapport à la recharge qui peuvent être directement utilisées pour calculer un changement au niveau de la recharge effective future en utilisant la recharge en climat future (section 10.3).

Tableau 10.14 – Bilans des trois scénarii proposés pour la région d'étude.

Scénarii futurs zone projet INRS					
Superficie (km ²)		950			
Recharge (m/an)		0.072			
Recharge (Mm ³ /an)		68.7			
	Augmentation Radeau 2050	actuel	2050	Augmentation INRS 2050	% de l'augm. total par usage
Scenario 1					
Consom. (L/pers/j)	-21.8%	216	169	-21.8%	
Population	41.2%	204 247	288 349	41.2%	
Résidentiel tot (Mm ³ /an)	10.5%	6.0	6.6	10.5%	29%
Industriel (Mm ³ /an) *	16.2%	6.8	7.1	3.8%	12%
CI (Mm ³ /an)	10.4%	2.8	3.1	10.4%	14%
ICI (Mm ³ /an)	12.2%	9.6	10.2	5.7%	26%
Agricole (Mm ³ /an)	29.9%	3.2	4.2	29.9%	45%
TOTAL (Mm ³ /an)	16.5%	18.8	21.0	11.3%	100%
% changement	16.5%	0.0%	11.3%	11.3%	
Scenario 2					
Consom. (L/pers/j)	-11.6%	216	191	-11.6%	
Population	17.6%	204 247	240 291	17.6%	
Résidentiel tot (Mm ³ /an)	3.9%	6.0	6.2	3.9%	4%
Industriel (Mm ³ /an) *	160.6%	6.8	9.4	37.8%	49%
CI (Mm ³ /an)	4.0%	2.8	2.9	4.0%	2%
ICI (Mm ³ /an)	52.7%	9.6	12.3	27.9%	51%
Agricole (Mm ³ /an)	73.4%	3.2	5.5	73.4%	44%
TOTAL (Mm ³ /an)	42.2%	18.8	24.1	28.0%	100%
% changement	42.2%	0.0%	28.0%	28.0%	
Scenario 3					
Consom. (L/pers/j)	-11.6%	216	191	-11.6%	
Population	76.5%	204 247	360 437	76.5%	
Résidentiel tot (Mm ³ /an)	55.9%	6.0	9.4	55.9%	46%
Industriel (Mm ³ /an) *	46.1%	6.8	7.6	10.8%	10%
CI (Mm ³ /an)	56.0%	2.8	4.4	56.0%	22%
ICI (Mm ³ /an)	52.9%	9.6	11.9	24.0%	32%
Agricole (Mm ³ /an)	49.1%	3.2	4.8	49.1%	22%
TOTAL (Mm ³ /an)	52.8%	18.8	26.1	38.4%	100%
% changement	52.8%	0.0%	38.4%	38.4%	

10.3 Scénarii de modélisation numérique à considérer

Le tableau 10.15 résume les scénarii de changement de l'usage et de la recharge de l'eau souterraine en climat futur. Les volumes absolus (en Mm³/an) de la recharge et des usages actuels et futurs sont indiqués pour toute la région d'étude. Il est ainsi possible de calculer la recharge effective globale à l'échelle de toute la région (recharge moins usages) en termes de pourcentage par rapport à la recharge totale. Dans les conditions actuelles, la recharge totale est estimée à 68.7 Mm³/an et l'usage total à 18.8 Mm³/an, ce qui donne une recharge effective de 49.9 Mm³/an qui représente 72.6% de la recharge totale actuelle (cellule surlignée en vert du tableau 10.15).

Trois scénarii de recharge futurs sont considérés (tableau 10.11) : une augmentation de 20%, l'absence de changement et une réduction de 5% (voir le raisonnement à la section 10.1.5). De même, sur la base du tableau 10.14, trois scénarii d'augmentation des usages futurs sont aussi considérés : +11.3%, +28.0% et +38.4%. La combinaison des scénarii de changement de la recharge et de l'usage mène à une gamme de recharge effective (recharge – usages) allant d'une valeur maximale de 61.4 Mm³/an à une valeur minimale de 39.2 Mm³/an. Ces valeurs de recharge effective représenteraient respectivement 89.5% et 57.0% de la recharge totale actuelle. La valeur maximale serait en fait une augmentation de la recharge effective par rapport aux conditions présentes. Au contraire, la valeur minimale impliquerait une proportion d'usage qui semble a priori représenter un niveau d'usage difficilement soutenable de la recharge totale, d'autant plus que des pressions locales encore plus importantes seraient appliquées à certains secteurs de la région d'étude.

Tableau 10.15 – Résumé des scénarii de changement de la recharge et de l'usage en climat futur (% par rapport aux conditions actuelles) et effet sur la recharge effective (recharge - usages).

		Recharge (Mm ³ /an)			Recharge effective (Mm ³ /an)
		Scénarii en climat futur			
		Augmente	Stable	Réduite	
		+20%	0%	-5%	
	Usage (Mm ³ /an)	82.4	68.7	65.2	
	Actuel	18.8	63.5	49.9 (72.6%)	
Scénarii en climat futur	11.3%	21.0	61.4 (89.5%)	47.7	
	28.0%	24.1	58.3	44.5 (64.9%)	
	38.4%	26.1	56.3	42.6	39.2 (57.0%)

Pour la modélisation du piège hydraulique qui remplacerait l'UTES, nous recommandons de retenir trois combinaisons (surlignées en jaune au tableau 10.15) qui couvriraient la gamme des changements envisageables de la recharge effective. En plus de considérer l'effet global sur la recharge effective, il serait important de tenir compte de la répartition spatiale des changements des différents types d'usages futurs de l'eau souterraine dans la région d'étude (section 11).

11 DISTRIBUTION SPATIALE DES PRESSIONS SUR L'EAU SOUTERRAINE

Les sections précédentes ont documenté des travaux réalisés à l'échelle des municipalités de la région d'étude ou de l'ensemble de la région. Il est toutefois d'intérêt de préciser où se trouvent les pressions les plus importantes sur l'eau souterraine à l'intérieur des municipalités et aussi d'être en mesure d'évaluer si différents types d'usages pourraient être en conflit dans certains secteurs de la région d'étude. Ainsi, la présente section documente les travaux réalisés pour définir la distribution spatiale des pressions des différents usages sur l'eau souterraine à l'intérieur des municipalités et des bassins versants. Ces pressions ont été évaluées dans les conditions présentes ainsi que pour les trois scénarii retenus de recharge et d'usages en climat futur (tableau 10.15). La démarche suivie implique les étapes suivantes : (1) définition de la distribution spatiale de la recharge actuelle et en climat futur (section 11.1); (2) définition de la distribution des prélèvements actuels d'eau souterraine et en climat futur (section 11.2); et (3) calcul de la recharge effective (recharge moins les prélèvements) à partir des distributions spatiales de recharge et de prélèvements (section 11.3). Ces distributions spatiales permettent aussi de définir la recharge et les pressions à l'intérieur des bassins versants (section 11.4). Par rapport aux limites municipales, l'utilisation des limites naturelles des bassins versants permet de mieux évaluer si les pressions actuelles ou futures sur l'eau souterraine sont à un niveau acceptable ou à un niveau qui pourrait être excessif.

11.1 Recharge actuelle et en climat futur

Au niveau de la recharge, la carte de la recharge historique obtenue de HELP a d'abord été filtrée de la même façon que l'indicateur de l'usage intramunicipal. Ensuite, la recharge en climat futur a été obtenue en appliquant un pourcentage de changement uniforme à toutes les cellules par rapport aux conditions présentes, soit +20% et -5% (un scénario prévoit une recharge future stable). La carte 23 montre la distribution de la recharge présente et en climat futur. Les cartes présentent la recharge en $\text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$ pour avoir les mêmes unités que pour les usages (cartes 24 et 25 à la section 11.2). Ces unités sont plus faciles à mettre en relation avec les prélèvements des GPE dont les unités sont en m^3/an .

La carte 23 montre que l'application d'un filtre pour lisser la recharge permet en fait de mieux distinguer les zones de faible et de forte recharge. Les zones de faible recharge (moins de $25\,000\ \text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$) sont facilement identifiables au nord-est et au sud-ouest de la région d'étude dans des secteurs où on retrouve des sédiments fins argileux à la surface (carte 6). Ces zones de faible recharge ne sont pas modifiées significativement en climat futur. Des zones de forte recharge (excédant $100\,000\ \text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$) se retrouvent (1) dans le bassin de la rivière l'Acadie et en amont du bassin de la rivière Saint-Jacques mais surtout (2) au centre de la région d'étude sur une grande étendue en forme de croissant partant de Kahnawake et passant par Saint-Isidore, Saint-Rémi et Saint-Michel et se terminant à Sainte-Clotilde. En climat futur, cette zone de recharge en forme de croissant dépasse $125\,000\ \text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$ pour le scénario d'accroissement de 20% de la recharge alors que pour le scénario de réduction de 5% de la recharge il y a une réduction de l'étendue de la zone avec une recharge excédant $100\,000\ \text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$.

11.2 Usages actuels et futurs de l'eau souterraine à l'échelle intramunicipale

L'estimation des prélèvements totaux d'eau souterraine à l'échelle municipale donne un aperçu de l'importance relative des prélèvements entre les municipalités de la région d'étude. La comparaison de ces prélèvements à la recharge à l'échelle municipale (section 8.1) permet aussi de juger globalement des pressions appliquées à l'eau souterraine à l'intérieur des municipalités. Toutefois, ces travaux ne permettent pas d'identifier les secteurs à l'intérieur des municipalités où les pressions sont particulièrement importantes. La répartition des grands préleveurs d'eau (GPE) souterraine et des captages municipaux (carte A.1) ainsi que l'utilisation du sol (carte 7), particulièrement les cultures maraîchères, indiquent que les pressions ne devraient pas être réparties uniformément à l'intérieur des municipalités. Des pressions locales importantes pourraient avoir un impact sur l'approvisionnement en eau souterraine à l'intérieur des municipalités en plus d'influer sur l'apport d'eau souterraine en aval du secteur des anciennes lagunes de Mercier.

Même si ces travaux n'étaient pas prévus au mandat, une évaluation a ainsi été faite de la répartition spatiale des différents types de prélèvements à l'intérieur des municipalités de la région d'étude. À cette fin, l'approche récemment développée dans le cadre d'un autre projet réalisé pour le MELCC par l'INRS a été appliquée (Huchet et al. 2021). Le principe de cette approche est de répartir spatialement les estimations des différents types d'usage qui ont été faites à l'échelle des municipalités à l'aide d'indicateurs de la localisation de ces prélèvements :

- Usage total des réseaux municipaux : localisation ponctuelle aux puits de captage aux débits obtenus de la base de données des Grands préleveurs d'eau (GPE);
- Usage agricole hors réseau : distribution spatiale de l'usage pour la production végétale sur la base des cultures maraîchères et de l'usage pour la production animale sur la base des cultures fourragères telles qu'indiquées par la carte d'utilisation du sol (les GPE agricoles sont présentées sur la carte de l'usage agricole mais ces GPE n'ont pas été utilisés pour estimer l'usage agricole parce que les GPE agricoles ne reflètent pas l'ensemble des usages agricoles de l'eau souterraine);
- Usage industriel-commercial-institutionnel (ICI) : localisation ponctuelle sur la base de la base de données des GPE;
- Usage résidentiel hors réseau : distribution spatiale sur la base de la densité des puits telle qu'indiquée par les données du SIH.

À part l'UTES, aucun usage de l'eau souterraine n'a été considéré dans la zone d'exclusion d'usage de Mercier dont l'étendue est indiquée sur les cartes. Le territoire de Kahnawake a aussi été indiqué sur les cartes car l'approvisionnement en eau de ce secteur est assuré par de l'eau de surface. Une grille avec un espacement de 250 m a été créée pour supporter les opérations menant à la production de cartes de la distribution des usages de l'eau souterraine. Les positions des points de cette grille sont exactement les mêmes que celles de la grille d'estimation de la recharge. Pour les GPE et les puits municipaux, les volumes annuels prélevés ont été répartis sur les mailles de la grille dans un rayon de 500 m du prélèvement pour tenir compte de l'effet spatial des puits à fort débit. De plus, afin de tenir compte de l'incertitude sur la localisation des prélèvements et leur influence spatiale, une représentation moins spécifique que les grilles initiales a été produite. Ainsi, les grilles finales représentent un lissage par moyenne mobile dans un cercle de 5 mailles de rayon ($R = 1250$ m soit une superficie totale de 4.91 km^2).

L'annexe 7 présente des cartes montrant la répartition à l'échelle intramunicipale des types d'usage de l'eau souterraine dans la région d'étude : usage total réseau (carte A.2); usage agricole hors-réseau (carte A.3); usage ICI hors-réseau (carte A.4); usage résidentiel hors-réseau (carte A.5). La carte 24 montre ces différents types d'usage sur une même carte. Il y a une concentration de GPE municipaux à Saint-Rémi au centre de la région et un peu plus à l'ouest à Saint-Isidore. Les GPE ICI reliés aux carrières se trouvent principalement dans la partie nord de la région. L'usage résidentiel hors-réseau est distribué le long des routes, avec une concentration plus importante dans la partie urbaine de Saint-Michel. La carte 24 montre que la distribution de l'usage agricole de l'eau souterraine n'est pas uniforme dans la région, alors qu'il est principalement relié à la présence de cultures maraîchères. Les GPE agricoles disponibles sont presque tous associés à des zones avec une estimation élevée de l'usage agricole de l'eau souterraine, mais on peut présumer que de nombreux puits dédiés aux usages agricoles n'ont pas été répertoriés dans la région. Pontlevoy (2004) ainsi que Technorem (2008a et 2008b) avaient répertoriés un nombre beaucoup plus important de puits à usage agricole dans la région d'étude que les GPE agricoles disponibles.

La carte 24 montre aussi les usages de l'eau souterraine correspondant aux trois scénarii d'usage en climat futur (tableau 10.14). Afin de représenter spatialement ces scénarii d'usages en climat futur, les usages hors réseau résidentiels et agricoles ont été augmentés selon les proportions prévues des scénarii d'usage, mais la localisation de ces usages a été présumée être fixe. Pour l'usage résidentiel, il est en effet plausible que les endroits des prélèvements restent les mêmes s'il n'y a pas de développement résidentiel sur les terres agricoles et que les secteurs desservis par un réseau d'aqueduc ne changent pas. La position des usages agricoles pourrait aussi demeurer relativement stable puisque les usages agricoles sont dominés par l'irrigation des cultures maraîchères dont la localisation peut être présumée fixe. En fait, il pourrait être envisageable qu'en climat futur de nouvelles cultures fassent l'objet d'irrigation et qu'ainsi la distribution spatiale des usages agricoles change avec le temps. Une enquête auprès des producteurs agricoles régionaux serait requise pour préciser la tendance future de l'usage de l'eau pour l'irrigation des cultures. Les usages associés à des GPE ont été présumés demeurer aux mêmes endroits. Les prélèvements des GPE des approvisionnements municipaux ont été augmentés en fonction de l'augmentation prévue des usages réseau résidentiel et ICI. Toutefois, tel qu'expliqué à la section 10.2.2, les prélèvements des GPE associés aux carrières ainsi que l'ensemble des usages ICI ont été présumés demeurer constant en climat futur. Une enquête auprès des exploitants de carrière serait requise afin d'évaluer la réelle tendance future de ces prélèvements.

Le 1^{er} scénario de changement d'usages prévoit une augmentation globale de 11.3% des usages, mais l'augmentation des usages agricoles constituerait 45% de l'augmentation des usages, alors que les usages résidentiel (29%) et ICI (26%) aurait un effet moindre sur l'augmentation de l'usage en climat futur (tableau 10.14). La situation découlant du 1^{er} scénario sur la carte 24 indique que son effet serait surtout d'augmenter l'intensité des prélèvements agricoles dans les mêmes secteurs qu'en conditions présentes. Dans une moindre mesure, l'intensité des prélèvements résidentiels hors réseau serait augmentée. L'effet local du changement de l'usage associé aux GPE n'est pas apparent sur la carte 24. Le 2^e scénario anticipe une augmentation globale encore plus importante des usages de 28% qui seraient attribuables à une forte augmentation des usages ICI (51%) et agricoles (44%), alors que les usages résidentiels augmenteraient faiblement (4%) (tableau 10.14). La situation représentant le 2^e scénario sur la carte 24 montre ainsi une intensification encore plus

importante des prélèvements agricoles par rapport au 1^{er} scénario. Encore une fois, les changements d'usages reliés à des GPE ne sont pas apparents sur la carte 24. Finalement, le 3^e scénario implique la plus forte augmentation des usages, soit de 38.4%, mais cette fois ce sont les usages résidentiels (46%) qui contribuent le plus à l'augmentation, alors que les usages ICI (32%) et agricoles (22%) ont une moins grande influence sur l'augmentation globale (tableau 10.14). On constate sur la carte 24 que ce 3^e scénario mène à une intensification des usages résidentiels hors réseau sur l'ensemble de la région d'étude par rapport à la situation actuelle ou aux autres scénarii. Cette augmentation globale de l'usage pour le 3^e scénario étant très importante, l'intensité des usages agricoles est même un peu plus importante que celle du 1^{er} scénario, ce qui fait que la distribution spatiale des usages agricoles pour les scénarii 1 et 3 est assez similaire, mais moins importante que celle obtenue pour le 2^e scénario.

La carte 25 représente la somme des types d'usage de l'eau souterraine (carte 24 et annexe 7) et elle donne ainsi la répartition spatiale de l'usage total de l'eau souterraine dans la région d'étude. L'usage total est présenté en termes de volume prélevé annuellement par km² (m³/an/km²). Le niveau d'usage a été divisé en classes : un usage inférieur à 500 m³/an/km² a été jugé non significatif et n'est pas représenté alors que le seuil supérieur de l'usage excédant 50 000 m³/an/km² a été choisi comme représentatif d'un usage important (cette valeur est équivalente à une lame d'eau de 50 mm/an). Contrairement à la carte 24, la carte 25 intègre l'effet des GPE dont les prélèvements ont été répartis sur un rayon de 500 m autour de la localisation du GPE afin de considérer l'effet de ces prélèvements autour des points de prélèvement.

La carte 25 montre que la répartition spatiale des prélèvements annuels totaux n'est pas uniforme. Un axe d'usage important va, de l'ouest à l'est, de Mercier à Saint-Isidore, à Saint-Rémi et à Saint-Michel. La carte 24 montre que plusieurs types d'usage contribuent à cet important axe de prélèvements : le piège hydraulique des anciennes lagunes de Mercier, les captages municipaux à Saint-Isidore et à Saint-Rémi, l'usage agricole entre Saint-Isidore et Saint-Rémi, un GPE industriel agricole entre Saint-Rémi et Saint-Michel, et finalement l'usage résidentiel à Saint-Michel. L'intensité des prélèvements associés à ces différents types d'usage est telle qu'il est envisageable que ces usages soient en conflit et interfèrent les uns avec les autres, notamment de façon saisonnière. Plus ponctuellement, des GPE ICI reliés à des carrières font des prélèvements importants à quatre endroits au nord de la région ainsi qu'à un endroit au centre-sud de la région. Finalement, il y a un axe important d'usage agricole de l'eau souterraine dans la partie sud de la municipalité de Saint-Constant. Pour la suite des travaux, il serait important de considérer l'effet de la répartition non uniforme des prélèvements sur la recharge effective de l'aquifère rocheux.

En plus des conditions présentes, la carte 25 montre les prélèvements totaux qui seraient associés aux différents types d'usage en climat futur qui sont montrés à la carte 24. Même si les secteurs avec de forts usages restent assez stables, tous les trois scénarii d'usages en climat futur mènent à un agrandissement des zones à l'intérieur desquelles les usages totaux excèdent 20 000 m³/an/km². Dans le cas du 3^e scénario impliquant une augmentation de l'usage résidentiel, l'étendue des secteurs avec des augmentations du niveau des usages est plus grande, même si le niveau des usages résultants demeure entre 10 000 et 20 000 m³/an/km². La section suivante va considérer l'effet combiné de la recharge et des usages par la représentation de la distribution spatiale de la recharge effective (recharge moins les usages), à la fois en conditions présentes et en climat futur.

11.3 Recharge effective actuelle et en climat futur

Pour les conditions actuelles et les trois scénarii de combinaisons de recharge et d'usage retenus (tableaux 10.11, 10.14 et 10.15), la recharge effective spatialement distribuée a été calculée à l'aide des cartes de la recharge (carte 23) auxquelles ont été soustraits les usages des scénarii correspondants (carte 25). La carte 26 montre ainsi la distribution de la recharge effective. La majorité des secteurs montrent une recharge effective positive, mais les endroits où se trouvent de grands prélèvements se retrouvent avec des zones de recharge effective négative où les prélèvements excèdent la recharge locale. L'approvisionnement en eau de ces GPE dépend à ces endroits de l'apport d'eau souterraine relié à la recharge en amont de leur localisation. Par rapport aux conditions présentes (carte 26.A), le 1^{er} scénario en climat futur montre des étendues plus grande de recharge excédant $100\,000\text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$ parce que la recharge plus importante de ce scénario (+20%) excède l'augmentation des usages (+11.3%) (carte 26.B). Toutefois, pour les 2^e (carte 26.C) et 3^e scénarii (carte 26.D) en climat futur, il y a une réduction de la recharge effective, particulièrement dans le croissant de recharge élevée couvrant Saint-Constant, Saint-Rémi, Saint-Michel et Sainte-Clotilde.

Pour les fins de la modélisation numérique de l'écoulement, il est préférable de ne considérer que la distribution spatiale des usages résidentiels et agricoles pour le calcul de la recharge effective et de considérer ponctuellement les prélèvements reliés à des GPE municipaux ou ICI. Ainsi. La carte 27 montre la recharge effective partielle qui ne considère pas l'effet des GPE. La distribution spatiale de la recharge effective partielle (carte 27) est très similaire à celle considérant tous les usages (carte 26), à l'exception des secteurs avec des recharges effectives négatives qui sont absentes aux endroits où se trouvent des GPE municipaux et ICI. Cette carte pourrait être utilisée directement pour la modélisation de l'écoulement du piège hydraulique aux anciennes lagunes de Mercier ou pour une éventuelle modélisation régionale des ressources en eau souterraine dans la région d'étude.

11.4 Pression sur l'eau souterraine par bassin versant

La définition de la distribution spatiale de la recharge, des usages et de la recharge effective permet de faire un bilan des pressions sur l'eau souterraine sur d'autres territoires que les municipalités. Il est ainsi intéressant de dresser un bilan à l'intérieur des limites naturelles que constituent les bassins versants de la région d'étude. Bien qu'il soit possible pour l'eau souterraine de traverser les limites entre les bassins versants, ces limites représentent tout de même mieux la disponibilité de l'eau souterraine exploitable provenant de la recharge. La mise en relation des usages et de la recharge à l'intérieur des bassins versants donne ainsi un portrait plus représentatif du niveau des pressions sur les ressources en eau souterraine dans la région d'étude.

La carte 28 donne ainsi les conditions d'exploitation de l'eau souterraine qui sont présentes à l'échelle des bassins versants de la région d'étude, tant pour les conditions présentes que pour les trois scénarii en climat futur. Ces bassins versants ont été divisés en une partie amont et une partie aval afin de mieux définir la distribution spatiale des pressions. Plusieurs conditions ont été définies dans ces deux parties de bassin dans les conditions présentes et pour les trois scénarii en climat futur : recharge totale, utilisation totale de l'eau souterraine, recharge effective totale, recharge effective partielle (sans les GPE municipaux ni ICI), et pourcentage d'usage de la recharge. De façon générale, les conditions entre les bassins ainsi qu'entre les parties amont et aval des bassins peuvent être très différentes et elles changent parfois considérablement en climat futur.

La carte 29 montre le pourcentage d'usage de la recharge dans les bassins, ce qui permet d'illustrer plus simplement le niveau variable des pressions sur l'eau souterraine en conditions présentes et les changements envisageables en climat futur. Présentement (carte 29.A), la proportion d'usage de la recharge dépasse 20% au centre de la région, alors que dans la partie aval du bassin de la rivière Esturgeon et la partie amont du bassin de la rivière Saint-Jacques la proportion dépasse 40%. La proportion d'usage de la recharge à l'échelle des bassins resterait relativement stable pour le 1^{er} scénario futur qui est « optimiste » (carte 29.B), mais cette proportion augmenterait considérablement pour les deux autres scénarii en climat futur (cartes 29.C et 29.D), alors que tous les bassins dans la partie centrale de la région d'étude auraient un niveau d'usage de la recharge excédant 40%. Un tel niveau d'exploitation pourrait mener à des effets négatifs considérables dont la nature a été évoquée à la section 8.

12 RECOMMANDATIONS POUR L'EXPLOITATION DURABLE

Les travaux réalisés dans le cadre de ce mandat montrent que le présent niveau des pressions sur l'eau souterraine dans la région d'étude est très important et qu'il est susceptible d'augmenter en climat futur. Ces pressions sont reliées à une variété d'usages de l'eau souterraine, particulièrement l'usage ICI de l'UTES et des carrières, mais aussi à un important usage agricole qui s'ajoute à des captages municipaux et à des puits résidentiels. La préservation des usages actuels de l'eau souterraine, particulièrement pour l'approvisionnement en eau et l'agriculture, nécessite que l'exploitation de l'eau souterraine fasse l'objet d'une gestion active. Nous recommandons ainsi que des travaux soient entrepris afin de mieux comprendre le cadre social et économique ainsi que le fonctionnement du système aquifère régional.

Les travaux sur le cadre social et économique auraient pour but de développer les mécanismes requis pour mettre en place une gestion participative de l'eau souterraine qui impliquerait les acteurs de l'eau de la région d'étude. Ces travaux pourraient comprendre une analyse des acteurs de l'eau et une définition plus précise de leur usage actuel de l'eau souterraine et de l'évolution future de ces usages que les acteurs anticipent. Il faudrait notamment préciser les besoins d'approvisionnement en eau municipal, l'évolution future des prélèvements d'eau des carrières, les besoins des autres activités industrielles et se pencher particulièrement sur les besoins en eau des producteurs agricoles, notamment sur l'évolution anticipée de l'irrigation des cultures. L'évolution des usages agricoles pourrait être précisée en remettant à jour l'enquête qui avait été réalisée par Technorem (2008a et 2008b), mais en l'étendant à toute la région d'étude. Ces travaux vont ainsi impliquer des entrevues avec les acteurs de l'eau et des ateliers d'information sur la situation de l'exploitation de l'eau dans la région d'étude. Ces travaux pourraient définir un mode de gestion participative adapté à la région d'étude et qui pourrait impliquer la création d'un comité de gestion des ressources en eau de la région d'étude auquel participeraient les acteurs de l'eau.

Les travaux sur la compréhension du système aquifère auraient pour but de soutenir les travaux du comité de gestion. Ces travaux pourraient impliquer une meilleure évaluation de la recharge en climat futur et le développement d'un modèle numérique régional d'écoulement de l'eau souterraine. Ces développements pourraient être appuyés sur la bonification du suivi de l'eau souterraine dans la région d'étude par l'ajout de puits du RSESQ. L'ajout de ces puits pourrait aussi permettre une caractérisation détaillée de l'aquifère rocheux régional qui viendrait compléter une compilation de l'ensemble des essais hydrauliques réalisés dans la région d'étude. Des travaux pourraient aussi préciser la distribution spatiale des cultures irriguées et le potentiel d'expansion de l'irrigation des cultures dans la région. Le modèle numérique d'écoulement serait appliqué à l'évaluation de l'incidence des différents types d'usage sur le système aquifère ainsi qu'à l'évaluation de l'effet des scénarii d'usage en climat futur formulés par le comité de gestion. Ce modèle pourrait aussi représenter l'évolution historique de l'exploitation de l'eau souterraine dans la région d'étude. Afin de soutenir le comité de gestion, l'incidence de différentes alternatives d'approvisionnement en eau (de surface ou souterraine) pourrait aussi être testée dans une phase ultérieure.

La gestion durable des ressources en eau de la région d'étude va devoir reposer sur l'implication d'un grand nombre d'acteurs de l'eau. La mobilisation de ces acteurs va sans doute nécessiter des efforts soutenus sur plusieurs années. Il serait donc important d'amorcer cette mobilisation à court terme sur la base de la connaissance et compréhension du système hydrologique régional.

13 RÉFÉRENCES

- Ageco, 2019. Recherche participative d'alternatives durables pour la gestion de l'eau en milieu agricole dans un contexte de changement climatique (RADEAU 1). Rapport final, présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), juin 2019, 271 p.
- Asseau Inc., 1992. Bilan des apports toxiques et inventaire des usages du fleuve Saint-Laurent - Rapport 3, Volume 2 - Secteur Beauharnois-Lanoraie, ZIP 5, 6, 7, 8, 9 et 10. Rapport d'étude soumis à l'INRS-Eau et au Centre Saint-Laurent, Février 1992, 147 p. et annexes.
- Audet, G., Lapointe, M.-C., Boothroyd, K., De Mello, J., Jeanneau, S., Blackburn, F., 2015. Portrait de la Zone Châteauguay. SCABRIC, Saint-Chrysostome (Québec), 192 p. et annexes, ISBN 978-2-9815404-0-9 (pdf).
- Bergeron, O. 2017. Grilles climatiques quotidiennes du Réseau de surveillance du climat du Québec, Version 2 - Guide d'utilisation. Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction de l'information sur le milieu atmosphérique, ISBN 978-2-550-77885-1 (PDF), 27 p.
- Blanchette, D., 2006. Caractérisation géochimique des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Châteauguay, Québec, Canada. Mémoire de maîtrise, INRS, Québec, Septembre 2006.
- Blanchette, D., Lefebvre, R., Nastev, M., Cloutier, V., 2010. Groundwater quality, geochemical processes and groundwater evolution in the Chateauguay River watershed, Quebec, Canada. *Canadian Water Resources Journal*, 35(4), 503-526.
- Bordeleau, G., Rivard, C., Lavoie, D., Lefebvre, R., Malet, X., Ladevèze, P., 2018. Geochemistry of groundwater in the Saint-Édouard area, Quebec, Canada, and its influence on the distribution of methane in shallow aquifers. *Applied Geochemistry*, 89, 92-108.
- Carrier, M.-A., Lefebvre, R., Rivard, C., Parent, M., Ballard, J.-M., Benoit, N., Vigneault, H., Beaudry, C., Malet, X., Laurencelle, M., Gosselin, J.-S., Ladevèze, P., Thériault, R., Beaudin, I., Michaud, A., Pugin, A., Morin, R., Crow, H., Gloaguen, E., Bleser, J., Martin, A., Lavoie, D., 2013. Portrait des ressources en eau souterraine en Montérégie Est, Québec, Canada. Projet réalisé conjointement par l'INRS, la CGC, l'OBV Yamaska et l'IRDA dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines, Rapport final INRS R-1433, version finale soumise en juin 2013 au MDDEFP et aux partenaires régionaux, 283 p., annexes, incluant 29 cartes et base de données.
- Charron, I., 2016. Guide sur les scénarios climatiques : Utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d'adaptation, Édition 2016. Ouranos, 94 p.
- Chesnaux, R., Molson, J.W., Chapuis, R.P., 2005. An analytical solution for ground water transit time through unconfined aquifers. *Ground Water*, 43(4), 511-517.

- Consortium Axio-Avizo-JFSA, 2016. MRC de Roussillon - Travaux de protection contre l'érosion des rivières du Portage, Saint-Régis et Saint-Pierre à Sainte-Catherine. Mise à jour de l'étude d'impact sur l'environnement déposée au ministre du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Tome 1 – Rapport principal, Dossier No 3211-02-174, mai 2016, 108 p.
- Côté, M.-J., Lachance, Y., Lamontagne, C., Nastev, M., Plamondon, R., Roy, N., 2006. Atlas du bassin versant de la rivière Châteauguay. Collaboration étroite avec la Commission géologique du Canada et l'Institut national de la recherche scientifique - Eau, Terre et Environnement. Québec : ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. 64 p.
- Croteau, A., Nastev, M., Lefebvre, R., 2010. Groundwater recharge assessment in the Chateauguay River watershed. *Canadian Water Resources Journal*, 35(4), 451-468.
- Croteau, A., 2006. Distribution spatiale et temporelle de la recharge à l'aquifère régional du bassin versant de la rivière Châteauguay. Mémoire de maîtrise, INRS, Québec, Août 2006.
- Delottier, H., Therrien, R., Paradis, D., 2021. Simulation de l'impact des variations climatiques sur les eaux souterraines et les eaux de surface : contribution au développement d'outils de gestion de l'eau. Projet de l'Université Laval, présentation virtuelle au MELCC.
- Dupuit, J., 1863. Étude théorique et pratique sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables. 2e éd., Paris, France: Dunod.
- Forchheimer, P., 1901. Wasserbewegung durch Boden. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure* 45: 1782-1788.
- Fortin, G.R., Lorrain, S., Pelletier, M., 1997. Synthèse des connaissances sur les aspects physiques et chimiques de l'eau et des sédiments du secteur d'étude Bassins de La Prairie (rapides de Lachine, grand et petit bassins de La Prairie). Zones d'intervention prioritaire 7 et 8. Environnement Canada – Région du Québec, Conservation de l'environnement, Centre Saint-Laurent. Rapport technique, 170 p.
- Genivar, 2003. Autoroute 30 du sud de Candiac, Delson et Saint-Constant – Étude des traversées de rivières. Rapport M100670, présenté au Ministère des transports du Québec, Novembre 2003, 56 p. et annexes.
- Gosselin, J.-S., 2016. Estimation de la recharge à partir de séries temporelles de la température du sol, des niveaux d'eau dans les puits et de données météorologiques: développement méthodologique et évaluation de l'incertitude. Thèse de doctorat, Institut national de la recherche scientifique, Université du Québec, Québec (<http://espace.inrs.ca/5122/>).
- Gosselin, J.-S., Huchet, F., Lefebvre, R., 2019. Indicateurs de l'état des ressources en eau souterraine sous l'effet du climat et de leur exploitation (Rapport intérimaire #2). Rapport de recherche R-1857, soumis au MELCC en décembre 2019.

- Gosselin, J.-S., Lefebvre, R., Vigneault, H., Huchet, F., Raynauld, M., 2020. Rapport final – Développement de méthodologies d’analyse des données du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ). Rapport de recherche R1942, soumis au Ministère de l’Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) en décembre 2020, 93 p.
- Healy, R.W., Cook, P.G., 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal* 10 (1), 91-109.
- Huchet, F., Raynauld, M., Domaine, J., Lefebvre, R., 2021. Outil de support à l’analyse des demandes d’autorisation de prélèvement d’eau – développement d’une méthodologie pour déterminer les pressions sur les ressources en eau souterraine et les zones de gestion particulière - Rapport de la phase 2. Rapport de recherche R2008, soumis au Ministère de l’Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) en février 2021, 118 p. et annexes.
- JFSA, 2015. Étude hydrogéomorphologique - Rivière du Portage, ville Saint-Catherine, QC. Rapport final, préparé pour la MRC Roussillon, 22 mai 2015, 79 p. et annexe.
- Laurencelle, M., 2018. Propriétés hydrauliques et processus d’invasion par la Mer de Champlain du système aquifère rocheux fracturé régional de la Montérégie Est, Québec, Canada. Thèse de doctorat, INRS, Centre Eau Terre Environnement, 335 p. et annexes.
- Larose-Charette, D., Lefebvre, R., Fagnan, N., Michaud, Y., Therrien, R., 2000. Groundwater flow dynamics in unconfined deltaic aquifers of the Portneuf area, Quebec, Canada. Proceedings, *1st Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conference*, 53rd Canadian Geotechnical Conference, Oct. 15-18, 2000, Montreal, Canada, 285-292.
- Lavigne, M.-A., Nastev, M., Lefebvre, R., Blanchette, A., Croteau, A., Benoit, N., Lamontagne, C., 2005. Hydraulic properties of sedimentary rock aquifers in the Chateauguay River watershed, Quebec, Canada. Proceedings, *58th Canadian Geotechnical Conference and 6th Joint CGS/IAH Conference*, Saskatoon, Canada, October 2005, Session 3E, Paper 550, 8 p.
- Lavigne, M.-A., 2006. Modélisations numériques de l’écoulement régional de l’eau souterraine dans le bassin versant de la rivière Châteauguay. Mémoire de maîtrise, INRS, Québec, Juin 2006.
- Lavigne, M.-A., Nastev, M., Lefebvre, R., 2010. Numerical simulation of groundwater flow in the Chateauguay River aquifers. *Canadian Water Resources Journal*, 35(4), 469-486.
- Lefebvre, R., Ballard, J.-M., Carrier, M.-A., Vigneault, H., Beaudry, C., Berthot, L., Légaré-Couture, G., Parent, M., Laurencelle, M., Malet, X., Therrien, A., Michaud, A., Desjardins, J., Drouin, A., Cloutier, M.H., Grenier, J., Bourgault, M.-A., Larocque, M., Pellerin, S., Graveline, M.-H., Janos, D. et Molson, J., 2015. Portrait des ressources en eau souterraine en Chaudière-Appalaches, Québec, Canada. Projet réalisé conjointement par l’INRS, l’IRDA et le Regroupement des organismes de bassins versants de la Chaudière-Appalaches (OBV-CA) dans le cadre du Programme d’acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES), Rapport final INRS R1580, soumis au MDDELCC en mars 2015, 246 p. et annexes.

- Lefebvre, R., Ballard, J.M., Raynauld, M., Huchet, F., Colléau, É., Laurencelle, M., 2019. Rapport d'étape de la phase I – Projet de connaissances sur les eaux souterraines de l'Estrie. INRS-ETE, Rapport de recherche R1851, rapport soumis au Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) en septembre 2019, 43 p. et annexes.
- Lefebvre, R., Maltais, I., Paradis, D., Michaud, Y., 2011. Recharge assessment from daily soil moisture balance and well hydrographs, Portneuf unconfined aquifer, Canada. *Geohydro2011*, Joint IAH-CNC, CANQUA and AHQ conference, Québec, Canada, August 28-31, 2011, 8 p.
- Lefebvre, R., 2007. Contexte hydrogéologique et potentiel de réhabilitation du site des anciennes lagunes de Ville Mercier, Québec, Canada. INRS-Eau, Terre et Environnement, Rapport R-914, Rapport d'expertise soumis à la Direction des politiques de l'eau, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Mars 2007, 58 p.
- Marsily, G. de, 1986. *Quantitative hydrogeology - Groundwater Hydrology for Engineers*. Academic Press, Inc., San Diego, CA.
- Martel, R., Robert, T., Batailler, É., Boutin, M., Deschênes-Rancourt, C., Trépanier, L., 2018. Revue de littérature sur les technologies de réhabilitation des sols et des eaux souterraines et réévaluation du potentiel de réhabilitation du site contaminé des anciennes lagunes de Mercier. INRS, Centre Eau Terre Environnement, Rapport de recherche R1783 soumis au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 17 octobre 2018, 68 p.
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC), 2020. Utilisation du territoire 2017 [En ligne] <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/utilisation-du-territoire> [accédé en octobre 2020].
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), 2018. Atlas hydroclimatique du Québec méridional – Rapport technique. Québec, 2018, 65 pages.
- Nastev, M., Parent, M., Ross, M., Howlett, D., Benoit, N., 2016a. Geospatial modelling of shear-wave velocity and fundamental site period of Quaternary marine and glacial sediments in the Ottawa and St. Lawrence Valleys, Canada. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 85 (2016) 103-116.
- Nastev, M., Parent, M., Benoit, N., Ross, M., Howlett, D., 2016b. Regional VS30 model for the St. Lawrence Lowlands, Eastern Canada. *GEORISK*, 13 p.
- Ouranos, 2021a. Portraits climatiques – Montérégie. <https://www.ouranos.ca/portraits-climatiques/#/regions/27> [accédé en mars 2021]
- Ouranos, 2021b. Adaptation aux changements climatiques : défis et perspectives pour la région de la Montérégie. <https://www.mamh.gouv.qc.ca/amenagement-du-territoire/lutte-contre-les-changements-climatiques/fiches-syntheses-regionales-dadaptation-aux-changements-climatiques/> [accédé en mars 2021]

- Parent, M., Lamothe, M., Dubé-Loubert, H. (red.), 2017. Surficial geology, Basses-Terres centrales du Saint-Laurent et régions adjacentes (Québec–Montréal–Ottawa), Quebec and Ontario; Geological Survey of Canada; Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec, scale 1:400 000.
- Pontlevoy, O., 2004. Modélisation hydrogéologique pour supporter la gestion du système aquifère de la région de Ville-Mercier. Mémoire de maîtrise, INRS, Québec, Avril 2004.
- Pontlevoy, O., Lefebvre, R., Therrien, R., Martel, R., Ouellet, M., Lamontagne, C., 2002. Regional groundwater modeling to support aquifer system management in the Ville Mercier area, Quebec, Canada. Proceedings, 3rd Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conference, 55th Canadian Geotechnical Conference, October 20-23, Niagara Falls, Canada, 1151-1158.
- Racine, C., 2005. Étude des alternatives de contrôle des panaches d'eau souterraine contaminée par des liquides immiscibles denses et légers, Ville-Mercier, Québec, Canada. Mémoire de maîtrise, INRS, Québec, Mars 2005.
- Raskin, P., 1997. Water Futures: Assessment of Long-range Patterns and Problems. Background document to the Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World report. (WMO, 1997).
- SIGÉOM, 2020. Données vectorielles et services web – Téléchargement par thème [En ligne]. Système d'information géominière du Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec, <http://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/SIGEOM/TOUTQC/FRA/> [accès en octobre 2020].
- Technorem, 2008a. Étude hydrogéologique régionale dans la zone de production maraîchère des bassins versants des rivières Norton, Esturgeon, Saint-Pierre et de la Tortue – Montérégie. Rapport final PR06-50, Programme d'approvisionnement en eau Canada-Québec, No de projet CDAQ 5074, 177 p. et annexes.
- Technorem, 2008b. Étude hydrogéologique régionale dans la zone de production maraîchère des bassins versants des rivières l'Acadie et de la Tortue – Montérégie. Rapport final PR06-49, Programme d'approvisionnement en eau Canada-Québec, No de projet CDAQ 5073, 177 p. et annexes.
- Therrien, R., McLaren, R.G., Sudicky, E.A., Panday, S.M., 2010. A three-dimensional numerical model describing fully-integrated subsurface and surface flow and solute transport. User Guide.
- Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38:55–94.

- Tremblay, T., 2008. Hydrostratigraphie et géologie du Quaternaire dans le bassin versant de la rivière Châteauguay, Québec. Mémoire de maîtrise en sciences, Université du Québec à Montréal.
- Tremblay, T., Nastev, M., Lamothe, M., 2010. Grid-based hydrostratigraphic 3D modelling of the Quaternary sequence in the Chateauguay River watershed, Quebec. *Canadian Water Resources Journal*, 35 (4), 377-398.
- Tsutsumi, A., Jinno, K., Berndtsson, R., 2004. Surface and subsurface water balance estimation by the groundwater recharge model and a 3-D two-phase flow model. *Hydrological Sciences Journal* 49 (2), 205-226.

Annexes

Annexe 1 – Hydrogrammes de puits du RSESQ d'intérêt dans la région d'étude

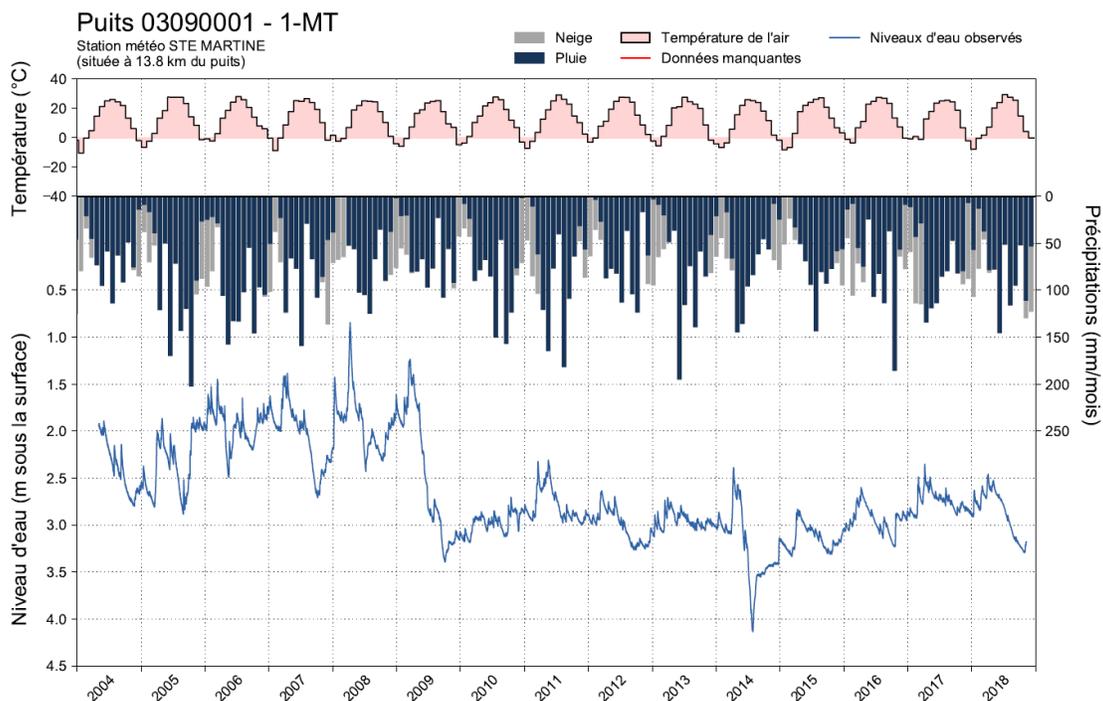


Figure A.1 – Hydrogramme du puits 03090001 dans le secteur des anciennes lagunes de Mercier (période couverte : 1er mai 2004 au 1er décembre 2018 – Totalité des données enregistrées).

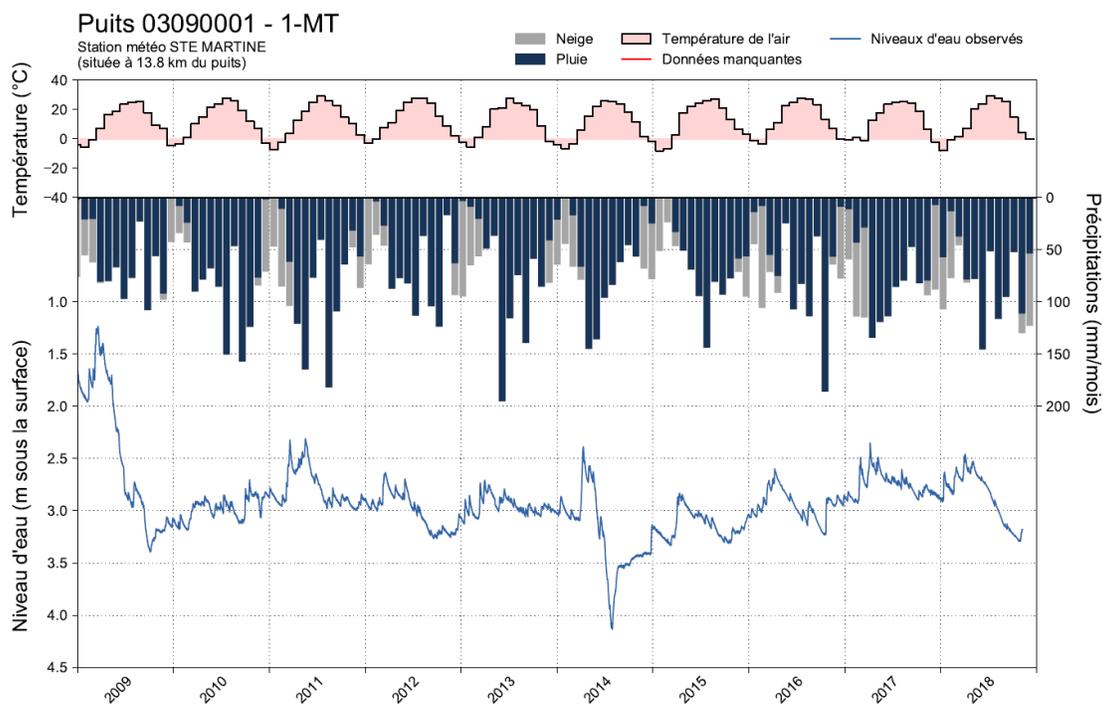


Figure A.2 – Hydrogramme du puits 03090001 dans le secteur des anciennes lagunes de Mercier (période couverte : 1er janvier 2009 au 1er décembre 2018 – 10 dernières années de données).

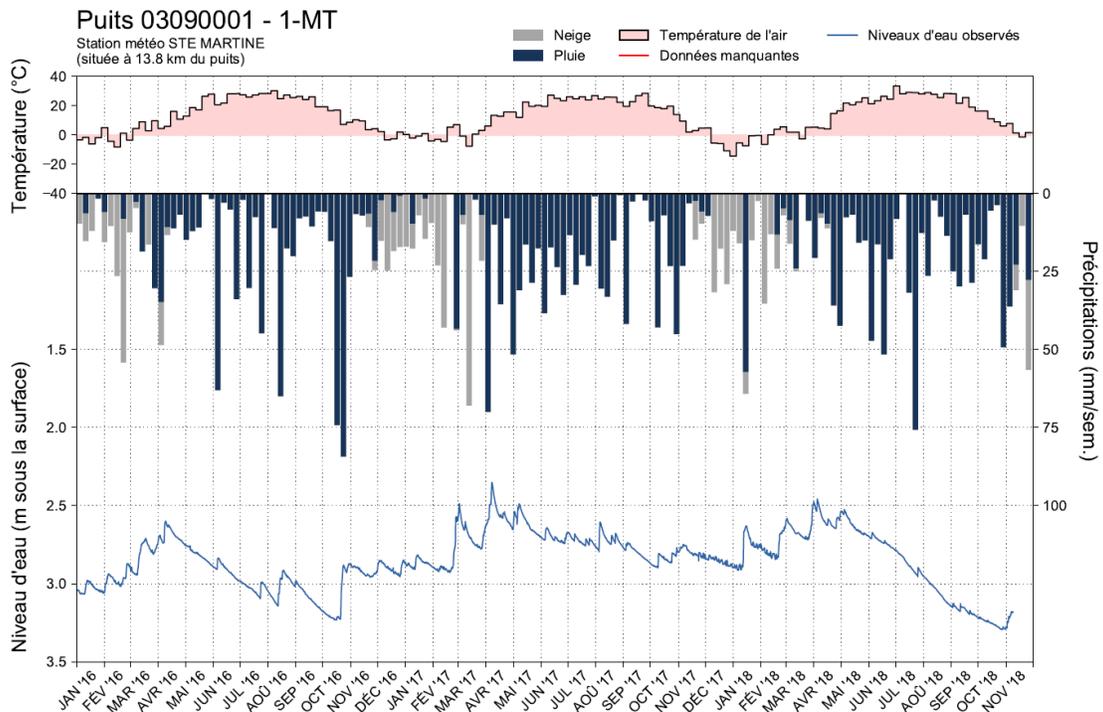


Figure A.3 – Hydrogramme du puits 03090001 dans le secteur des anciennes lagunes de Mercier (période couverte : 1er janvier 2016 au 1er décembre 2018 – 3 dernières années de données).

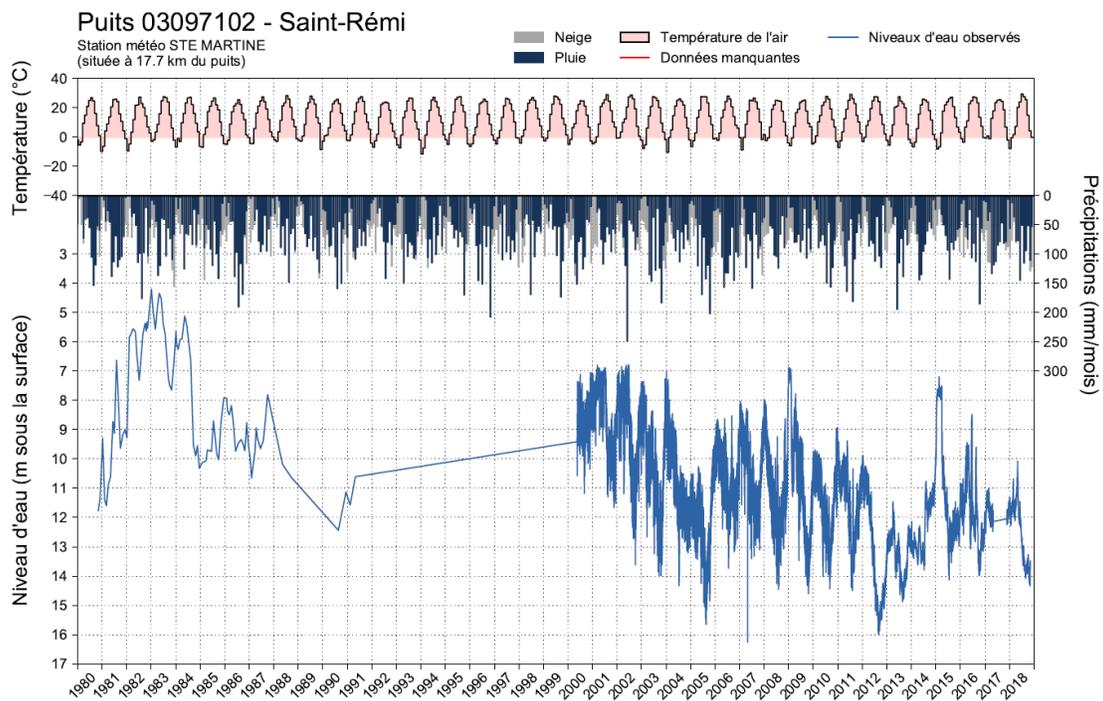


Figure A.4 – Hydrogramme du puits 03097102 dans le secteur de Saint-Rémi (période couverte : 1er novembre 1980 au 1er décembre 2018 – Totalité des données enregistrées).

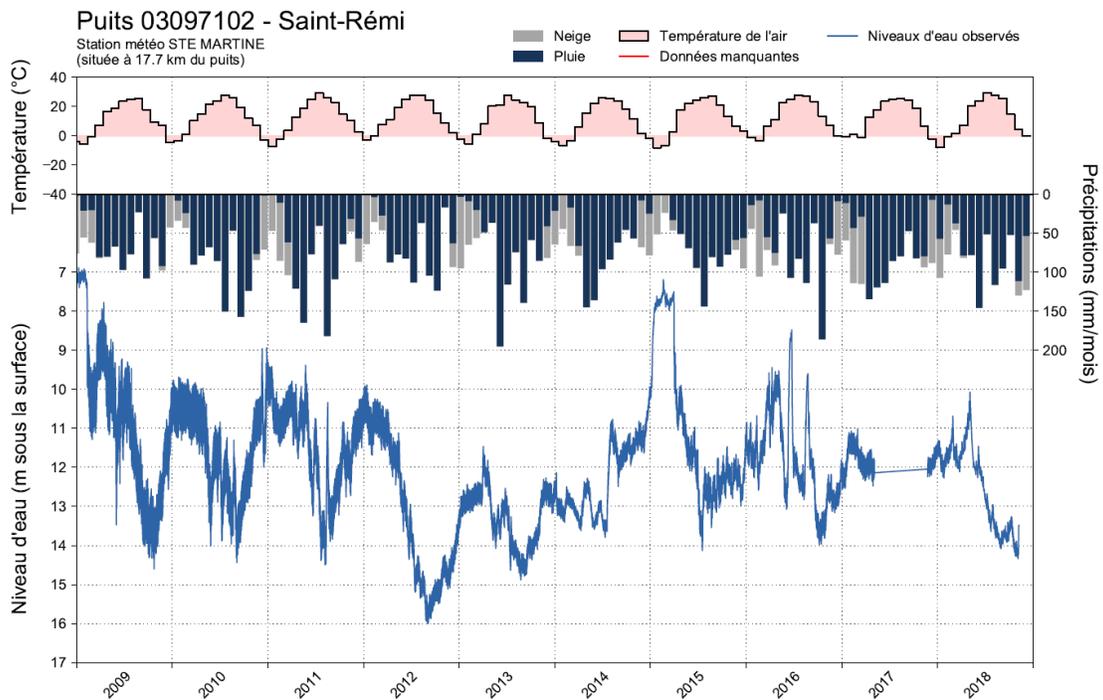


Figure A.5 – Hydrogramme du puits 03097102 dans le secteur de Saint-Rémi (période couverte : 1er janvier 2009 au 1er décembre 2018 – 10 dernières années de données).

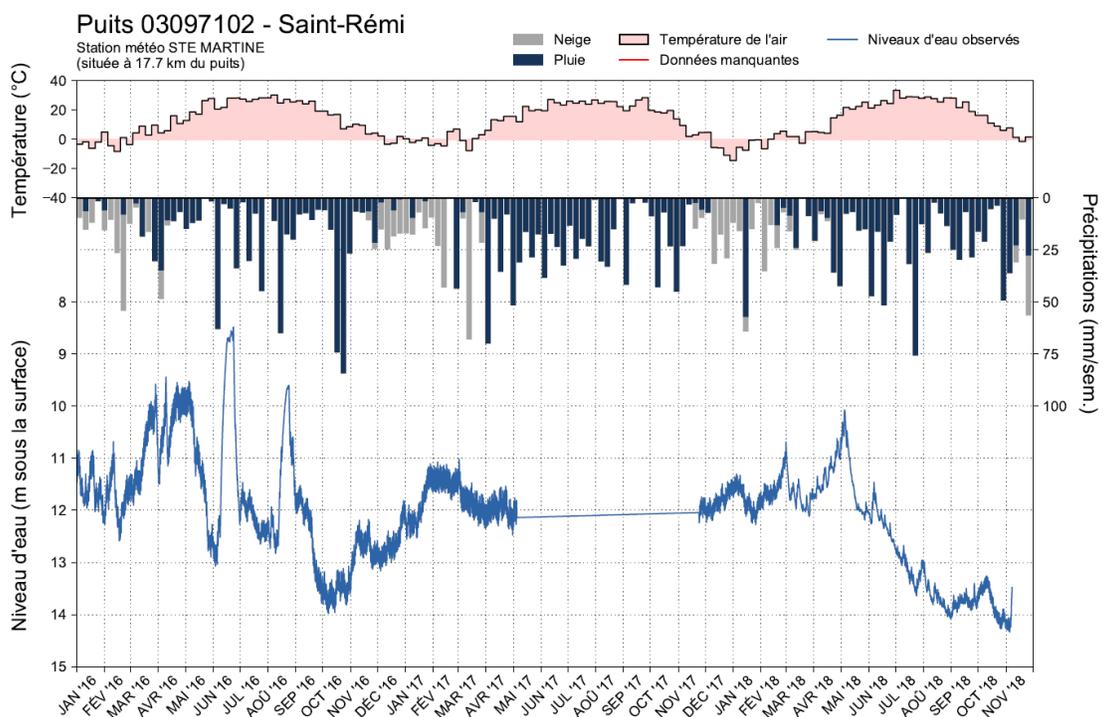


Figure A.6 – Hydrogramme du puits 03097102 dans le secteur de Saint-Rémi (période couverte : 1er janvier 2016 au 1er décembre 2018 – 3 dernières années de données).

Annexe 2 – Estimation de la recharge et de l’usage de l’eau souterraine à l’échelle municipale

Tableau A.1 – Compilation de l’estimation de la recharge et de l’usage de l’eau souterraine par municipalité pour l’aire comprise dans la région d’étude et rapport de l’usage sur la recharge.

Municipalité	Aire ¹ (km ²)	Recharge (mm/an)	Recharge (Mm ³ /an)	Usage (Mm ³ /an)				Usage / Recharge (%)
				Total	Résidentiel	ICI	Agricole	
Candiac	17.28	66	1.13	0.12	0.12	0.00	0.00	11%
Châteauguay	18.07	99	1.80	2.88	1.33	1.55	0.00	160%
Delson	7.68	45	0.35	0.05	0.05	0.00	0.00	14%
Kahnawake	46.18	113	5.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0%
La Prairie	39.63	43	1.70	0.15	0.15	0.00	0.01	9%
Mercier	46.41	62	2.85	2.53	0.87	1.53	0.13	89%
Napierville	1.58	66	0.10	0.18	0.13	0.04	0.00	175%
Saint-Chrysostome	5.38	25	0.13	0.02	0.01	0.01	0.00	19%
Saint-Constant	57.09	61	3.49	1.86	0.42	0.98	0.47	53%
Saint-Cyprien-de-Napierville	34.24	76	2.60	0.16	0.07	0.03	0.07	6%
Sainte-Catherine	8.36	54	0.46	0.02	0.02	0.00	0.00	4%
Sainte-Clotilde	39.84	72	2.87	2.22	0.11	1.76	0.35	77%
Saint-Édouard	52.47	93	4.87	0.34	0.13	0.00	0.21	7%
Sainte-Martine	40.75	23	0.96	0.35	0.21	0.13	0.00	36%
Saint-Isidore	52.01	70	3.63	1.23	0.46	0.60	0.16	34%
Saint-Jacques-le-Mineur	67.65	103	6.99	1.93	0.18	1.69	0.06	28%
Saint-Jean-sur-Richelieu	31.90	40	1.29	0.07	0.05	0.00	0.02	5%
Saint-Mathieu	31.36	66	2.07	0.14	0.13	0.00	0.01	7%
Saint-Michel	60.09	97	5.85	0.93	0.32	0.00	0.61	16%
Saint-Patrice-de-Sherrington	73.15	89	6.52	0.50	0.17	0.00	0.34	8%
Saint-Philippe	61.90	28	1.75	0.50	0.16	0.33	0.00	28%
Saint-Rémi	78.76	100	7.85	2.48	0.81	0.94	0.74	32%
Saint-Urbain-Premier	53.51	54	2.87	0.14	0.08	0.04	0.02	5%
Très-Saint-Sacrement	24.50	54	1.32	0.03	0.03	0.00	0.00	2%
TOTAL	949.79	72	68.65	18.83	6.00	9.63	3.20	27%
Ratio (%)				100%	32%	51%	17%	

1 : il s’agit de l’aire comprise dans la région d’étude.

Annexe 3 – Estimation de la recharge dans l’esker de Mercier

Ce travail a été réalisé par Jean-Sébastien Gosselin, professionnel de recherche à l’INRS et développeur du logiciel GWHAT d’estimation de la recharge (Gosselin 2016; voir aussi Gosselin et al. 2020).

Le puits d’observation Mercier (03090001) du RSEQ est situé dans le secteur hydroclimatique de Châteauguay. Des données du niveau d’eau dans ce puits sont disponibles du 2004-05-05 au 2018-11-08. Durant cette période, le niveau de l’eau a varié entre 3.48 m et 1.65 m sous la surface du sol, avec un niveau moyen de 2.672 m. Selon le log de forage du puits (figure A.7), on observe un horizon de sable, gravier et cailloux qui s’étend de la surface du sol jusqu’à une profondeur de 3 m sous la surface. Sous cet horizon superficiel, on retrouve un horizon de sable fin silteux qui va de 3 m jusqu’à une profondeur de 5.8 m sous la surface. Ainsi, depuis 2004, la nappe a fluctué à l’intérieur de deux horizons de sol caractérisés par des propriétés hydrauliques différentes.

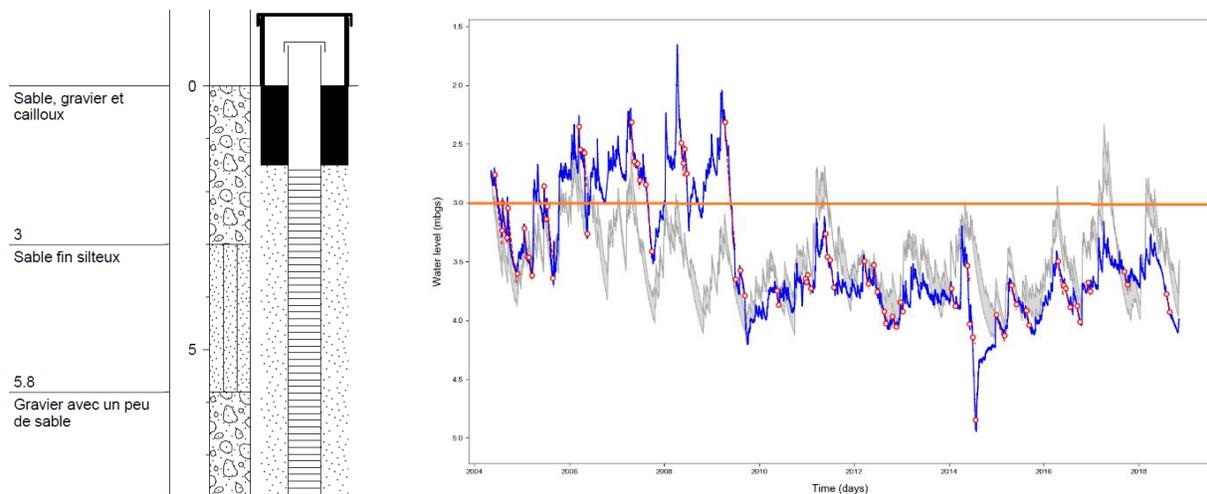


Figure A.7 – Puits Mercier (03090001) du RSEQ : à gauche, stratigraphie et installation; à droite l’hydrogramme du puits (niveaux d’eau) de 2004 à 2018.

Tableau A.2 – Statistiques sur la porosité de drainage (specific yield S_y) (Healy et Cook 2002).

Texture	Average specific yield	Coefficient of variation (%)	Minimum specific yield	Maximum specific yield	Number of determinations
Clay	0.02	59	0.0	0.05	15
Silt	0.08	60	0.03	0.19	16
Sandy clay	0.07	44	0.03	0.12	12
Fine sand	0.21	32	0.10	0.28	17
Medium sand	0.26	18	0.15	0.32	17
Coarse sand	0.27	18	0.20	0.35	17
Gravelly sand	0.25	21	0.20	0.35	15
Fine gravel	0.25	18	0.21	0.35	17
Medium gravel	0.23	14	0.13	0.26	14
Coarse gravel	0.22	20	0.12	0.26	13

Comme on peut le voir sur le tableau A.2 tiré de Healy et Cook (2002), la porosité de drainage de l'horizon de sable, gravier et cailloux devrait normalement être plus élevée que celle de l'horizon de sable fin silteux. Toutefois, en regardant l'hydrogramme de puits de plus près (figure A.7), on remarque qu'une période de récession importante du niveau de la nappe est survenue de la fin mars 2009 jusqu'au début du mois de novembre 2009. On observe que la nappe s'est ensuite maintenue à un niveau moyen significativement plus bas que le niveau observé avant cette période de récession. Cette baisse du niveau moyen de la nappe à l'échelle régionale pourrait s'expliquer par une augmentation de l'exploitation de l'aquifère au printemps 2009 qui se serait maintenue jusqu'à aujourd'hui. Cette hypothèse est plausible considérant que cet aquifère est exploité activement et considérant le nombre important de puits résidentiels d'approvisionnement en eau souterraine dans la région ainsi que la présence des puits de l'UTES. On observe une récession similaire qui est survenue entre la fin d'avril 2014 et la fin de juillet 2014 (figure A.8). Dans ce cas, toutefois, le niveau de la nappe a pu retrouver le niveau moyen observé précédemment. Cela est clairement visible par la période de récupération du niveau de la nappe qui est survenue à la fin de juillet 2014, à la suite de l'épisode de récession. Un événement similaire, mais d'envergure beaucoup moins importante est également observable pour la période du 16-11-2010 au 13-12-2010 (figure A.9).

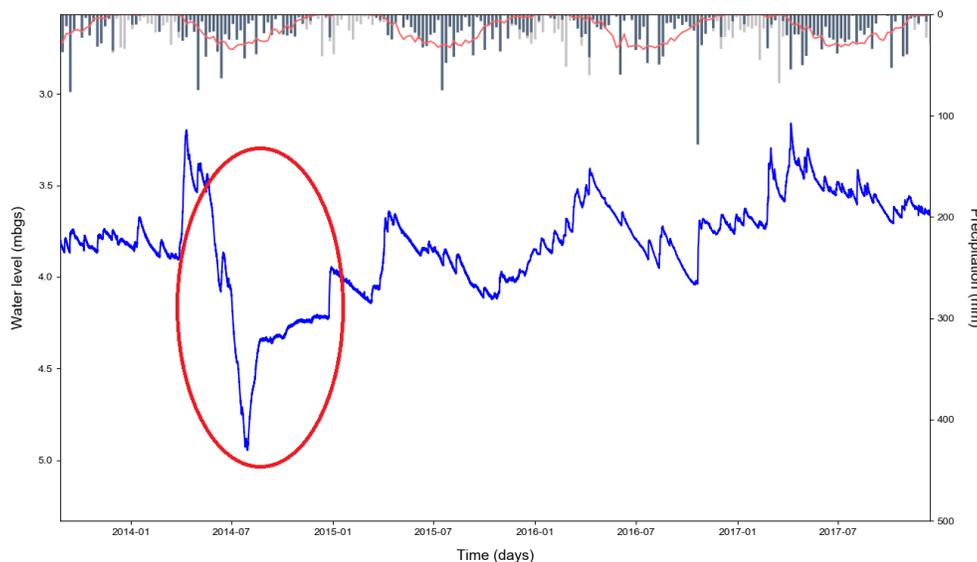


Figure A.8 – Détails de l'hydrogramme du puits Mercier (03090001) du RSEQ de 2014 à 2017.

Ces effets, qui sont sans doute d'origine anthropique, constituent une source d'erreurs importante pour l'évaluation de la recharge avec GWHAT. Pour cette raison, les données de niveau d'eau avant le 27-11-2009 et pour les périodes du 15-05-2014 au 24-12-2014 et du 16-11-2010 au 13-12-2010 ont été retirées de la série de données préalablement à l'exercice d'évaluation de la recharge.

Pour l'évaluation de la recharge, GWHAT a d'abord été utilisé pour produire un ensemble de 9940 modèles en utilisant des plages de valeurs très larges pour les paramètres hydrologiques (tableau de la figure A.10). La distribution des valeurs de l'erreur RMSE des modèles est présentée à la figure A.10 alors que les plages des valeurs des paramètres hydrologiques couvertes par les modèles sont données dans le tableau de la même figure.

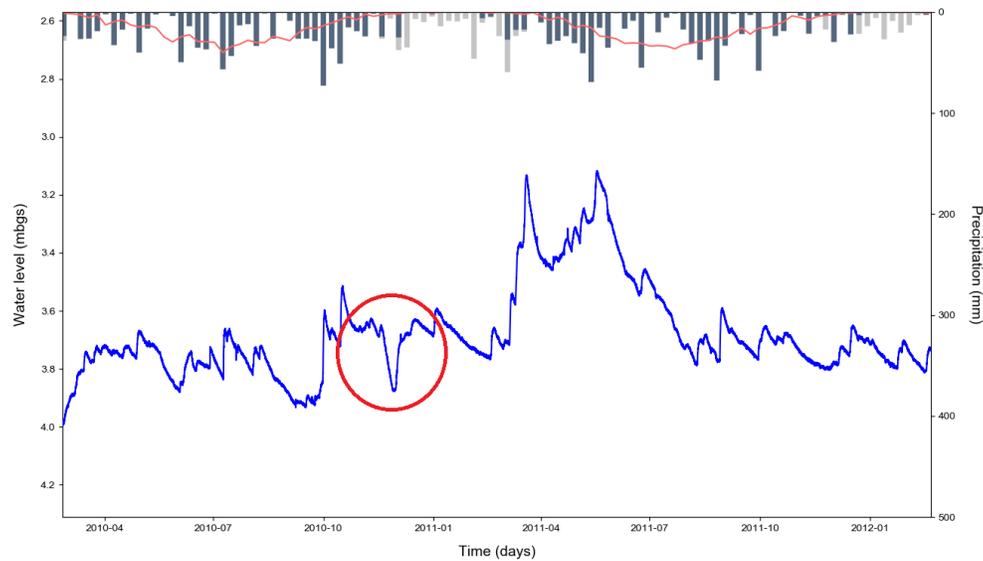


Figure A.9 – Détails de l'hydrogramme du puits Mercier (03090001) du RSESQ de 2010 à 2012.

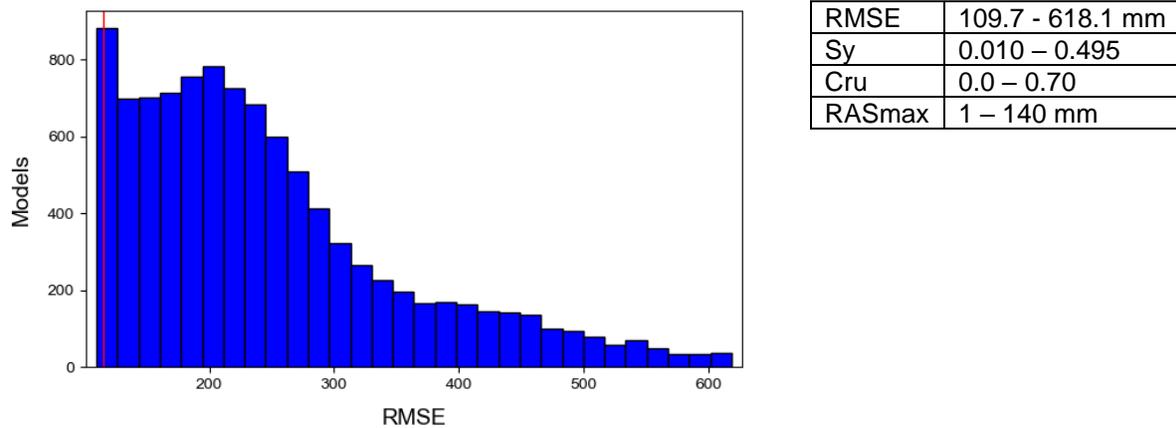


Figure A.10 – Distribution de l'erreur RMSE (à gauche) et paramètres utilisés pour estimer la recharge (à droite).

Toutefois, comme on peut le voir sur les figures A.11 et A.12, le fait d'avoir utilisé des plages très larges pour les paramètres hydrologiques et le fait de considérer l'ensemble des modèles ainsi générés pour évaluer la recharge résulte en une incertitude beaucoup trop grande sur les valeurs estimées. Afin de réduire cette incertitude, il est proposé dans un second temps de rejeter les modèles dont la RMSE est à plus de 5% d'écart de la valeur minimum de RMSE. Ainsi, puisque la plus petite valeur de RMSE obtenue pour l'ensemble des modèles est de 109.7 mm, cela implique que nous ne conservons que les modèles dont la RMSE est inférieure ou égale à 115.2 mm, ce qui correspond à un total de 361 modèles. La distribution des RMSE et les plages de valeurs des paramètres hydrologiques couvertes par ce sous-ensemble de 361 modèles sont présentées à la figure A.13. On remarque que cette opération a permis de réduire substantiellement les plages des paramètres hydrologiques couvertes par les modèles.

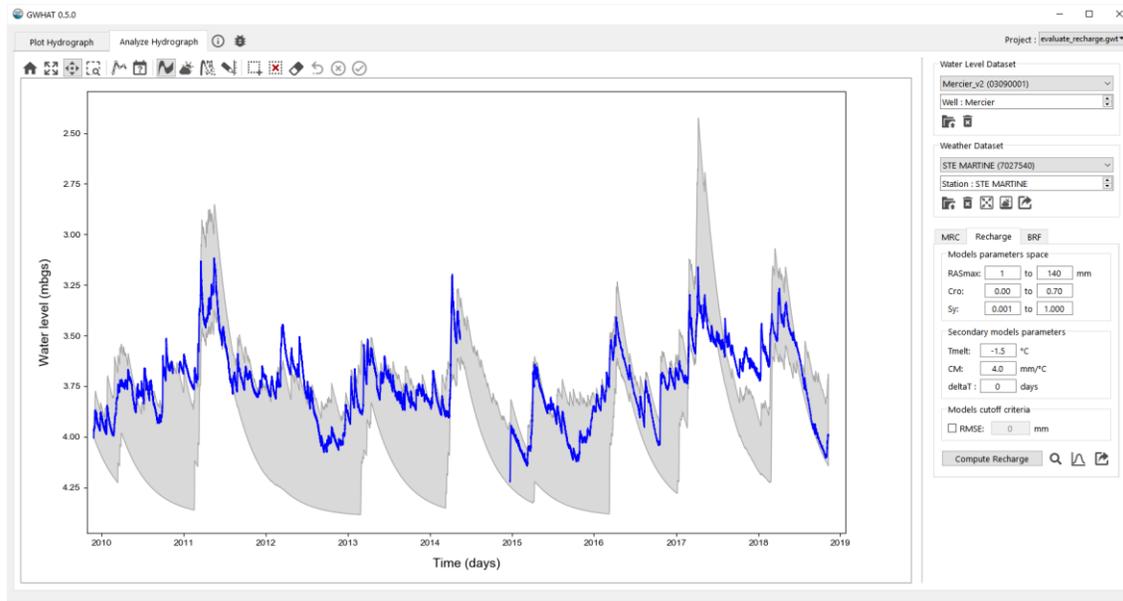


Figure A.11 – Plage des charges simulées (en gris) par rapport à l’hydrogramme observé (en bleu).

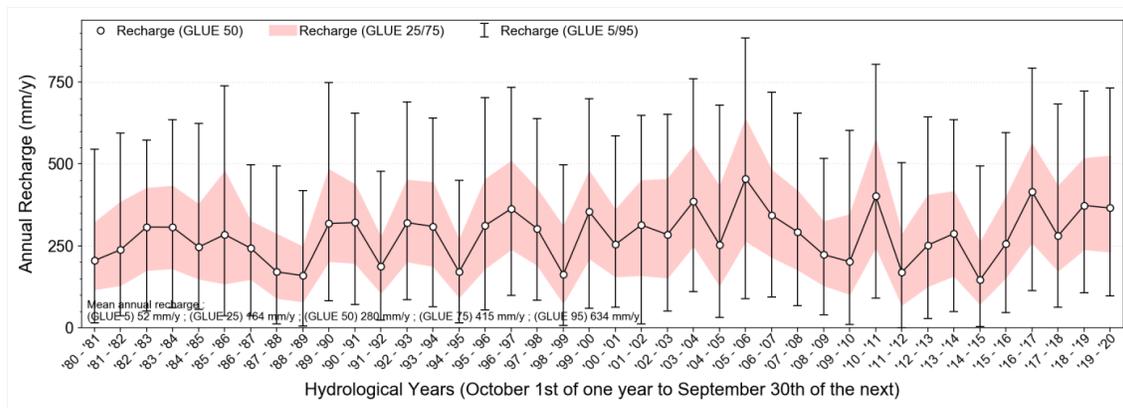


Figure A.12 – Plages des valeurs de la recharge annuelle (années hydrologiques) estimée de 1981 à 2020 à partir des données météorologiques pour cette période.

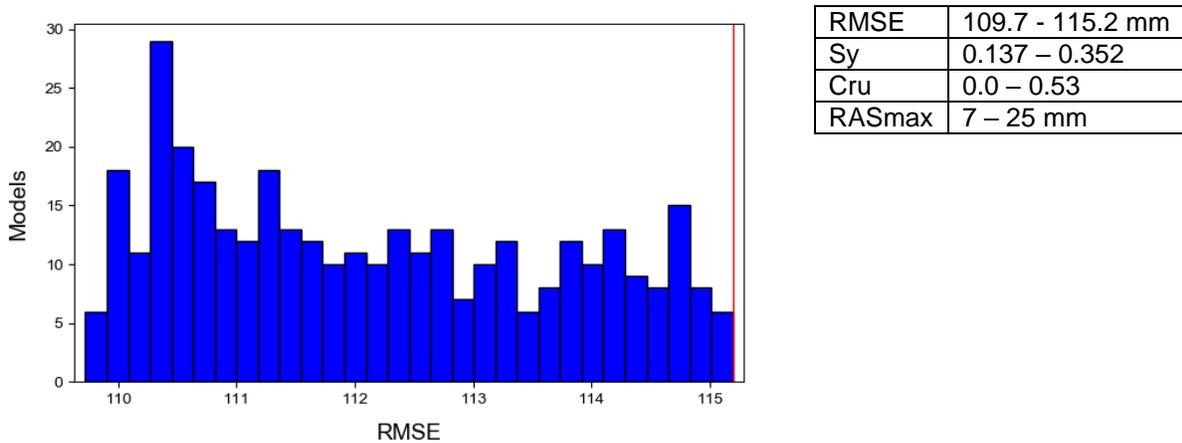


Figure A.13 – Distribution de l’erreur RMSE (à gauche) et paramètres utilisés pour estimer la recharge (à droite) pour les simulations avec des erreurs inférieures à 115.2 mm.

Comme on peut le voir sur les figures A.14 et A.15, le fait de ne garder que les meilleurs modèles permet de réduire significativement l'incertitude sur les estimations de la recharge et d'améliorer substantiellement l'ajustement entre l'enveloppe des niveaux d'eau simulés et observés.

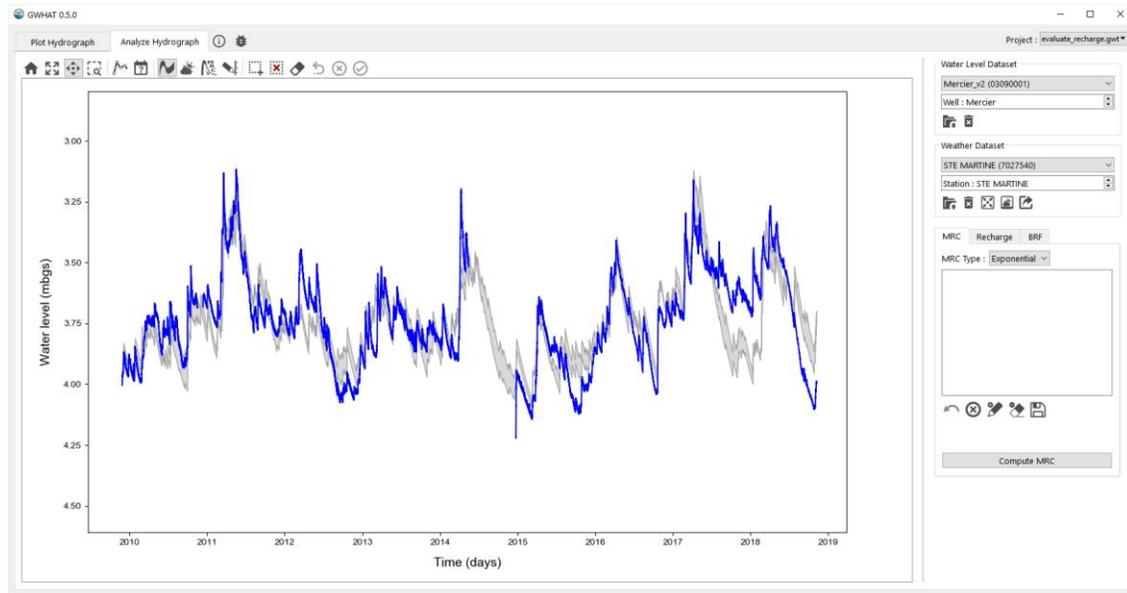


Figure A.14 – Plage des charges simulées (en gris) par rapport à l'hydrogramme observé (en bleu) pour les simulations avec des plages restreintes d'erreur RMSE et de valeurs de paramètres hydrologiques (figure A.13).

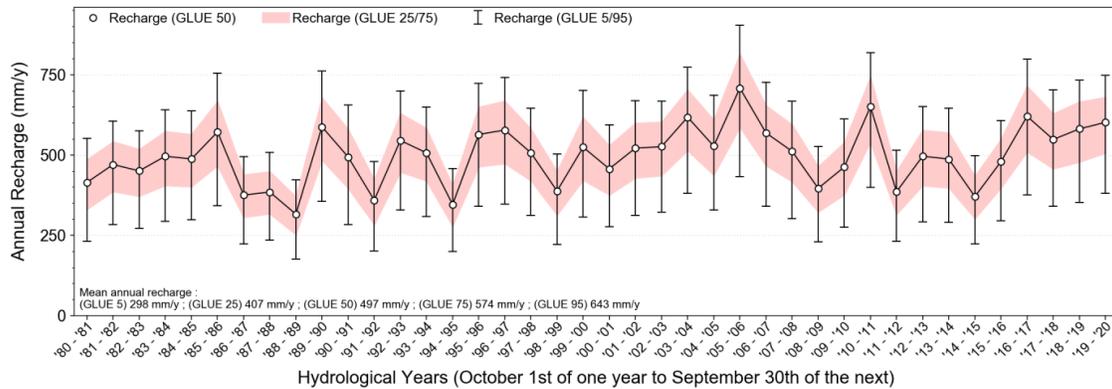


Figure A.15 – Plages des valeurs de la recharge annuelle (années hydrologiques) estimée de 1981 à 2020 à partir des données météorologiques pour cette période en utilisant les plages d'erreur RMSE et de paramètres hydrologiques montrés à la figure A.13.

Jusqu'à maintenant, nous avons utilisé une démarche naïve d'évaluation de la recharge basée uniquement sur la comparaison des niveaux synthétiques de niveaux d'eau produits avec GW-HAT avec les niveaux d'eau observés. La prochaine et dernière étape consiste à incorporer dans notre analyse les autres informations que l'on possède sur le site à l'étude pour réduire davantage l'incertitude sur l'évaluation de la recharge.

En ce qui concerne la plage de valeurs pour la porosité de drainage (Sy), on sait d'après la description de forage que la nappe fluctue à l'intérieur d'une couche de sable fin silteux pour la période 2010 à aujourd'hui (rappelons que nous avons écarté les niveaux avant 2010 aux fins d'estimation de la recharge). Selon le tableau A.2, la plage de Sy plausible pour un matériau de type "sable fin" serait de 0.10 à 0.28. Ces valeurs peuvent alors être utilisées pour contraindre davantage la plage de valeurs plausibles de Sy dans GWHAT.

Pour le coefficient de ruissellement (Cro), la plage des valeurs représentées par les 361 meilleurs modèles est de 0.00 à 0.53, ce qui englobe un très vaste éventail de conditions de pente et de type de surface. Or, en intégrant l'ensemble des informations que l'on possède sur le site, il est certain que nous pourrions restreindre davantage cette plage de valeur. D'après la description de forage, les matériaux en surface seraient caractérisés par du sable, gravier et cailloux. De plus, selon les indicateurs PACC (Gosselin et al. 2019), on aurait les caractéristiques suivantes pour la pente dans un rayon de 500 m autour du puits.

Tableau A.3 – Statistiques sur la pente dans un rayon de 500 m autour du puits.

Pente Puits	Pente Min	Pente Moy	Pente Max
2.1	0.4	1.8	3.5

Au niveau de l'occupation du sol, 3.5 % seraient du forestier, 35.8% de l'agricole et 55.4% urbanisé, constitués principalement de sol nu et de chemin de terre (évalué d'après les photos aériennes). On peut donc voir sur les photos aériennes que les conditions de surface de l'environnement proche du puits sont caractérisées principalement par un sol nu de sable, roche et gravier, avec quelques parcelles éparses de terrain vague recouvertes d'herbes (figure A.16). Dans la ceinture autour de l'environnement proche du puits, on retrouve principalement des terres agricoles. Enfin, d'après les informations que l'on possède sur le site d'étude et d'après les valeurs présentées dans le tableau A.5, il apparaît clair que la valeur du coefficient de ruissellement devrait se situer plutôt entre une 0.05 et 0.15 au lieu de 0.0 à 0.53.

Ainsi, en imposant une plage de Cro de 0.05 à 0.15, une plage de Sy de 0.10 à 0.280 et en ne conservant que les modèles dont la RMSE est inférieure à 115.2 mm (figure A.17), nous obtenons enfin une évaluation de la recharge caractérisée par une incertitude beaucoup plus raisonnable et un excellent ajustement de l'enveloppe des niveaux d'eau simulées aux niveaux observés (figures A.18 et A.19).

Les résultats détaillés de l'estimation de la recharge sont présentés aux figures A.20 à A.22 : composantes du bilan hydrologique pour chaque année considérée (figure A.20); composantes moyennes mensuel du bilan hydrologique (figure A.21); et composantes moyennes annuelles du bilan hydrologique (figure A.22). L'importante recharge estimée être en moyenne de l'ordre de 500 mm/an dans l'esker est cohérente avec les résultats de Croteau (2006) obtenus avec HELP (la figure 6.2 montre que la recharge dans le segment d'esker à l'est de Mercier excède 400 mm/an).



Figure A.16 – Photographie aérienne des conditions entourant le puits d’observation.

Tableau A.4 – Valeurs typiques du coefficient de ruissellement (Tsutsumi et al. 2004).

Table 1 Guidelines for surface runoff coefficients by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Japan.

Type of ground surface	Coefficient of surface runoff, F_{iso}
Road:	
Pavement	0.70–0.90
Permeable pavement	0.30–0.40
Gravel road	0.30–0.70
Shoulder or top of slope:	
Fine soil	0.40–0.65
Coarse soil	0.10–0.30
Hard rock	0.70–0.85
Soft rock	0.50–0.75
Grass plot of sand:	
Slope 0–2%	0.05–0.10
Slope 2–7%	0.10–0.15
Slope 7%	0.15–0.20
Grass plot of clay:	
Slope 0–2%	0.13–0.17
Slope 2–7%	0.18–0.22
Slope 7%	0.25–0.35
Roof	1.00
Unused bare land	0.20–0.40
Athletic field	0.40–0.80
Park with vegetation	0.10–0.25
Mountain with a gentle slope	0.30
Mountain with a steep slope	0.50
A paddy field or water	0.70–0.80
Farmland	0.10–0.30

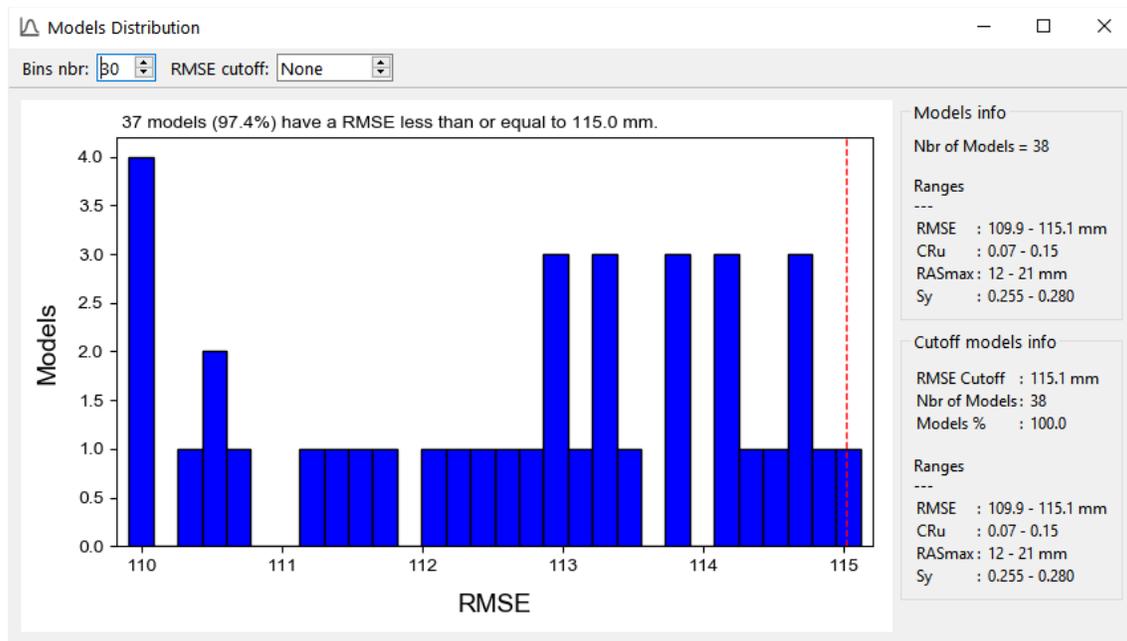


Figure A.17 – Distribution de l’erreur RMSE (à gauche) et des paramètres utilisés pour estimer la recharge (à droite) pour les simulations avec des erreurs inférieures à 115.2 mm.

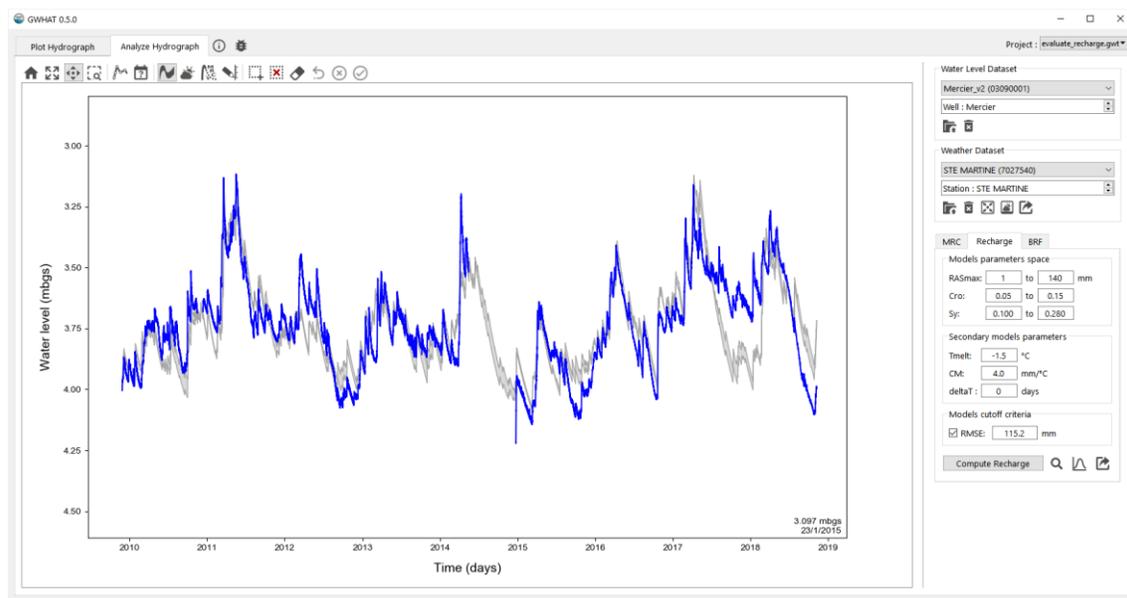


Figure A.18 – Plage des charges simulées (en gris) par rapport à l’hydrogramme observé (en bleu) pour les simulations avec des plages restreintes d’erreur RMSE et de valeurs de paramètres hydrologiques (figure A.17).

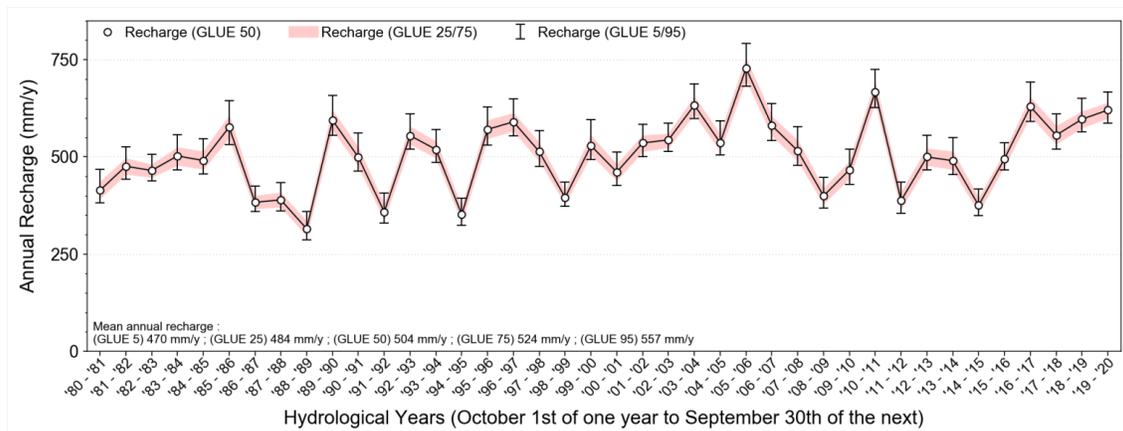


Figure A.19 – Plages des valeurs de la recharge annuelle (années hydrologiques) estimée de 1981 à 2020 à partir des données météorologiques pour cette période en utilisant les plages d’erreur RMSE et de paramètres hydrologiques montrés à la figure A.17.

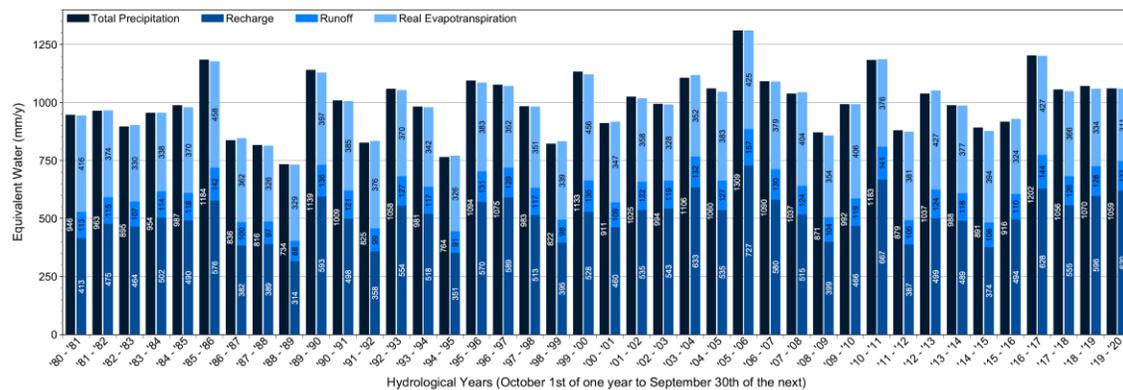


Figure A.20 – Composantes du bilan hydrologique pour la période considérée pour l’estimation de la recharge.

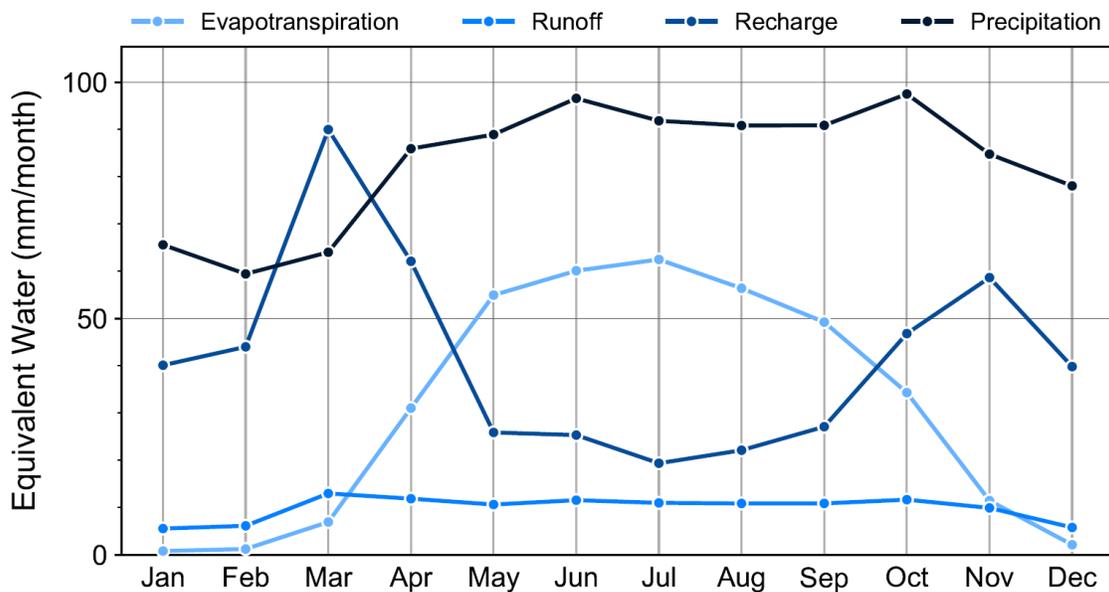


Figure A.21 – Composantes moyennes du bilan hydrologique mensuel pour la période considérée pour l’estimation de la recharge.

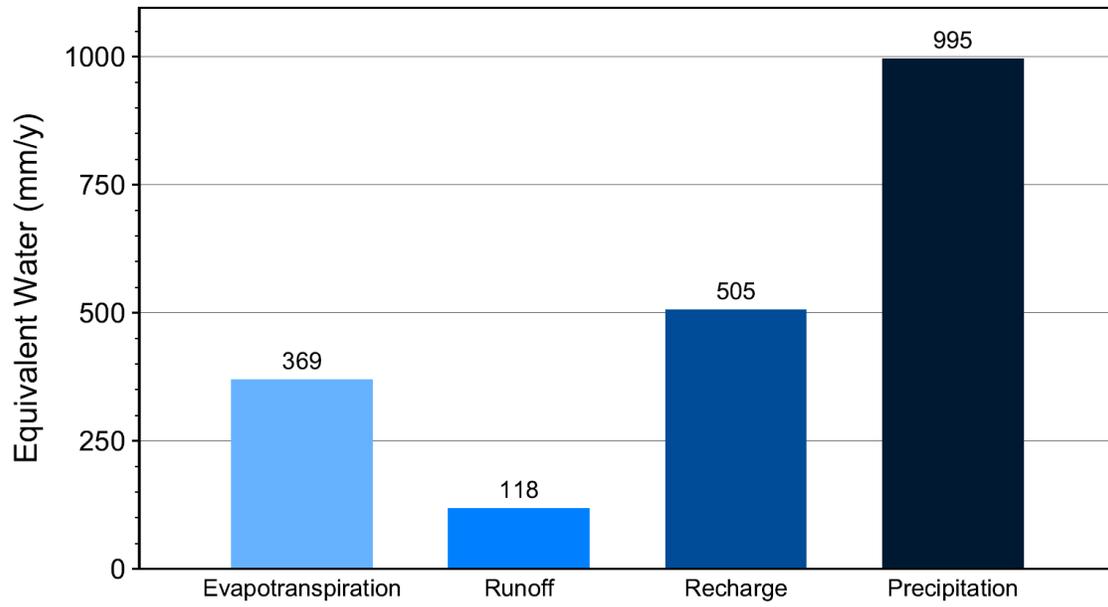


Figure A.22 – Composantes moyennes du bilan hydrologique annuel pour la période considérée pour l'estimation de la recharge.

Annexe 4 – Estimation de l'usage de l'eau par RADEAU 1

Tableau A.5 – Estimation des prélèvements d'eau dans la région d'étude par RADEAU 1 (Ageco 2019). Comparer au tableau 7.1 de l'estimation faite par la présente étude.

Source des prélèvements totaux (Mm³/an)			
Souterrain	Surface		Total
13.0	14.5		27.5
47%	53%		100%
Utilisation des prélèvements totaux (Mm³/an)			
Résidentiel	ICI	Agricole	Total
8.3	12.6	6.6	27.5
30%	46%	24%	100%
Utilisation de l'eau souterraine (Mm³/an)			
Résidentiel	ICI	Agricole	Total
5.1	4.7	3.1	13.0
40%	36%	24%	100%
Utilisation de l'eau de surface (Mm³/an)			
Résidentiel	ICI	Agricole	Total
3.2	7.9	3.4	14.5
22%	54%	24%	100%

Annexe 5 – Estimation de la recharge en climat futur

Cette annexe compile la liste des fichiers électroniques qui ont été utilisés pour faire l'estimation de la recharge en climat futur. Ces fichiers seront transmis avec la version finale du rapport :

- « Donnees_Grille_Info-Climat_Saint-Remi(RL).xlsx » : données de la grille d'Info-Climat (Bergeron 2017) utilisées pour calculer les normales pour la température moyenne annuelle et les précipitations totales annuelles pour la région d'étude obtenues du MELCC;
- « StRemi_Recharge_vs_CC_FINAL.xlsx » : fichier servant au calcul du bilan mensuel (onglet « Bilan mensuel grille ») pour les normales climatiques, pour les conditions en climat futur simulées (Ouranos 2021a) et pour les simulations de l'Atlas hydroclimatique pour le tronçon MON0411. Ce fichier contient aussi le calcul du bilan basé directement sur le tronçon MON0411 (onglet « Bilan des Anglais »). Ce fichier contient aussi les données de l'ensemble de simulations utilisées par Ouranos pour définir les conditions météorologiques actuelles et en climat futur pour la Montérégie et à partir desquelles les scénarii de changements météorologiques aux horizons 2050 et 2080 ont été produits (onglets « Précipitations » et « Température »). L'onglet « Thornthwaite » documente les paramètres $F(\lambda)$ utilisé pour estimer l'ETP en fonction de la latitude moyenne de la région d'étude. Le fichier reproduit aussi les normales climatiques de la grille d'Info-Climat dans les onglets « Tmoy_Normales_Mois_1981_2010 » et « Ptot_Normales_Mois_1981_2010 »;
- « Ouranos CC.xlsx » : conditions météorologiques (précipitations totales annuelles et température moyenne annuelle) historiques et simulées en climat futur (valeurs et graphiques de la figure 10.3) pour la Montérégie (données téléchargées du site Internet d'Ouranos 2021a);
- « Atlas_hydroclimatique_MON0411_qmoy_v2018-1a.pdf » : fiche du tronçon MON0411 téléchargée du site Internet de l'Atlas hydroclimatique (<https://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/Hydraulicite/Qmoy.htm>);
- « Projections_Recharge_UL_HGS_Saint-Remi.xlsx » : fichier compilant les estimations de la recharge actuelle et en climat futur pour la région d'étude à partir de la grille utilisées dans le modèle hydrogéologique numérique HydroGeoSphere représentant le sud du Québec (Delottier et al. 2021).

Annexe 6 – Scénarii d’usage de l’eau souterraine actuel et en climat futur

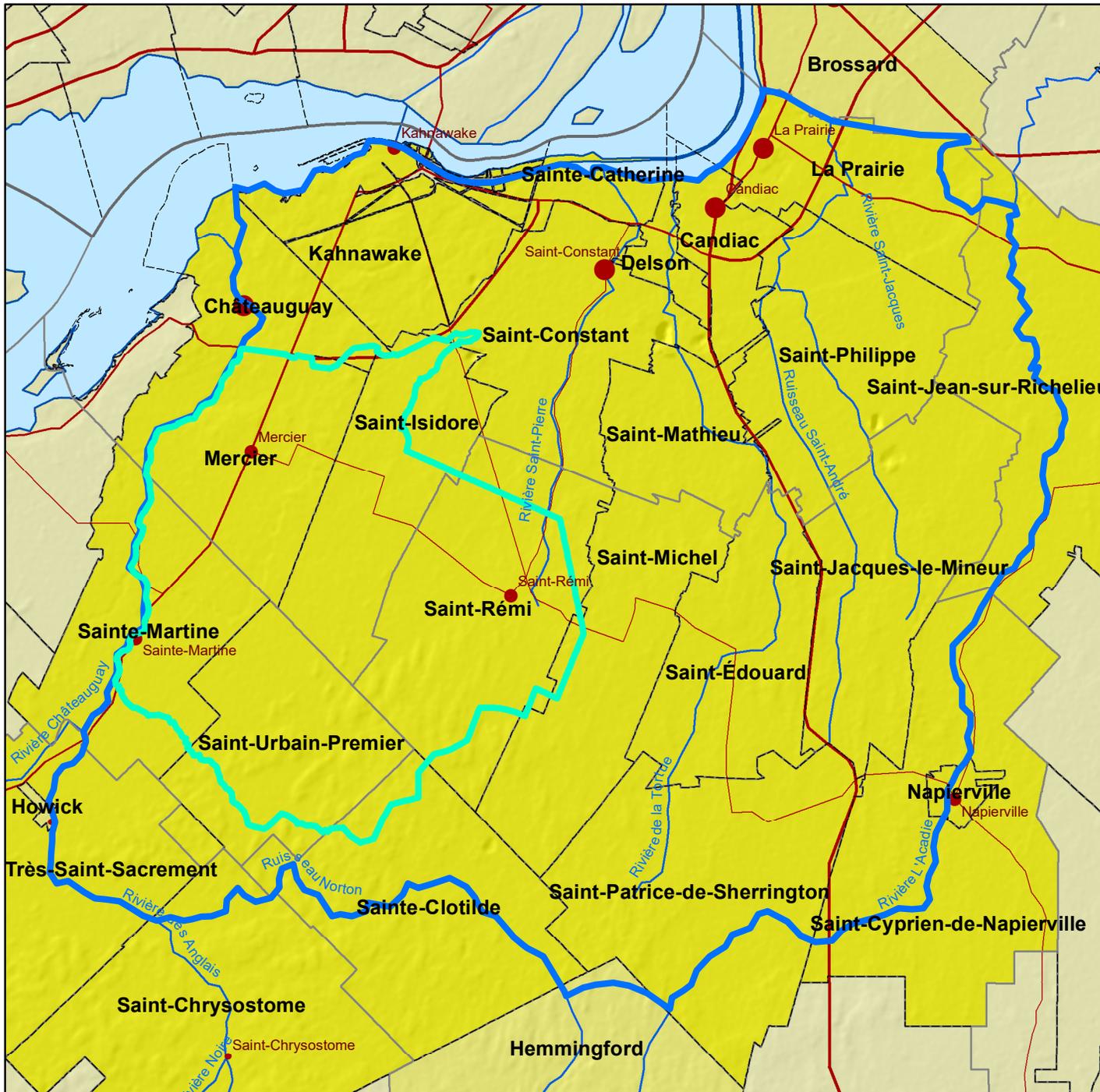
- « StRemi_Estimation_Utilisation_Eau_FINAL.xlsx » : fichier utilisé pour les calculs de l’usage actuel de l’eau (de surface et souterraine) ainsi que pour établir des scénarii d’usage de l’eau souterraine en climat futur.
- « StRemi_Solution_Analytique_Chesnaux_et_al_2005_FINAL.xlsx » : solution analytique pour estimer l’effet des prélèvements sur le niveau piézométrique.

Annexe 7 – Estimation de l’usage intramunicipal de l’eau souterraine et de la recharge effective

Cette annexe décrit des cartes montrant la répartition à l’échelle intramunicipale des types d’usage de l’eau souterraine dans la région d’étude. La carte A.1 montre les types d’usage des GPE présents dans la région d’étude alors que les cartes suivantes montrent la répartition spatiale des types d’usage de l’eau souterraine : usage total réseau (carte A.2); usage agricole hors-réseau (carte A.3); usage ICI hors-réseau (carte A.4); usage résidentiel hors-réseau (carte A.5).

Cartes

Carte 1
Municipalités dans la région d'étude



Limites

- Secteur d'évaluation de l'usage
- Modèle d'écoulement de Mercier

Lieu habité

- Primaire (10 000 habitants et plus)
- Secondaire (1 000 à 9 999 habitants)
- Tertiaire (moins de 1 000 habitants)

Limites administratives

- Frontière internationale
- Limite de région administrative
- Limite de municipalité régionale de comté
- Limite de municipalité

Réseau routier

- Autoroute
- Route nationale
- Route régionale

Réseau hydrographique

- Étendue d'eau
- Rivières

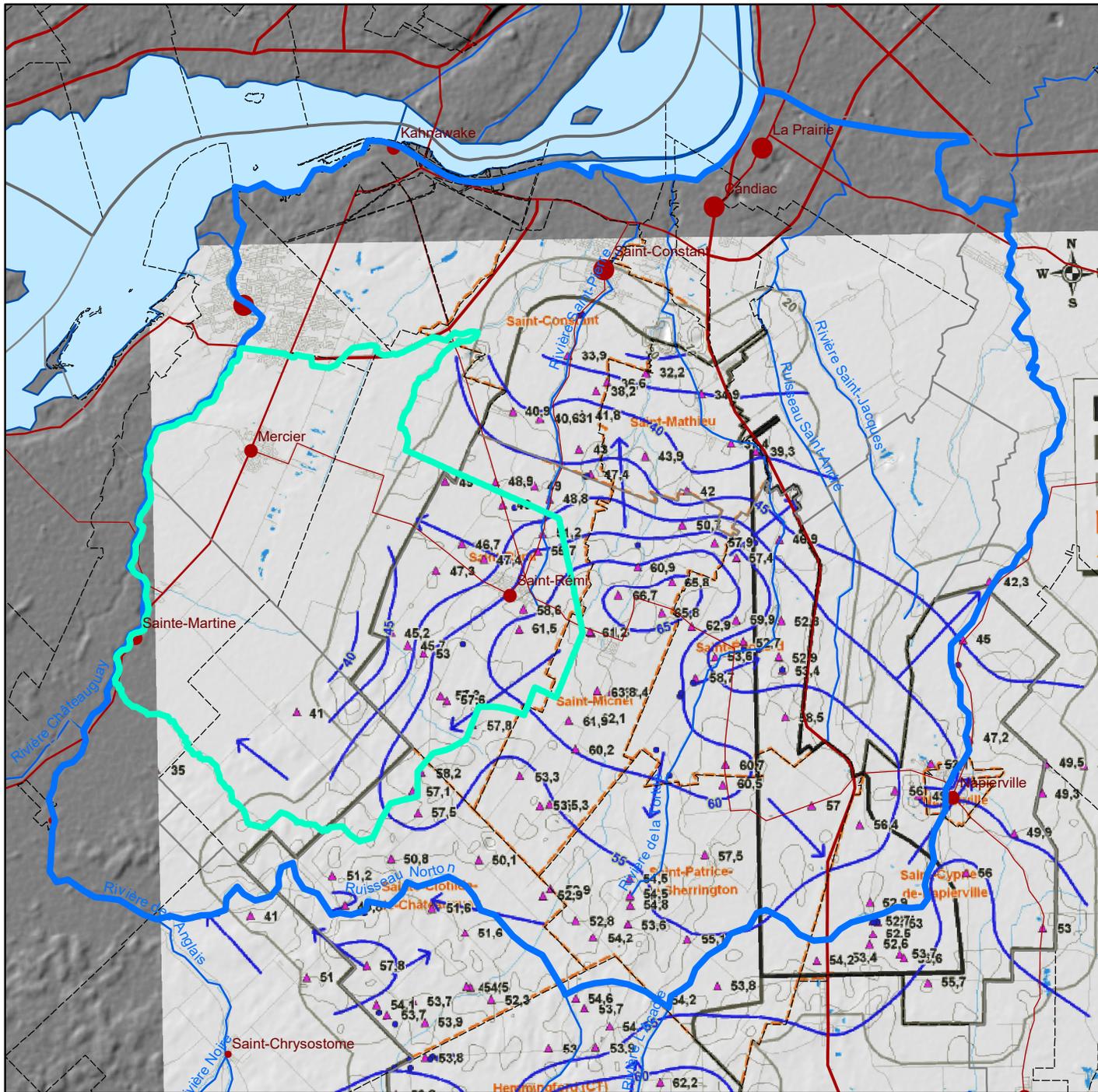
Limites municipales

- Municipalités considérées - Territoire municipal inclus dans la zone d'étude > à 5 %
- Autres municipalités recoupées - Territoire municipal inclus dans la zone d'étude < 5 %
- Autres municipalités

Notes :



Carte 2 Piézométrie de l'aquifère rocheux



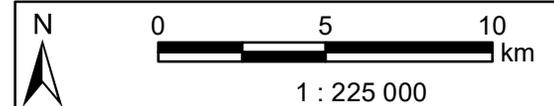
Limites

- ▭ Secteur d'évaluation de l'usage
- ▭ Modèle d'écoulement de Mercier

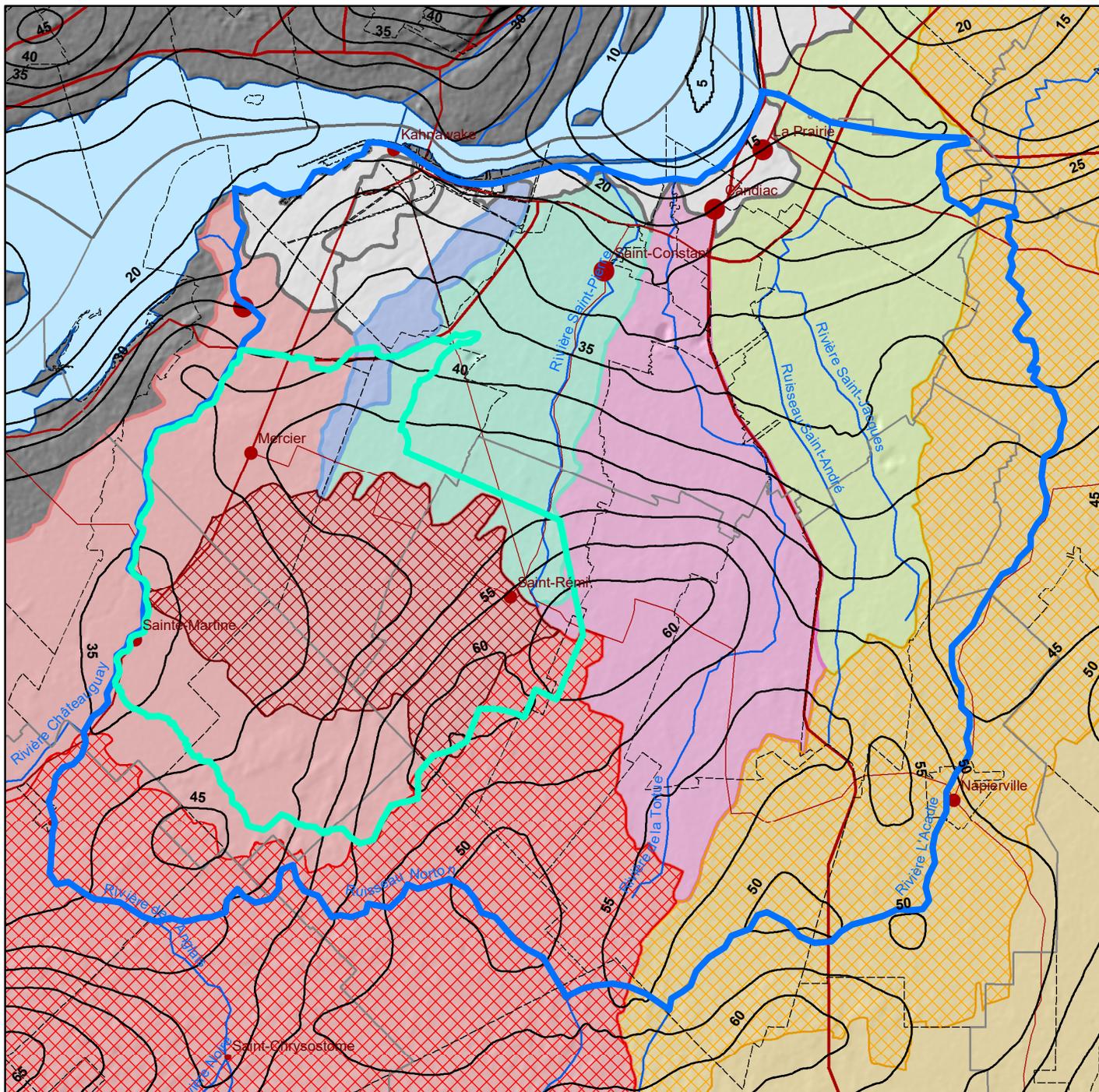
Piezométrie du roc

- Courbe piézométrique (m)
- ➔ Direction d'écoulement
- ▲ Point de contrôle

Notes : Les contours proviennent de Technorem (2008a et 2008b).



Carte 4 Topographie, hydrographie et bassins versants



Limites

- Secteur d'évaluation de l'usage
- Modèle d'écoulement de Mercier

Bassins versants de niveau 1

- Châteauguay
- Richelieu
- Saint-Jacques
- Saint-Régis
- Suzanne
- Tortue
- Bassins résiduels

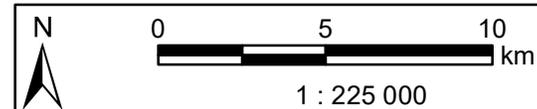
Bassins versants principaux de niveau 2 (superficie > à 100 km²)

- Anglais
- Esturgeon
- L'Acadie

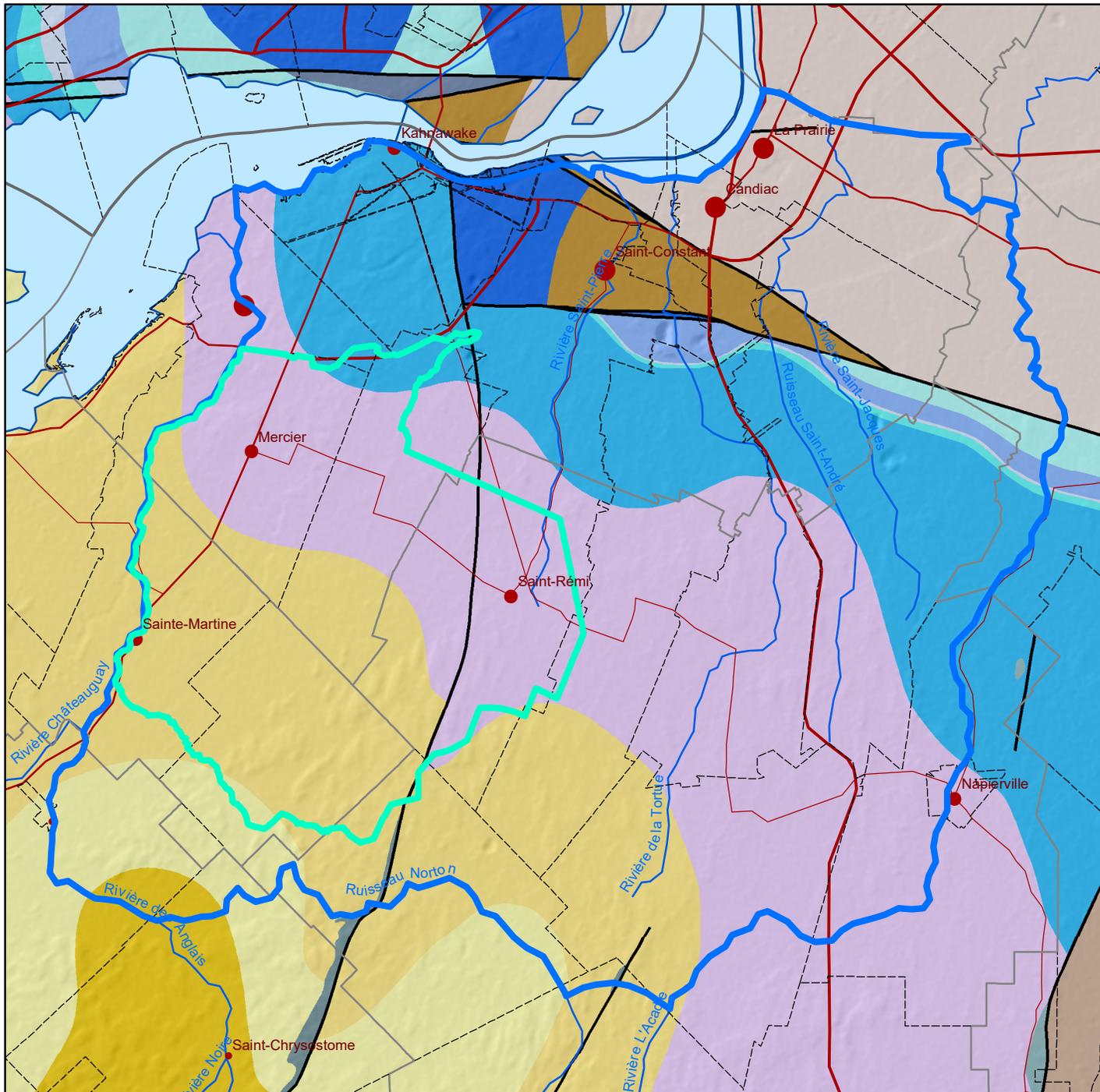
Modèle numérique d'élévation simplifié (m/NMM)

- Ligne de contour (intervalle de 5 m)

Notes :



Carte 5 Géologie du roc



Limites

-  Secteur d'évaluation de l'usage
-  Modèle d'écoulement de Mercier

Ordovicien supérieur

-  Formation de Nicolet
Shale gris avec interlits de grès, silstone et calcaire
-  Shale d'Utica
Shale gris foncé à noir, calcaireux, avec interlits de calcaire argileux
-  Brèche de Havelock
Brèche à fragments de grès dolomitique, de grès quartzitique, de dolomie et de calcaire
-  Formation de Tétréauville
Calcaire argileux nodulaire gris foncé avec interlits de shale calcaireux
-  Membre de Rosemont
Calcaire argileux ; quelques interlits de shale calcaireux
-  Membre de Saint-Michel
Calcarénite ; quelques interlits de shale calcaireux
-  Formation de Deschambault
Calcarénite fossilifère
-  Groupe de Black River
Calcaire, dolomie et grès avec minces interlits de shale

Ordovicien moyen

-  Formation de Laval
Calcarénite ; calcaire argileux, dolomie, grès gris vert et shale

Ordovicien inférieur

-  Formation de Beauharnois
Dolomie, grès dolomitique, shale dolomitique et calcaire fossilifère
-  Formation de Theresa
Grès dolomitique, grès quartzitique et dolomie

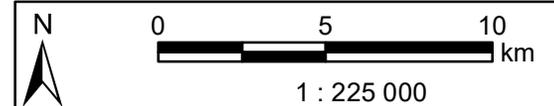
Cambrien

-  Formation de Cairnside
Grès quartzitique
-  Formation de Covey Hill
Conglomérat et grès feldspathique

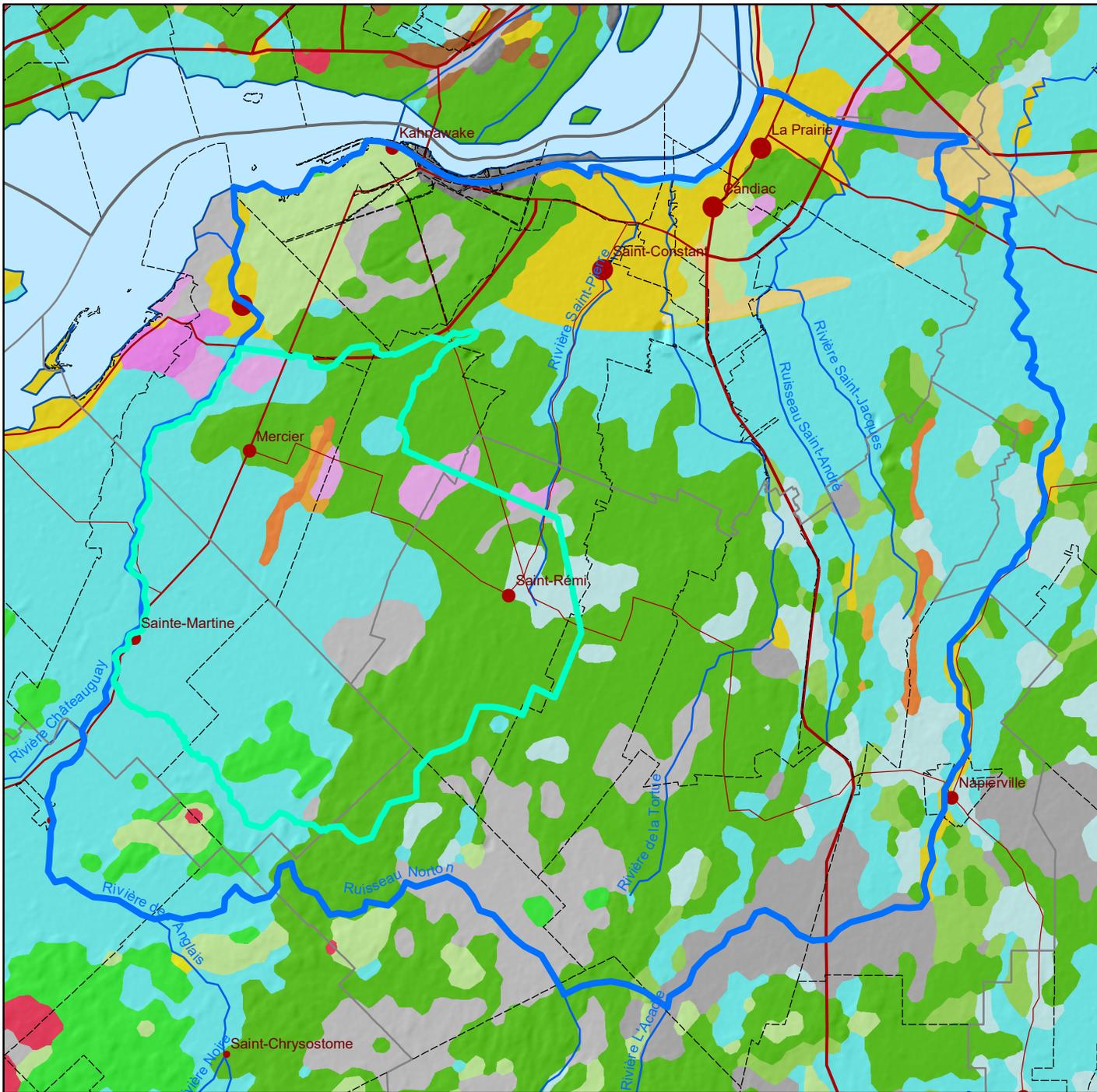
Faïlle et cisaillement régional

-  Faïlle régionale

Source : SIGÉOM (2020).



Carte 6 Géologie des dépôts quaternaires



Limites

- Secteur d'évaluation de l'usage
- Modèle d'écoulement de Mercier

Sédiments organiques

- Sédiments de marécage et de marais
- Sédiments organiques non différenciés

Sédiments alluviaux

- Alluvions actuelles
- Alluvions des terrasses fluviales
- Alluvions des terrasses fluviales anciennes

Sédiments lacustres

- Sédiments littoraux et pré-littoraux

Sédiments marins

- Sédiments littoraux et pré-littoraux
- Sédiments fins d'eau profonde

Sédiments fluvioglaciaires

- Sédiments juxtaglaciaires
- Sédiments proglaciaires non différenciés

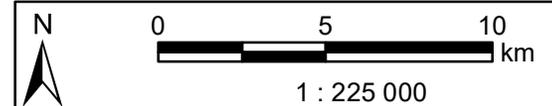
Sédiments glaciaires

- Till remanié en couverture continue
- Till en couverture généralement continue
- Till en couverture mince et discontinue
- Till non différencié

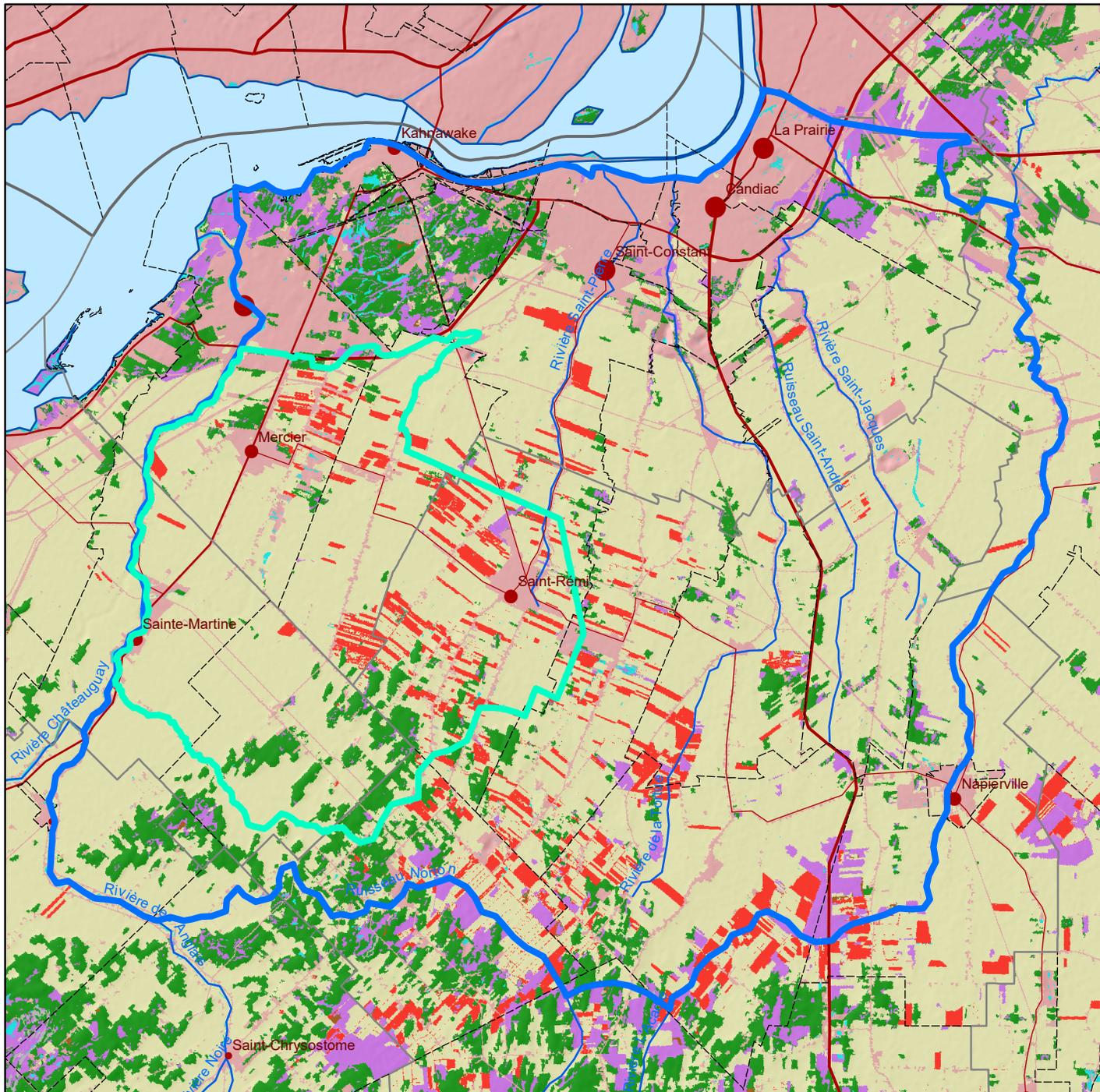
Substrat rocheux

- Roches sédimentaires ou volcaniques (non déformées)

Source : Parent et al. (2017).



Carte 7
Utilisation du sol pour l'année 2017



Limites

Secteur d'évaluation de l'usage

Modèle d'écoulement de Mercier

Catégories générales d'occupation du sol

Agricole

Forestier

Humide

Aquatique

Anthropique

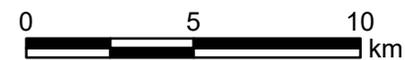
Coupe et régénération

Sol nu et lande

Culture agricole d'intérêt

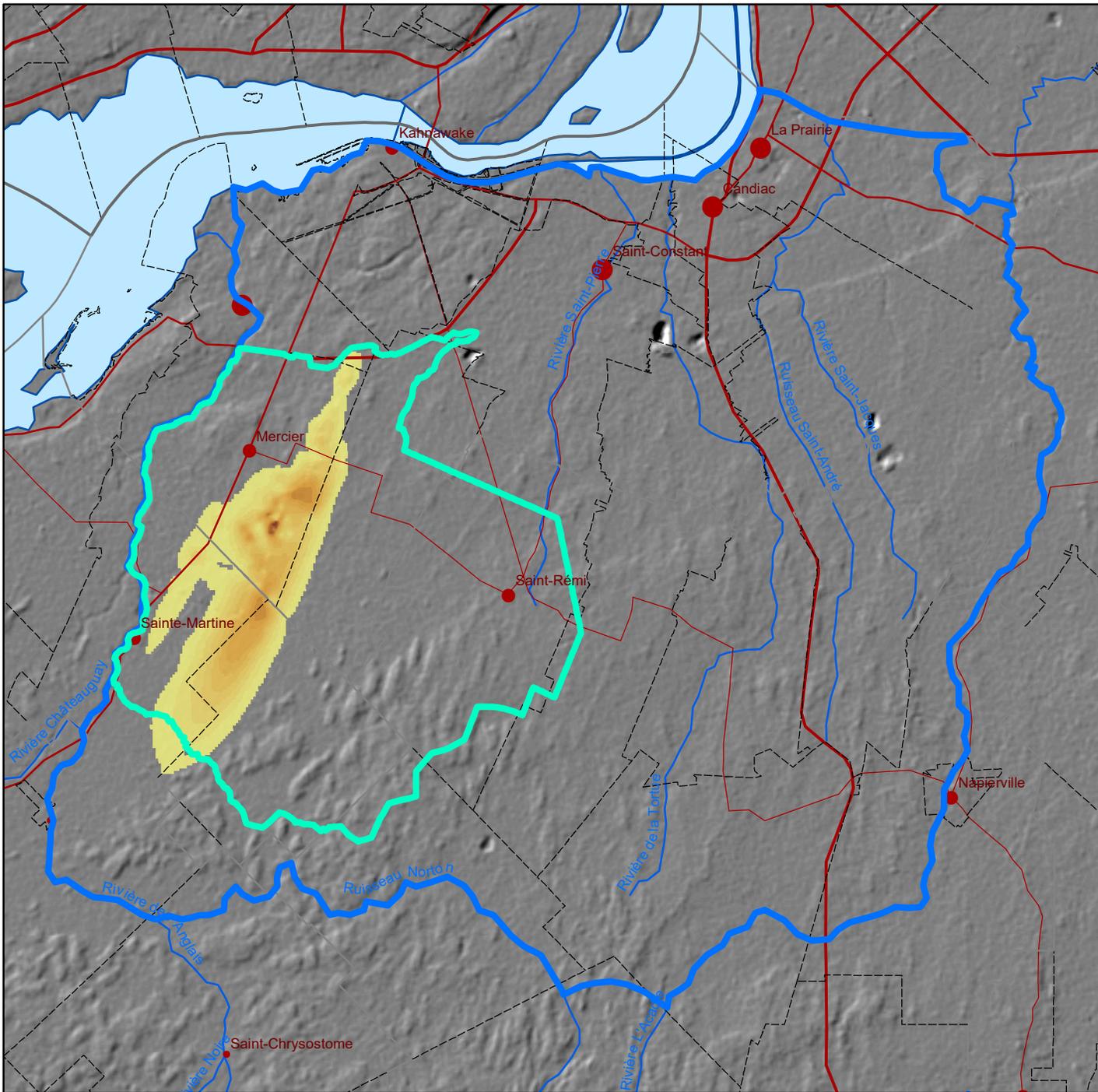
Maraîcher

Source : MELCC (2020).



1 : 225 000

Carte 10
Épaisseur de l'unité fluvioglacière (esker)



Limites

- Secteur d'évaluation de l'usage
- Modèle d'écoulement de Mercier

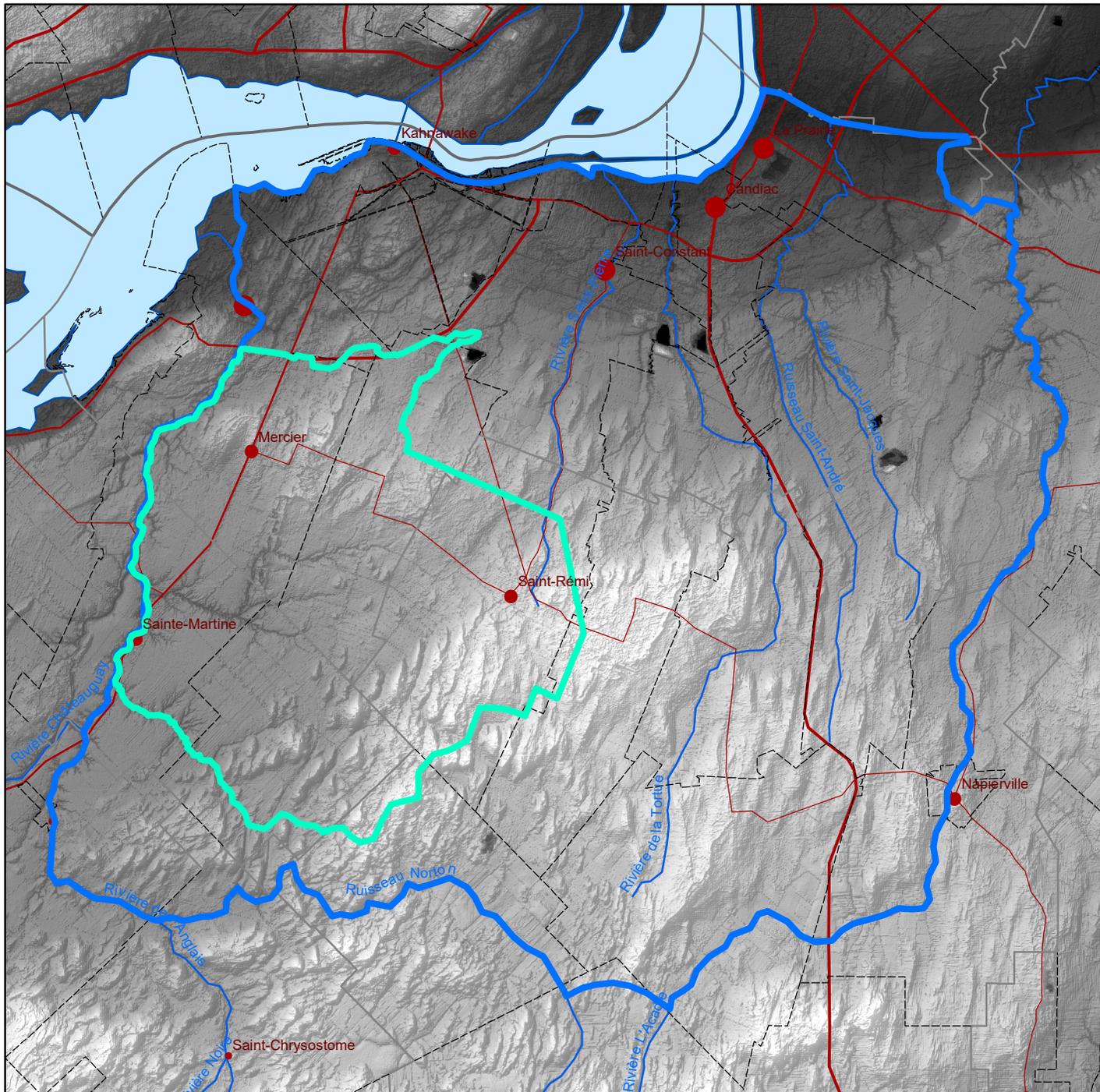
Épaisseur de l'unité fluvioglacière (m)

- 0 - 2
- 2 - 4
- 4 - 6
- 6 - 8
- 8 - 10
- 10 - 12
- 12 - 14
- 14 - 16
- 16 - 18
- 18 - 20
- 20 - 22
- 22 - 24
- 24 - 26
- 26 - 28
- > 28

Notes : L'extension en profondeur et les épaisseurs des sédiments associés à l'esker de la rivière Saint-Jacques visible sur la carte 6 restent à définir.



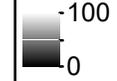
Carte 12
Relief de la région d'étude



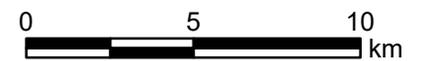
Limites

-  Secteur d'évaluation de l'usage
-  Modèle d'écoulement de Mercier

Élévation (m/AMN)

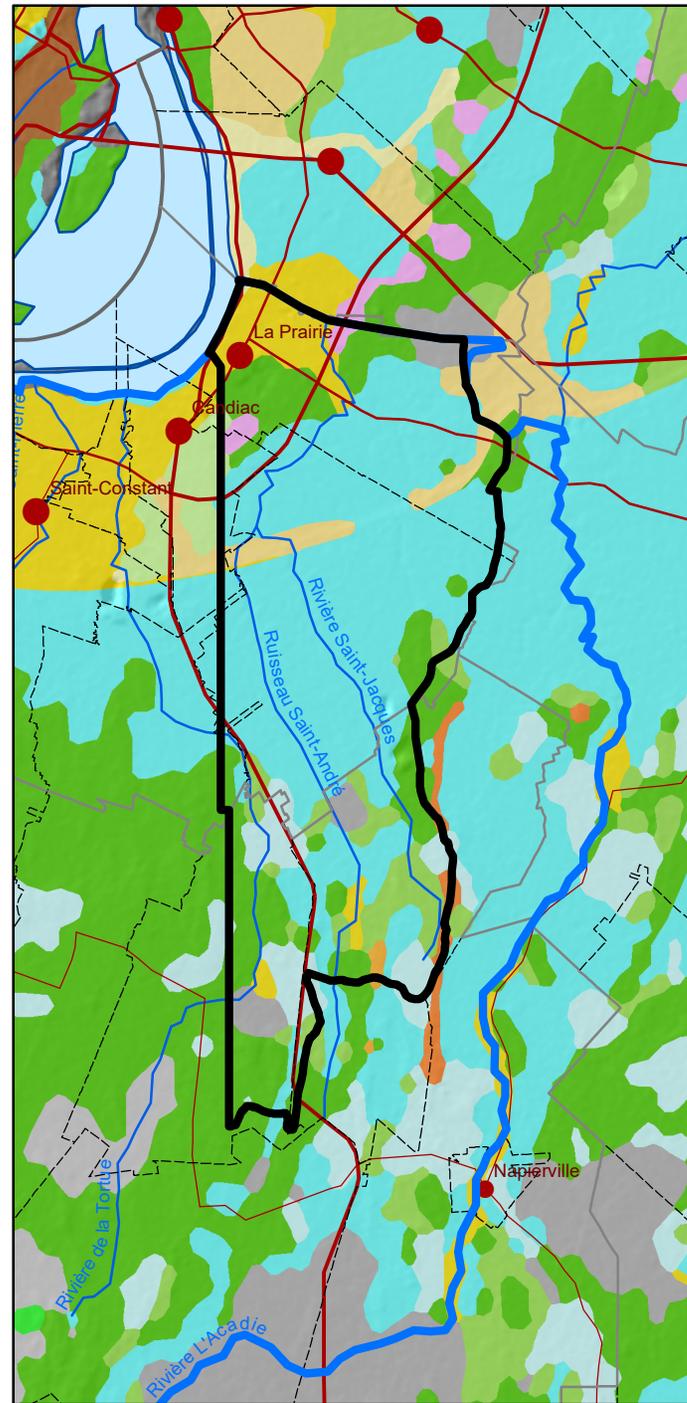
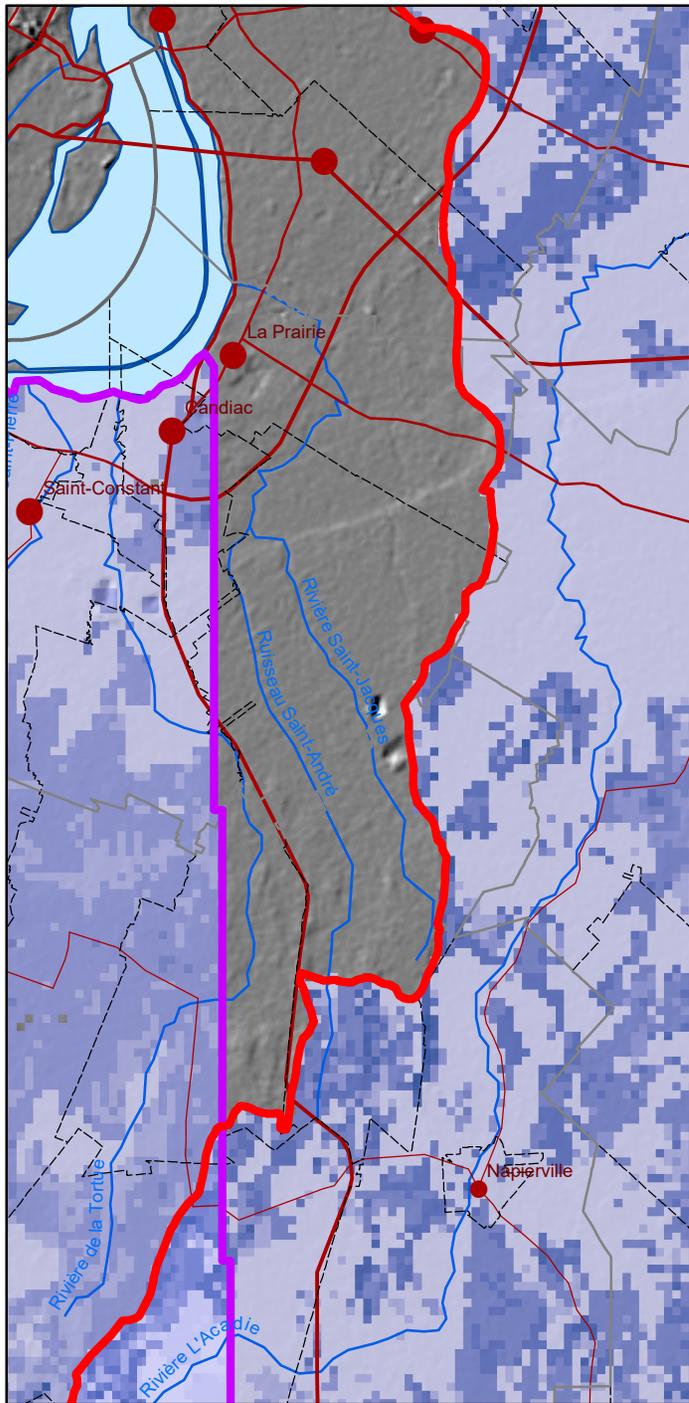


Notes : Le relief a été défini par le modèle numérique d'élévation basé sur les levés par LiDAR.



1 : 225 000

Carte 13
Données dans la zone sans estimation de la recharge



Limites

- Secteur d'évaluation de l'usage
- Zone sans données de recharge
- Limites du PACES Montérégie Est
- Limites du projet Châteauguay

Recharge moyenne annuelle (mm/an)

- < 50
- 50 - 100
- 100 - 150
- 150 - 200
- 200 - 250
- 250 - 300
- 300 - 350
- 350 - 400
- > 400

Sédiments organiques

- Sédiments de marécage et de marais
- Sédiments organiques non différenciés

Sédiments alluviaux

- Alluvions actuelles
- Alluvions des terrasses fluviales
- Alluvions des terrasses fluviales anciennes

Sédiments lacustres

- Sédiments littoraux et pré-littoraux

Sédiments marins

- Sédiments littoraux et pré-littoraux
- Sédiments fins d'eau profonde

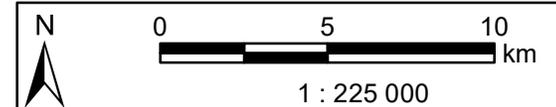
Sédiments fluvio-glaciaires

- Sédiments juxtaglaciaires
- Sédiments proglaciaires non différenciés

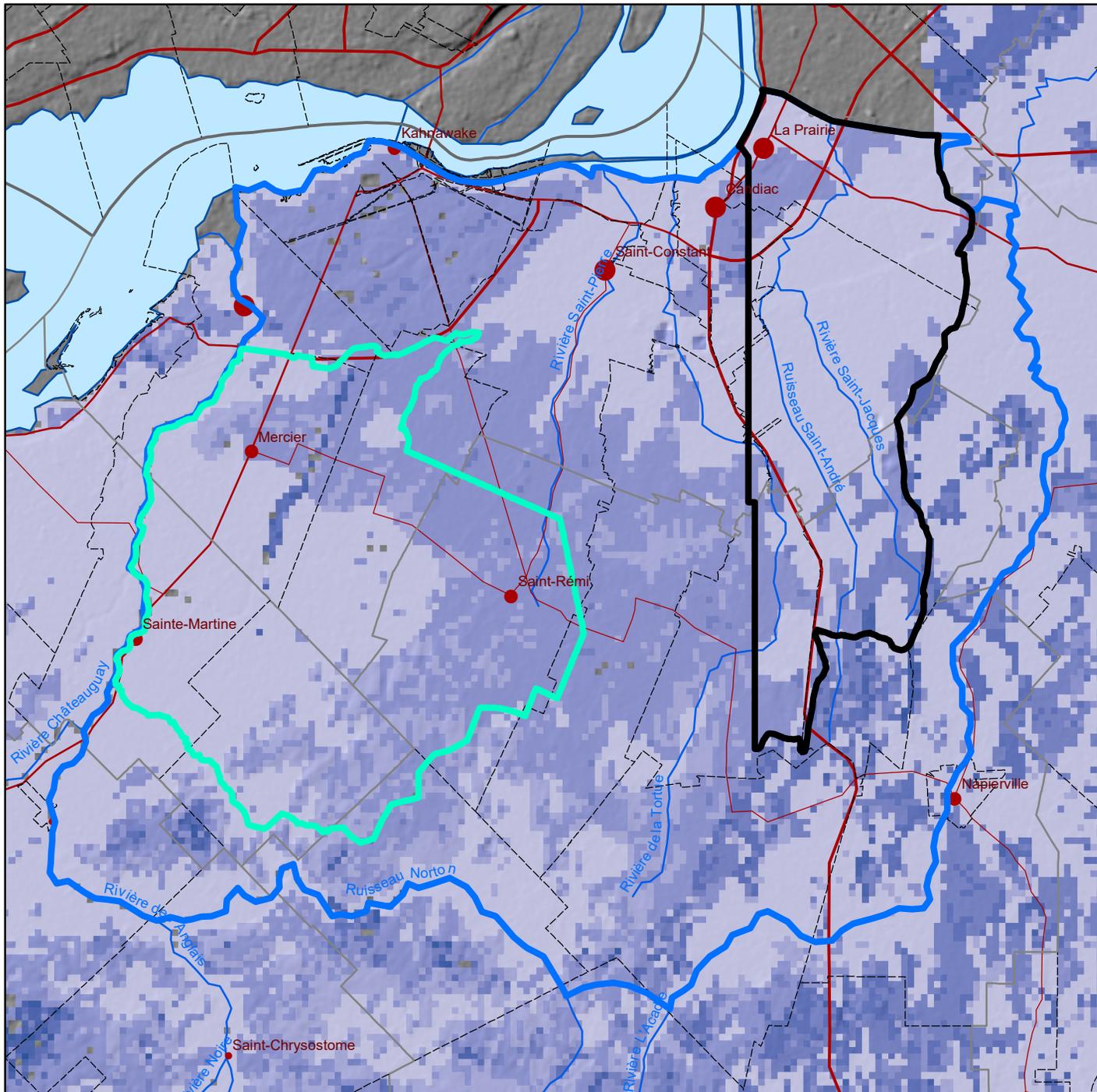
Sédiments glaciaires

- Till remanié en couverture continue
- Till en couverture généralement continue
- Till en couverture mince et discontinue
- Till non différencié

Notes : Données d'entrée utilisées pour combler la zone sans données de recharge (polygone noir sur la carte de droite) : (gauche) recharge du projet Châteauguay (polygone violet) extraite de Croteau (2006) et du PACES Montérégie Est (polygone rouge) extraite de Carrier et al. (2013) et, (droite) géologie des dépôts quaternaires (Parent et al. 2017).



Carte 14
Recharge de l'aquifère rocheux



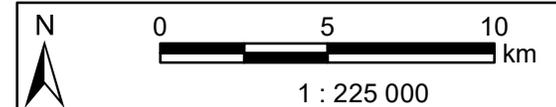
Limites

-  Secteur d'évaluation de l'usage
-  Modèle d'écoulement de Mercier
-  Zone sans données de recharge

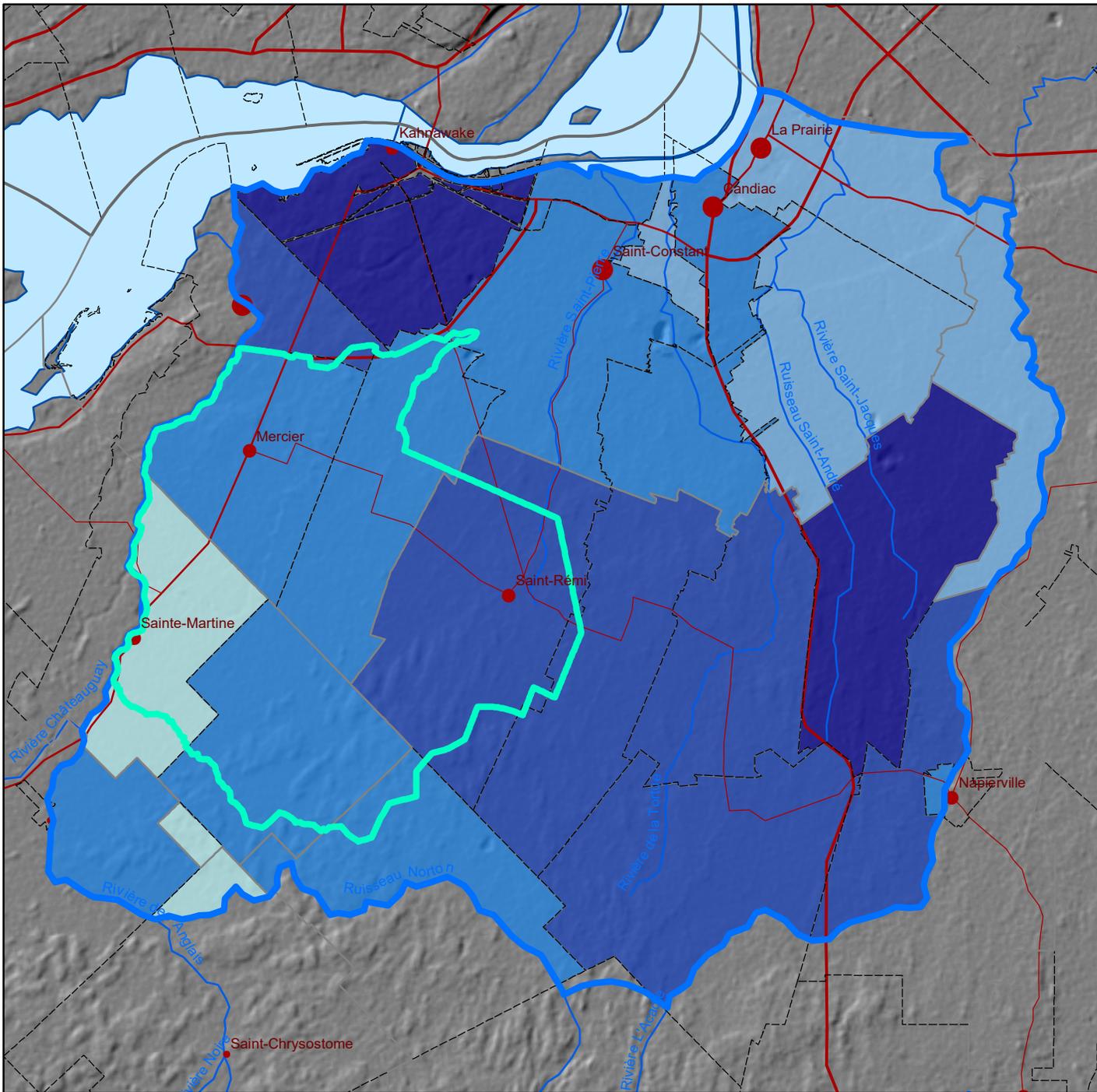
Recharge moyenne annuelle (mm/an)

-  < 50
-  50 - 100
-  100 - 150
-  150 - 200
-  200 - 250
-  250 - 300
-  300 - 350
-  350 - 400
-  > 400

Notes : L'estimation de la recharge a été obtenue de travaux antérieurs : Croteau (2006) dans la partie ouest et Carrier et al. (2013) dans la partie est. Les valeurs médianes de recharge des dépôts meubles ont été utilisées dans le polygone noir où il n'y a pas eu de travaux antérieurs.



Carte 15
Recharge moyenne (mm/an)
par municipalité



Limites

-  Secteur d'évaluation de l'usage
-  Modèle d'écoulement de Mercier

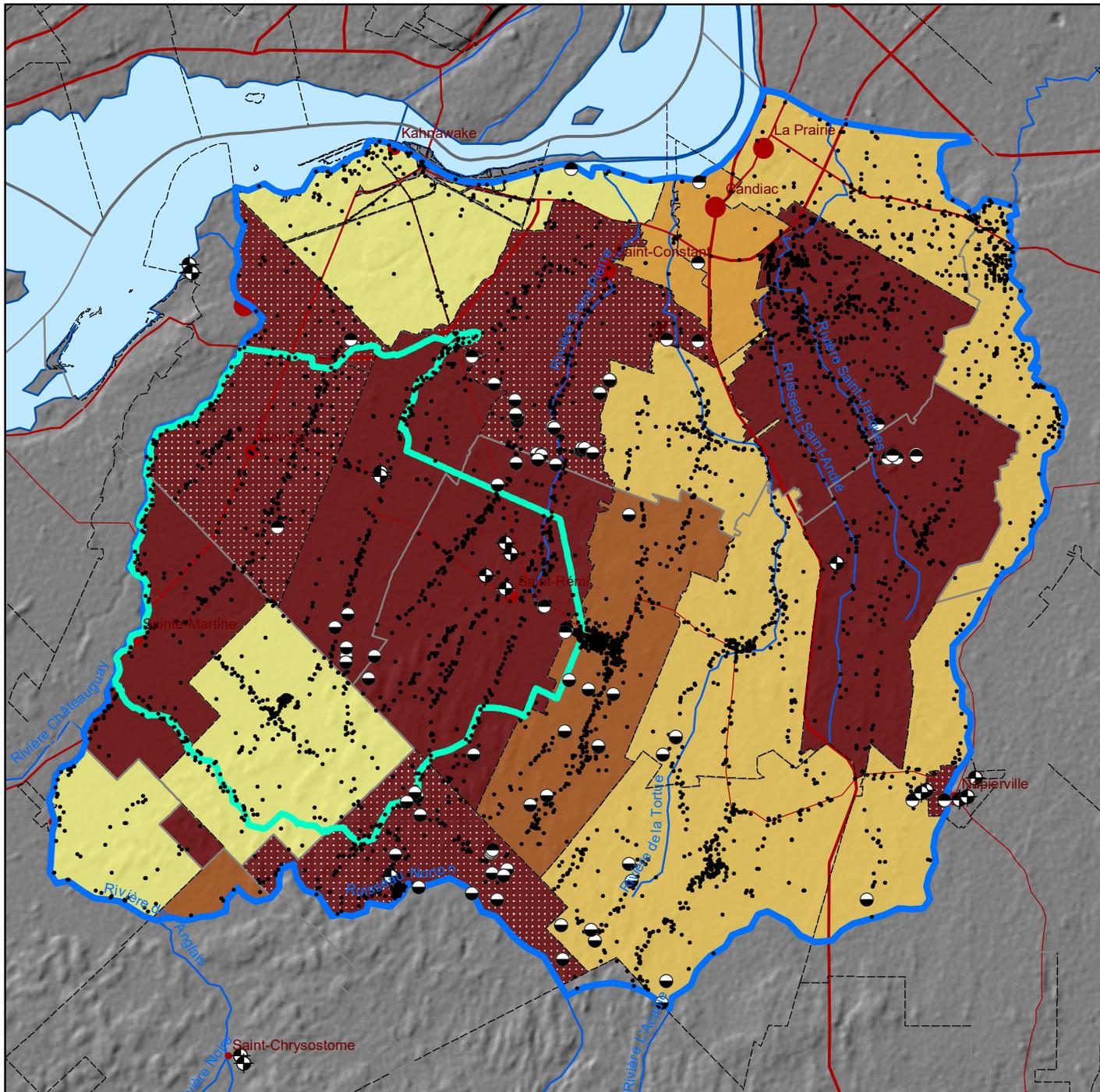
Recharge (mm/an)

-  < 25
-  25 - 50
-  50 - 75
-  75 - 100
-  > 100

Notes :



Carte 18
Prélèvements (%) par rapport
à la recharge par municipalité



Limites

- Secteur d'évaluation de l'usage
- Modèle d'écoulement de Mercier

Captages d'eau souterraine

- Puits municipaux
- GPE - Agricoles
- GPE - Autres
- Puits privés

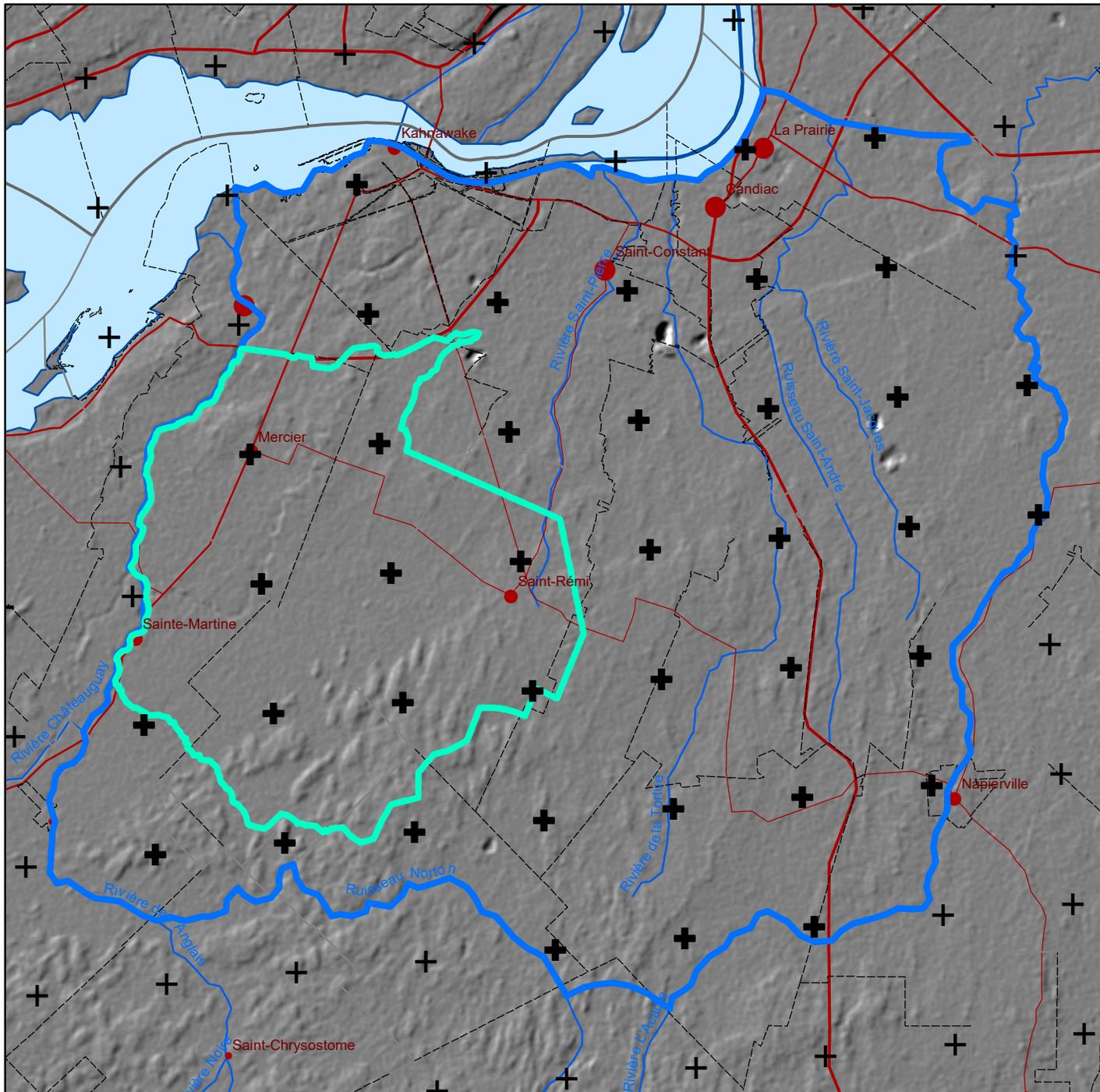
Prélèvement d'eau souterraine / Recharge (%)

- < 5
- 5 - 10
- 10 - 15
- 15 - 20
- 20 - 40
- > 40

Notes : La carte montre aussi la localisation des puits privés, des puits municipaux et des grands préleveurs d'eau (GPE) exploitant l'eau souterraine.



Carte 19
Centroides des mailles de la
grille de recharge potentielle



Limites

 Secteur d'évaluation de l'usage

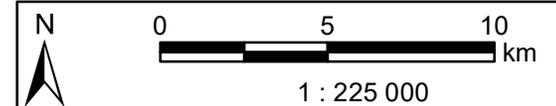
 Modèle d'écoulement de Mercier

Grille (mailles de 5 x 5 km) de la recharge potentielle (HGS - UL)

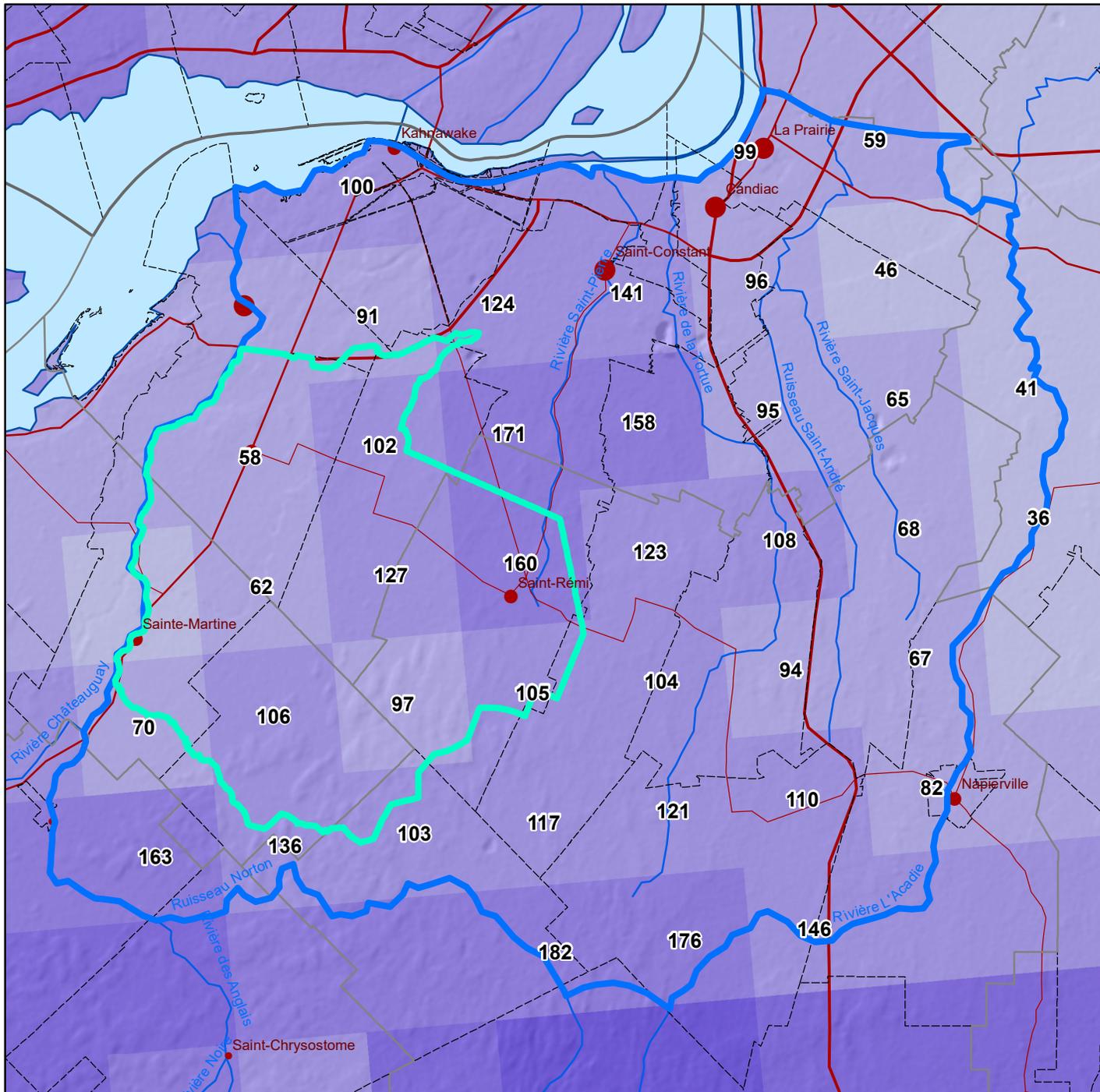
 Mailles incluses dans la zone d'étude

 Autres mailles

Source des données : Université Laval (communication personnelle d'Hugo Delottier).



Carte 20
Grille de recharge potentielle pour
la période de référence (1981-2010)



Limites

-  Secteur d'évaluation de l'usage
-  Modèle d'écoulement de Mercier

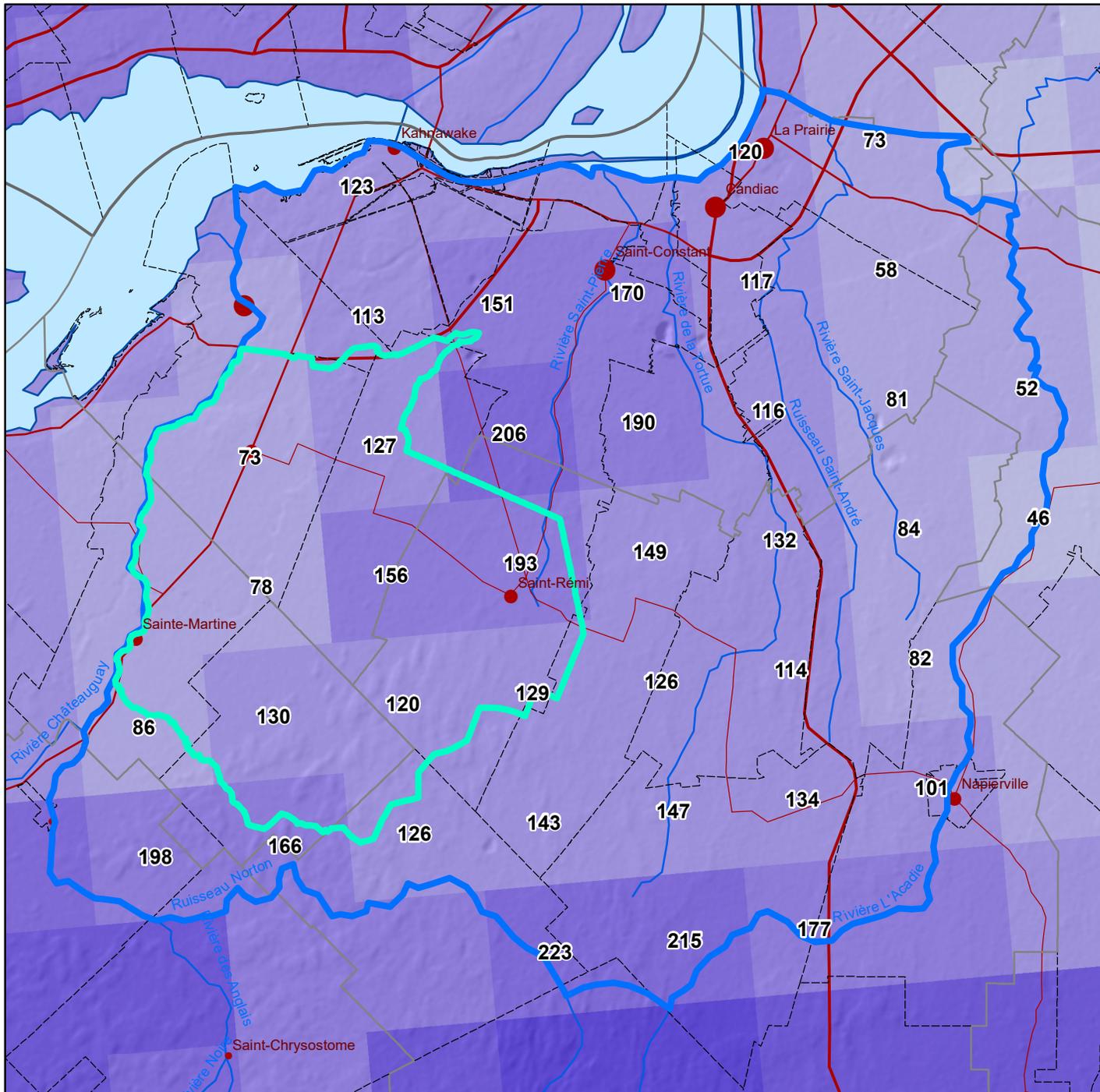
Recharge potentielle annuelle (mm/an) - 1981-2010 (référence) - HGS (UL)

-  < 50
-  50 - 100
-  100 - 150
-  150 - 200
-  200 - 250
-  250 - 300
-  300 - 350
-  350 - 400
-  > 400

Source des données : Université Laval (communication personnelle d'Hugo Delottier).



Carte 21
Grille de recharge potentielle pour
le milieu du siècle (2041-2070)



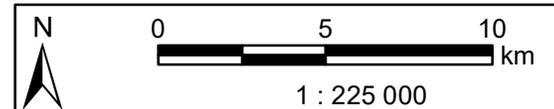
Limites

-  Secteur d'évaluation de l'usage
-  Modèle d'écoulement de Mercier

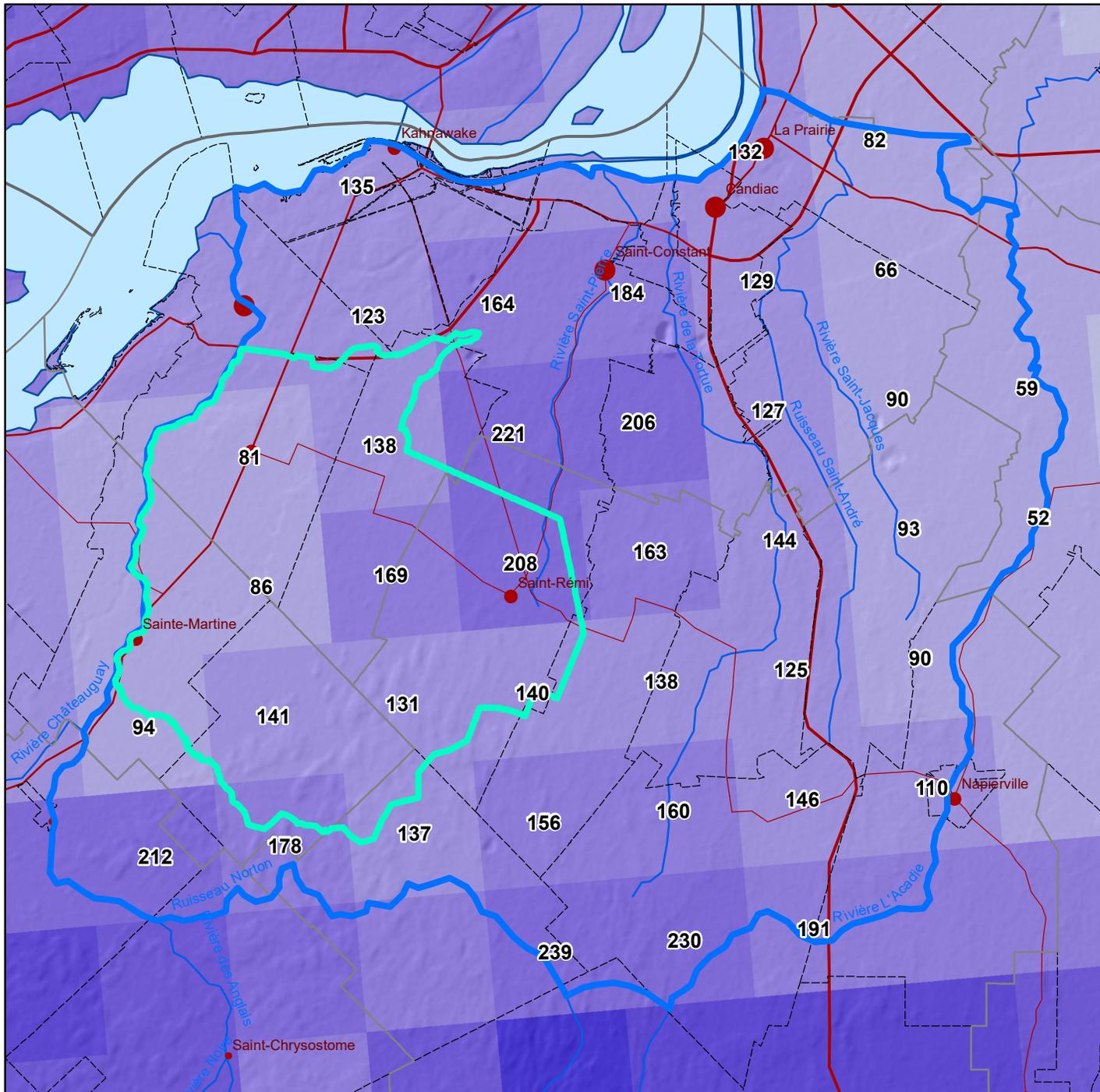
Recharge potentielle annuelle (mm/an) - 2041-2070 (milieu du siècle) - HGS (UL)

-  < 50
-  50 - 100
-  100 - 150
-  150 - 200
-  200 - 250
-  250 - 300
-  300 - 350
-  350 - 400
-  > 400

Source des données : Université Laval (communication personnelle d'Hugo Delottier).



Carte 22
Grille de recharge potentielle pour
la fin du siècle (2071-2095)



Limites

Secteur d'évaluation de l'usage

Modèle d'écoulement de Mercier

Recharge potentielle annuelle (mm/an) - 2071-2095 (fin du siècle) - HGS (UL)

< 50

50 - 100

100 - 150

150 - 200

200 - 250

250 - 300

300 - 350

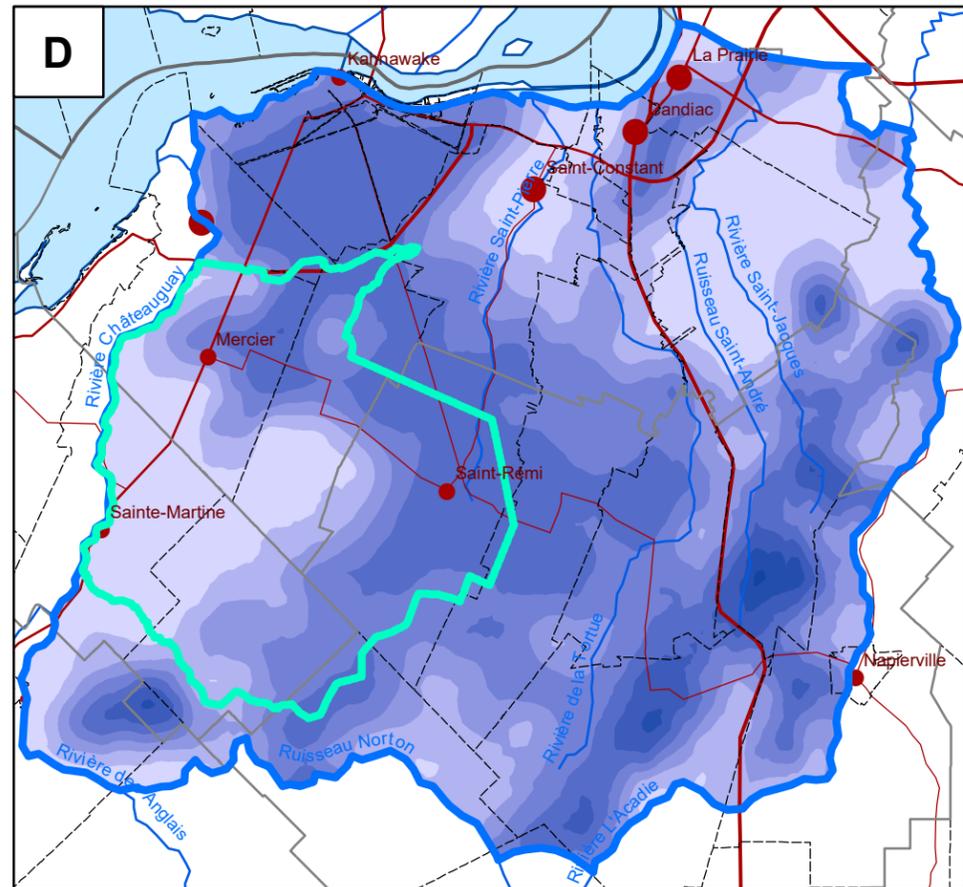
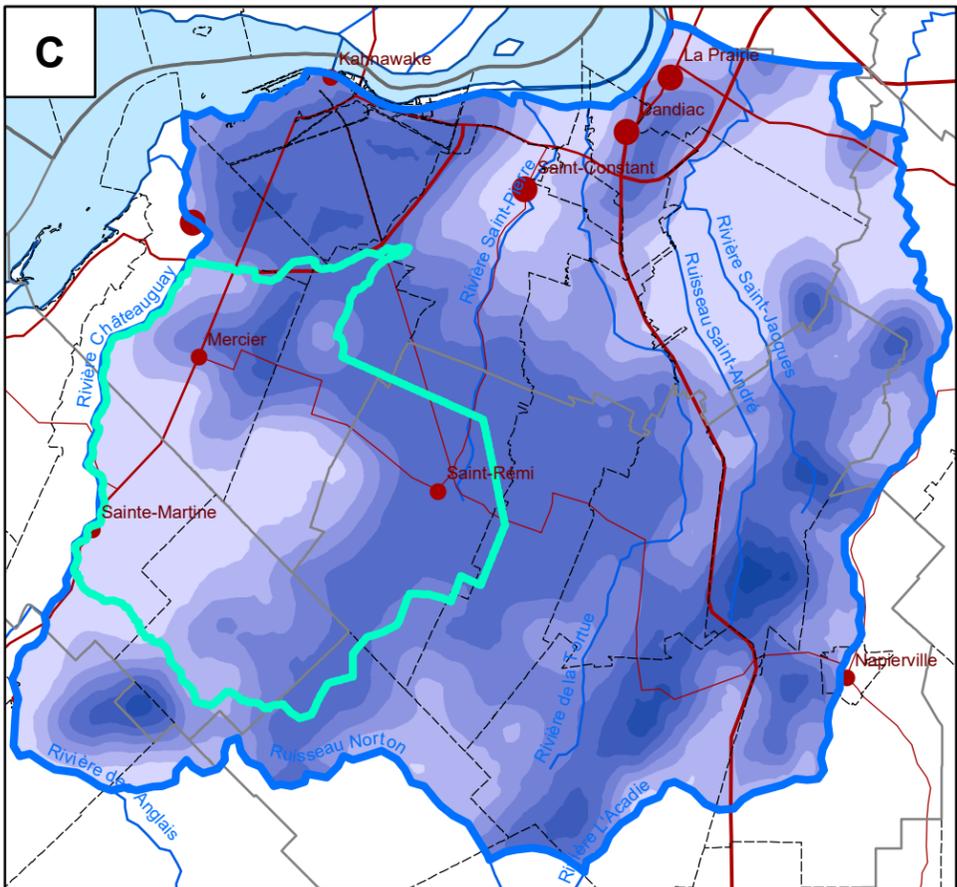
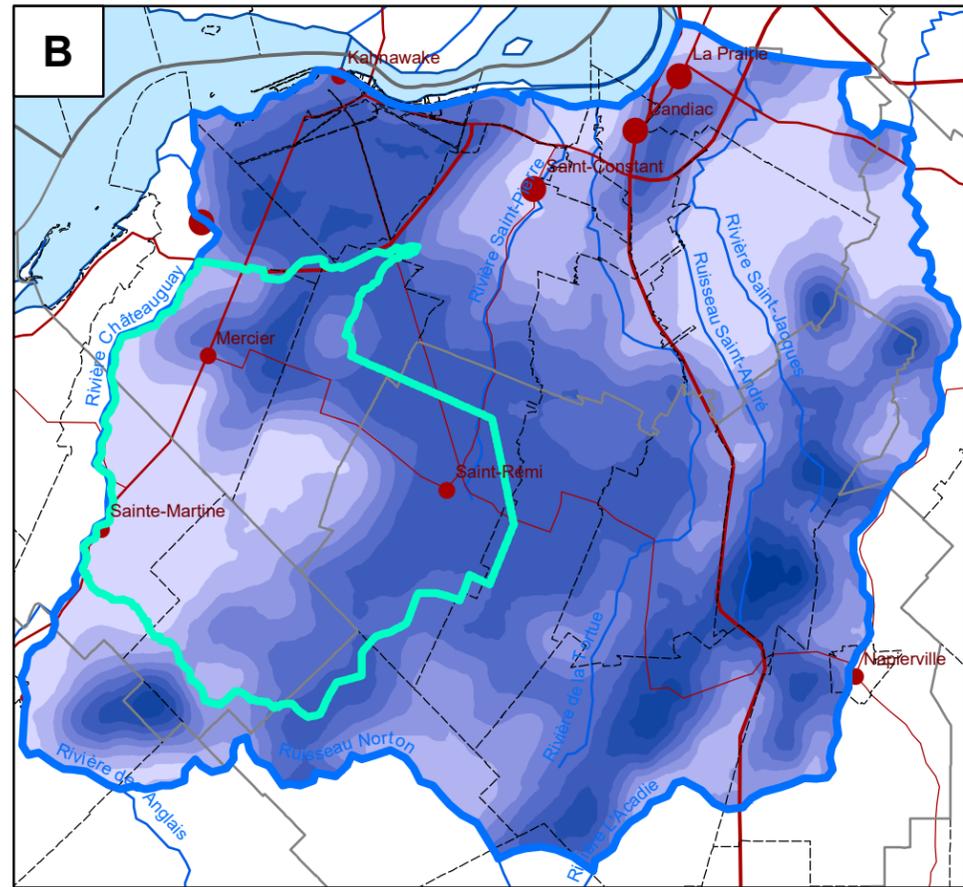
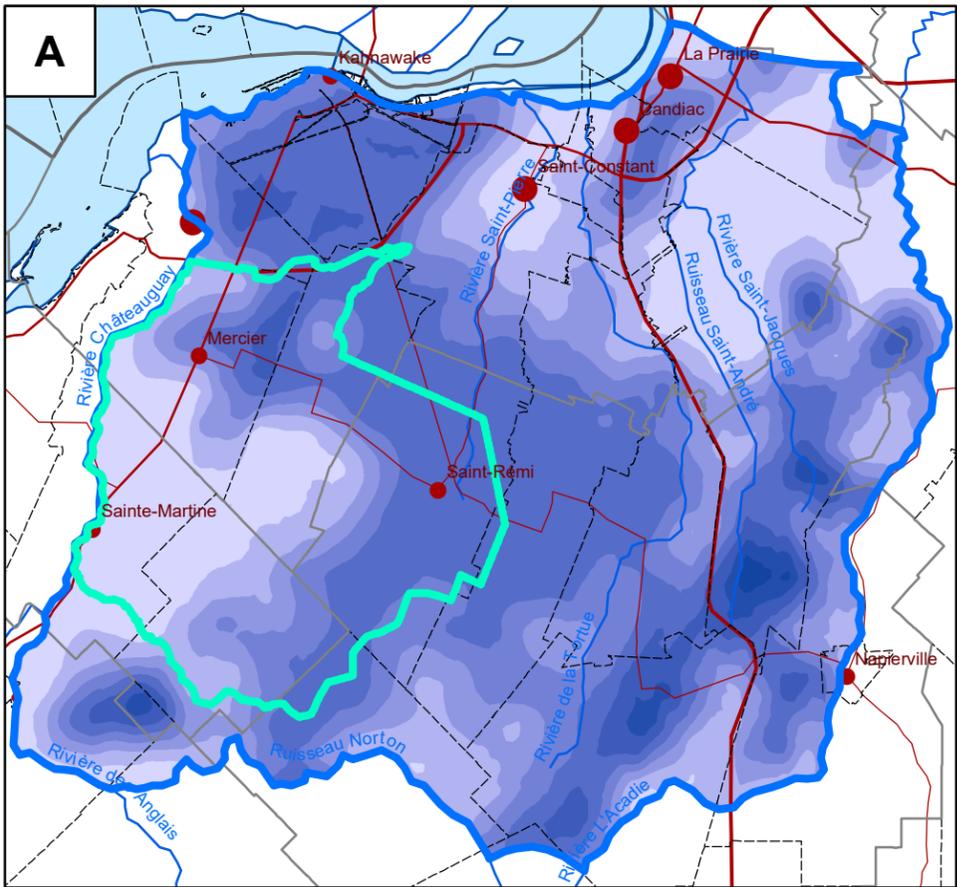
350 - 400

> 400

Source des données : Université Laval (communication personnelle d'Hugo Delottier).



1 : 225 000



Carte 23 Distribution spatiale de la recharge présente et en climat futur

Scénario B :
 Recharge actuelle

A	B
C	D

Scénario A :
 Hausse de recharge de + 20 %

Scénario B :
 Recharge stable

Scénario C :
 Baisse de recharge de - 5 %

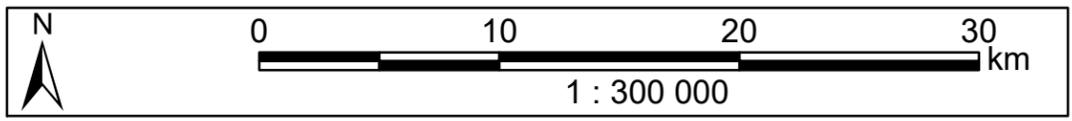
Limites

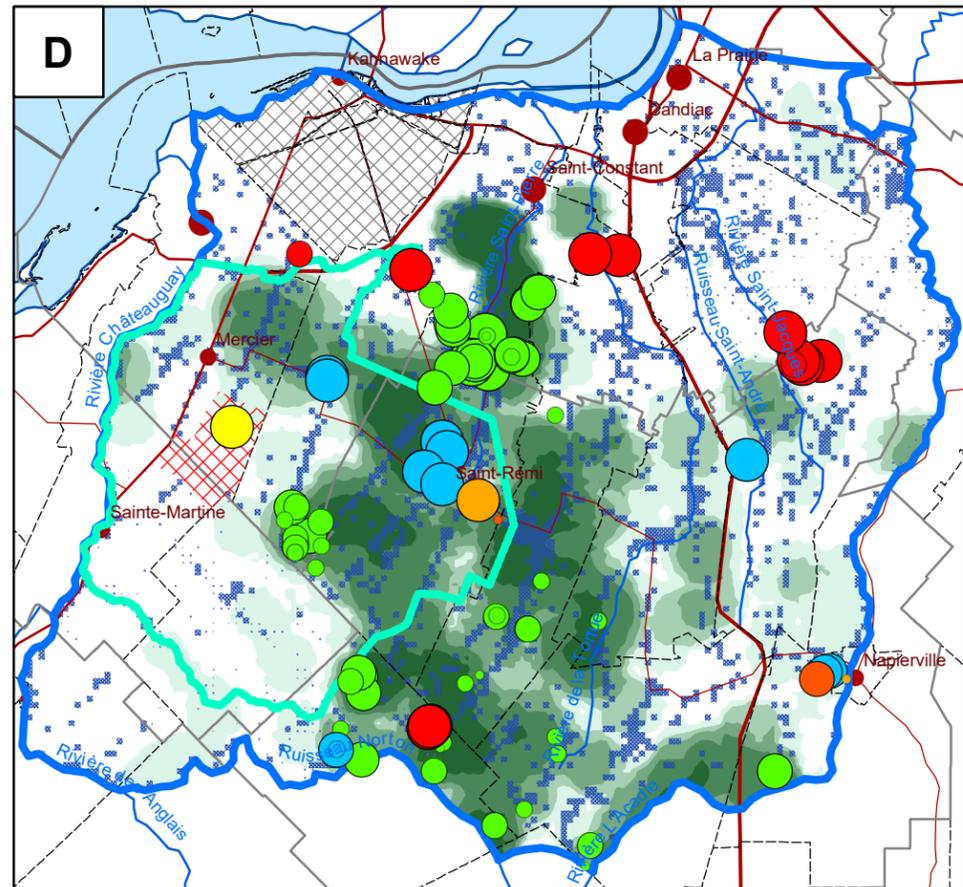
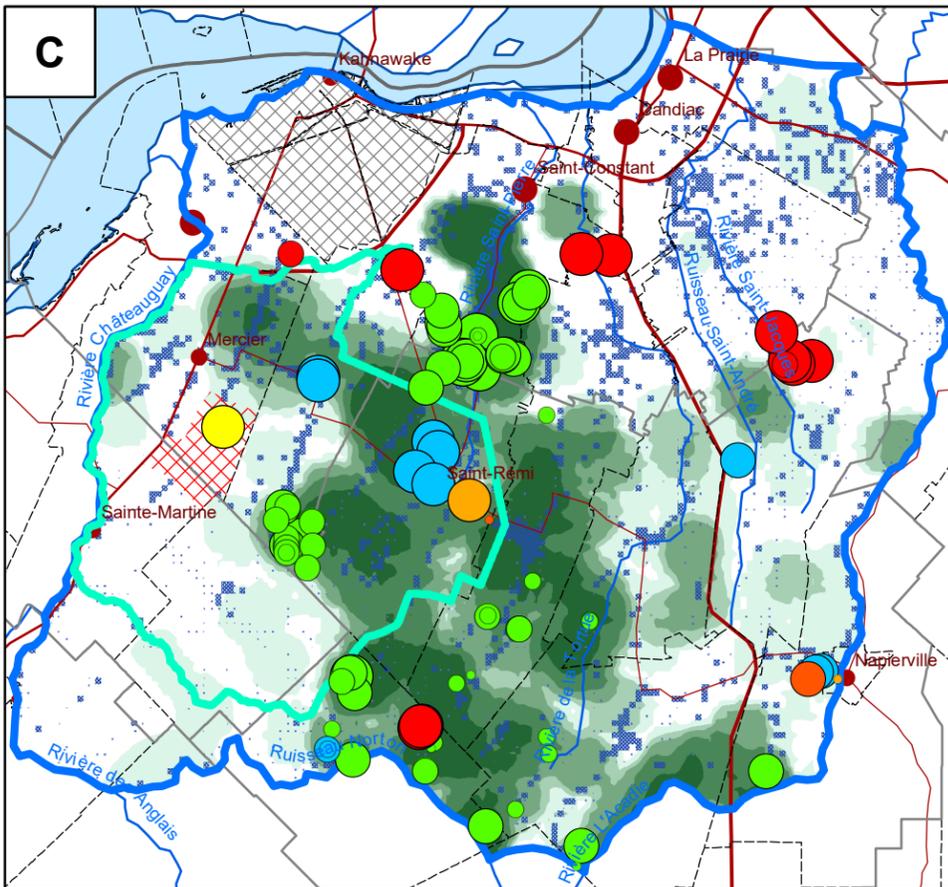
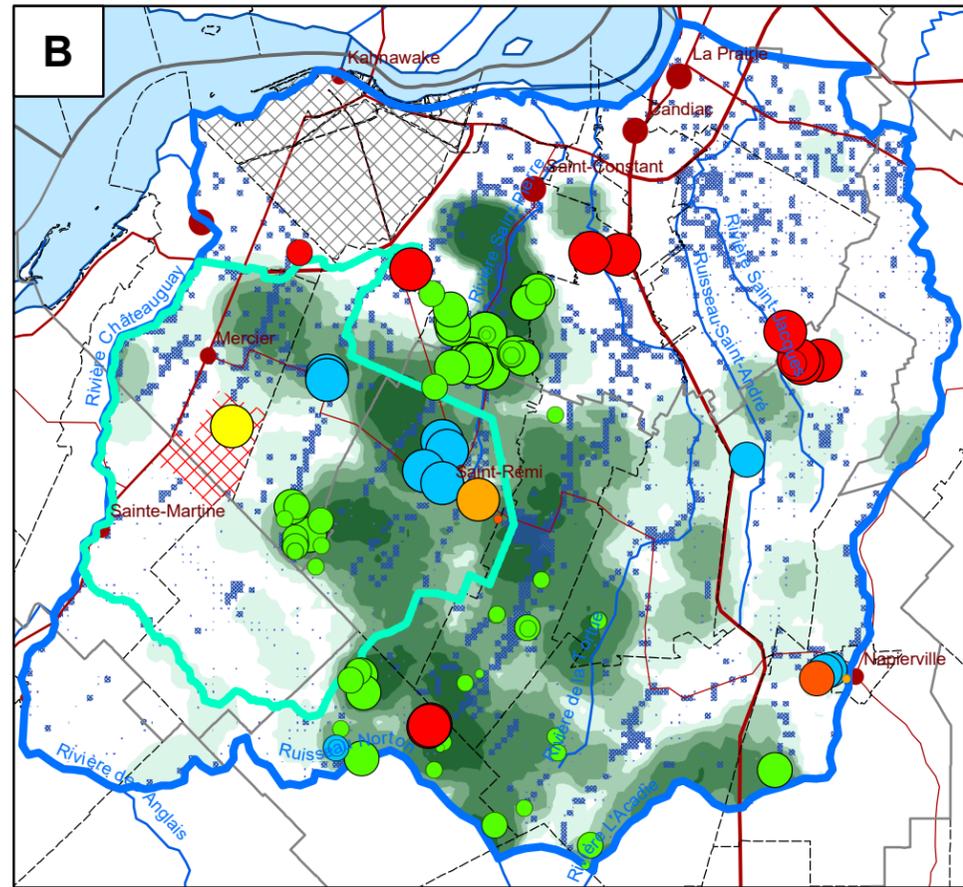
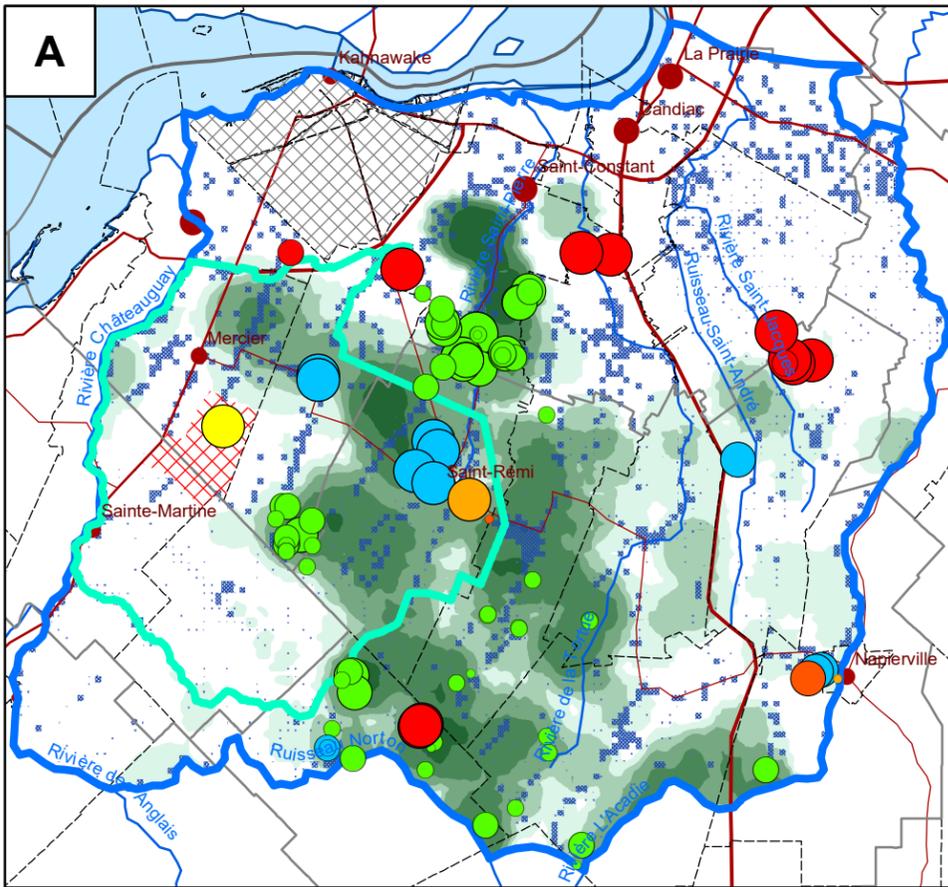
- Secteur d'évaluation de l'usage
- Modèle d'écoulement de Mercier

Recharge moyenne annuelle (m³/an/km²)

- < 25 000
- 25 000 - 50 000
- 50 000 - 75 000
- 75 000 - 100 000
- 100 000 - 125 000
- 125 000 - 150 000
- 150 000 - 175 000
- 175 000 - 200 000
- > 200 000

Notes : Le tableau 10.15 résume les changements considérés pour la recharge en climat futur (augmentation de 20 %, stable, réduction de 5 %).





Carte 24 Distribution spatiale des types d'usage de l'eau souterraine présents et en climat futur

Scénario 0 : Usage actuel	A	B	Scénario 1 : Hausse d'usage (+ 11.3 %)
Scénario 2 : Hausse d'usage (+ 28.0 %)	C	D	Scénario 3 : Hausse d'usage (+ 38.4 %)

Limites

- Secteur d'évaluation de l'usage
- Modèle d'écoulement de Mercier
- Zone d'exclusion de pompage
- Territoire autochtone de Kahnawake

Grand préleveur d'eau souterraine

- ICI - Carrière
- ICI - Golf
- ICI - Autre industrie
- ICI - UTES
- Municipal
- Agricole

Usage annuel maximal (m³/an)

- < 500
- 500 - 10000
- 10000 - 25000
- 25000 - 100000
- > 100000

Usage résidentiel hors-réseau de l'eau souterraine (m³/an/km²)

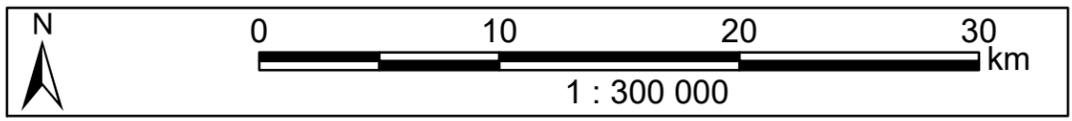
- 500 - 10000
- > 10000

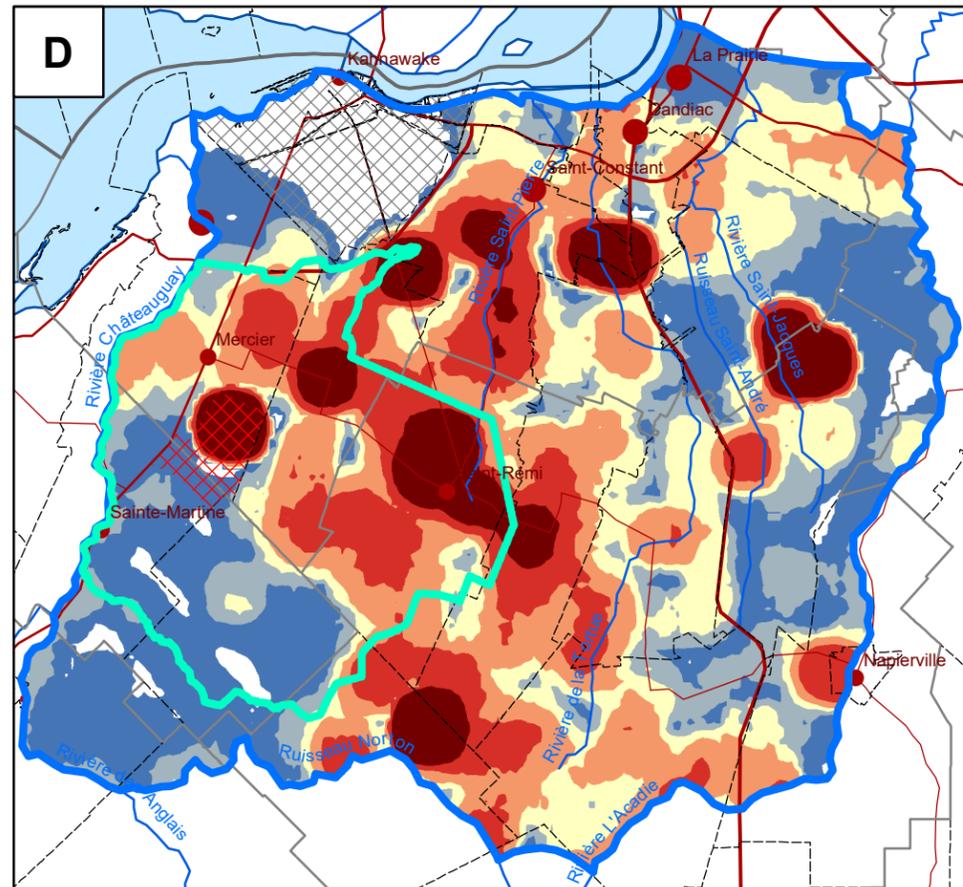
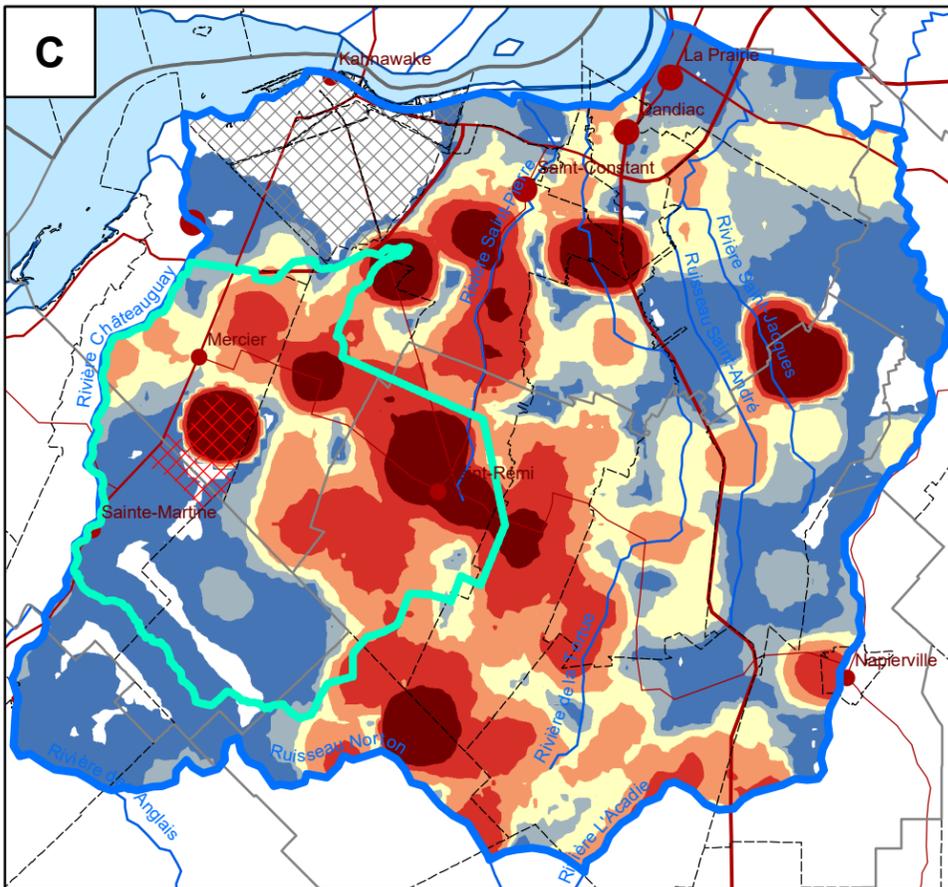
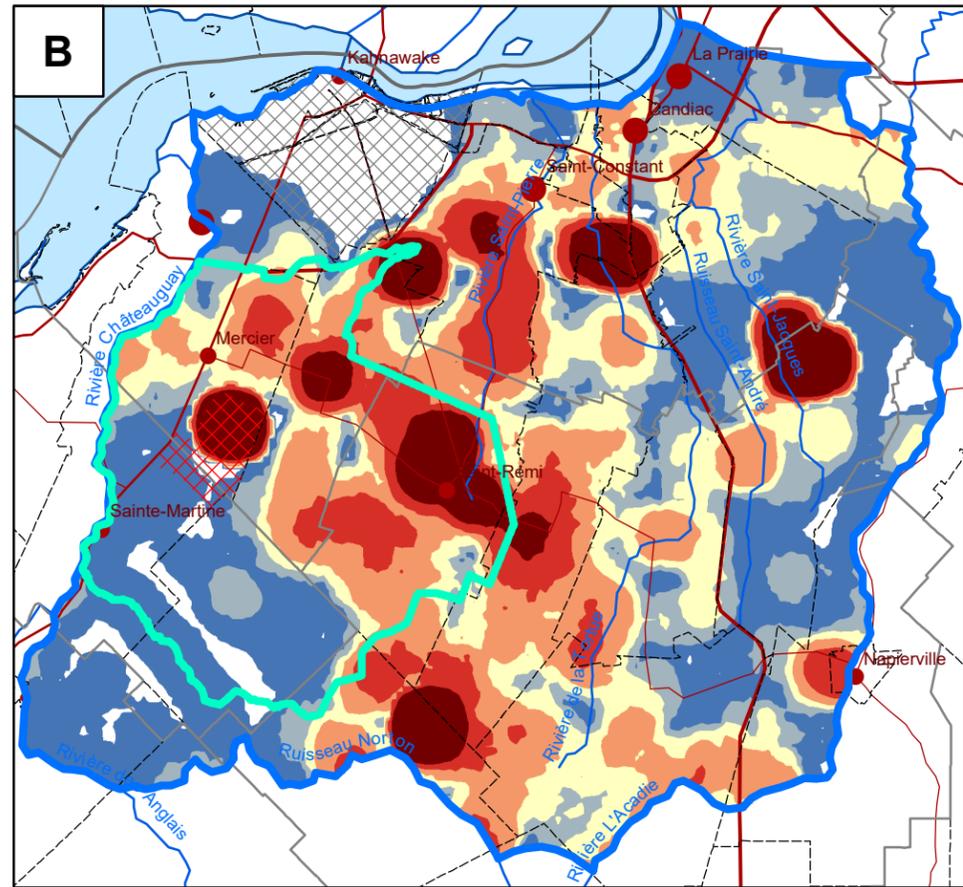
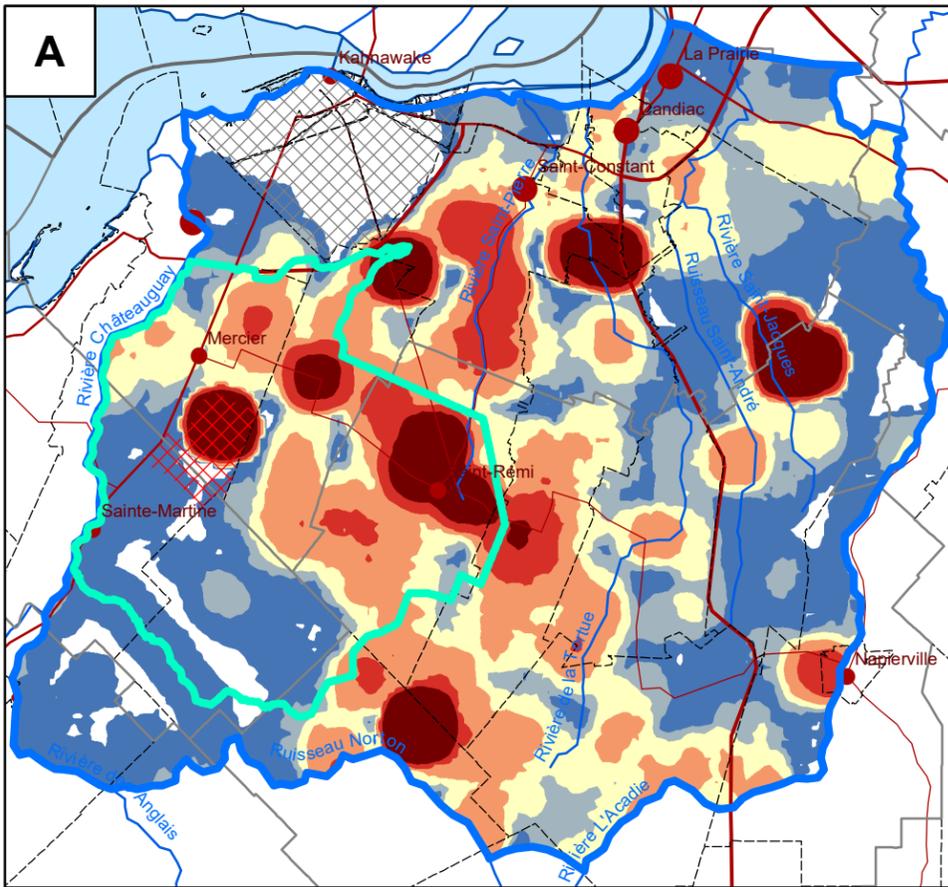
Usage agricole total hors-réseau de l'eau souterraine (m³/an/km²)

- 500 - 2 500
- 2 500 - 5 000
- 5 000 - 10 000
- 10 000 - 20 000
- > 20 000

Compléments : (1) La zone d'exclusion de pompage réfère au périmètre défini dans l'annexe V du RPEP ; (2) Les résidents de Kahnawake sont alimentés par les eaux de surface et aucune donnée d'usage de l'eau souterraine n'y a été répertoriée ; (3) Les secteurs avec un usage inférieur à 500 m³/an/km² ne sont pas affichés.

Notes : Le tableau 10.15 résume les changements globaux considérés pour l'usage en climat futur (augmentations de 11.3%, 28.0% et 38.4%). Le tableau 10.14 montre que les proportions des changements des types d'usages sont différentes pour les trois scénarii en climat futur.





Carte 25 Distribution spatiale de l'usage total d'eau souterraine présent et en climat futur

Scénario 0 : Usage actuel	A	B	Scénario 1 : Hausse d'usage (+ 11.3 %)
Scénario 2 : Hausse d'usage (+ 28.0 %)	C	D	Scénario 3 : Hausse d'usage (+ 38.4 %)

Limites

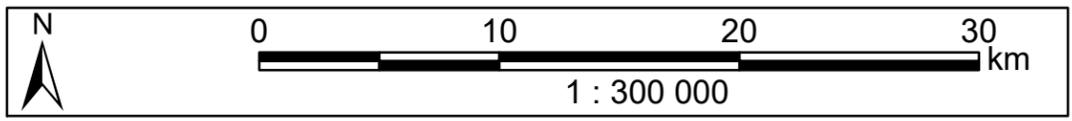
- Secteur d'évaluation de l'usage
- Modèle d'écoulement de Mercier
- Zone d'exclusion de pompage
- Territoire autochtone de Kahnawake

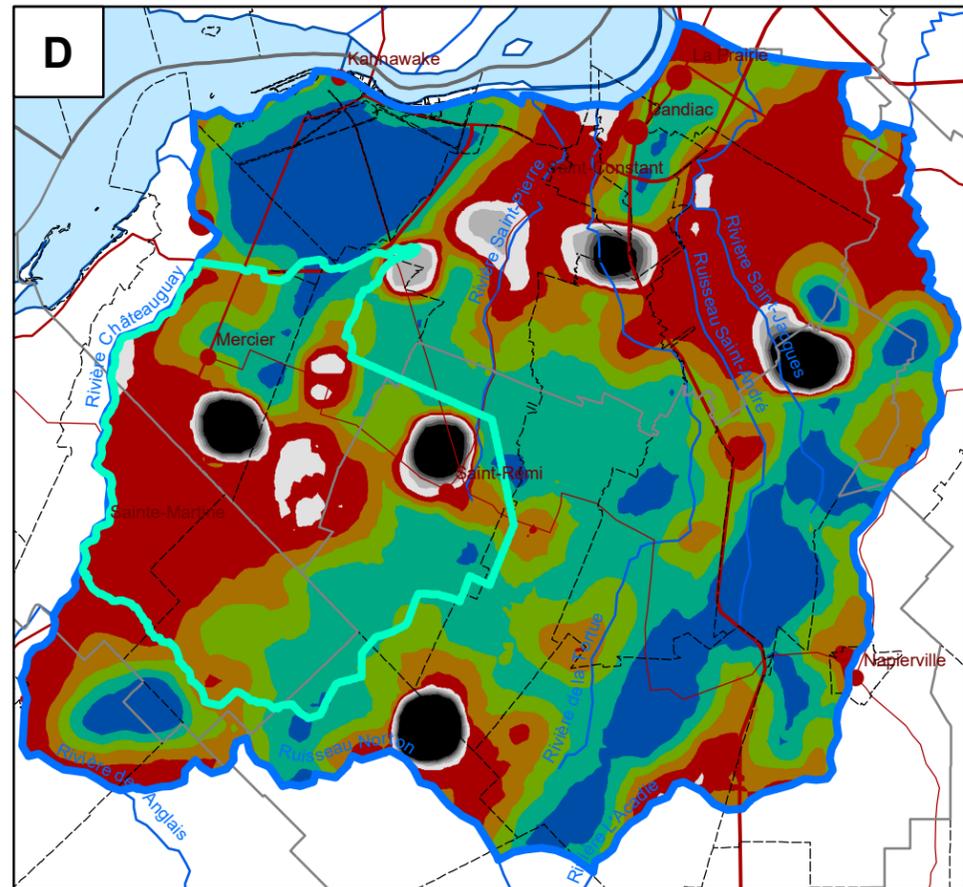
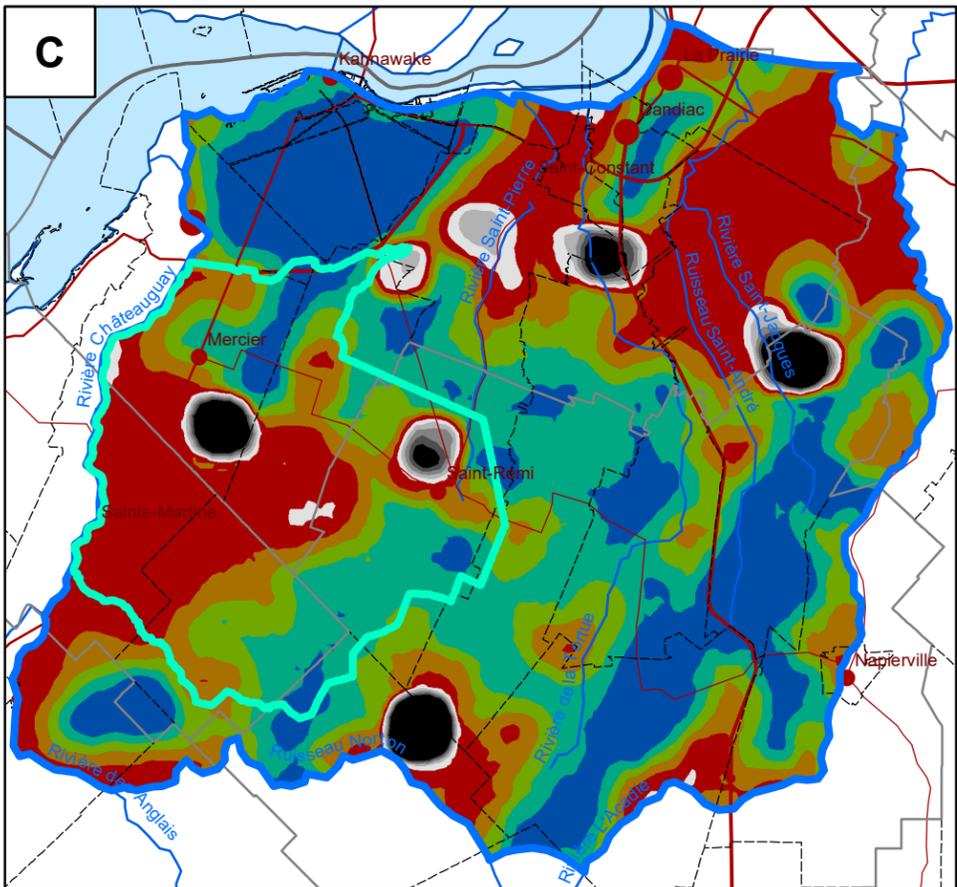
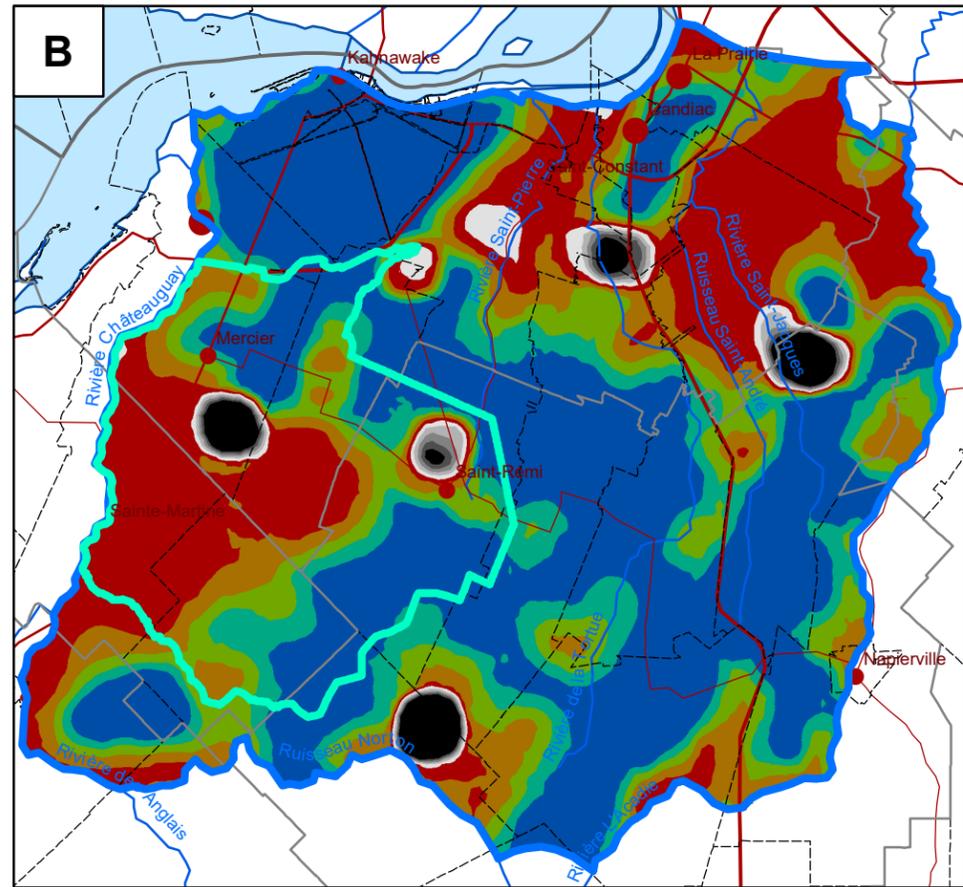
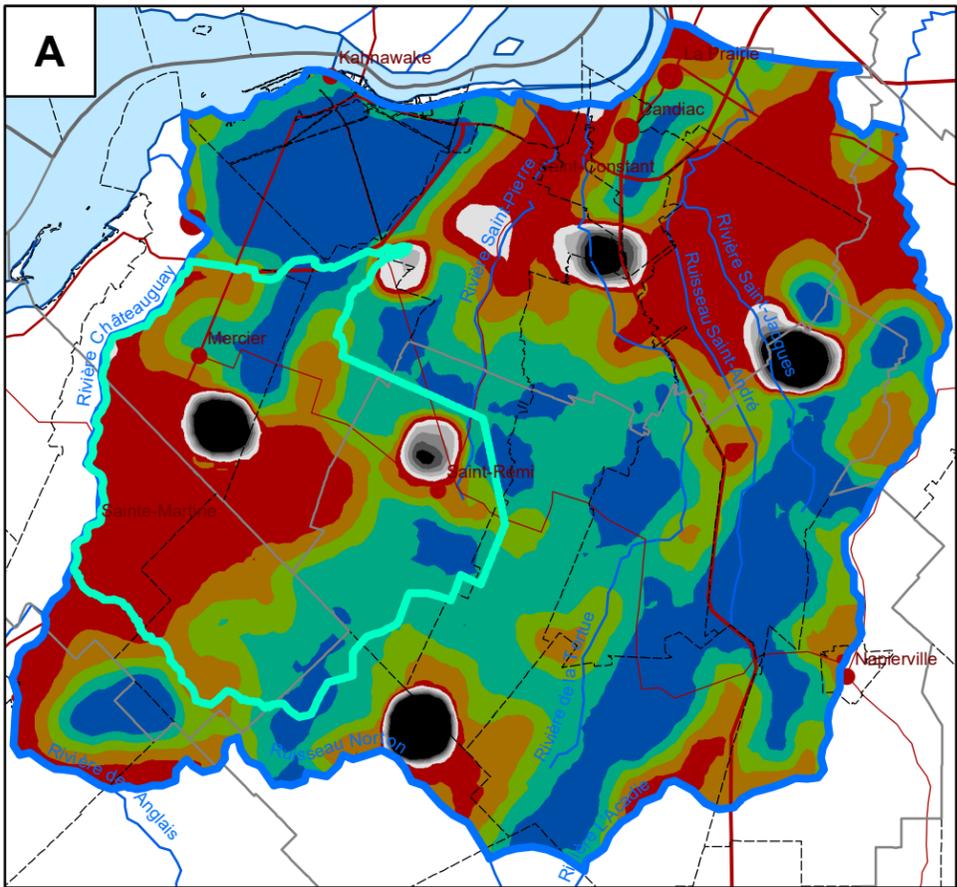
Usage total de l'eau souterraine (m³/an/km²)

- 500 - 2 500
- 2 500 - 5 000
- 5 000 - 10 000
- 10 000 - 20 000
- 20 000 - 50 000
- > 50 000

Compléments : (1) La zone d'exclusion de pompage réfère au périmètre défini dans l'annexe V du RPEP ; (2) Les résidents de Kahnawake sont alimentés par les eaux de surface et aucune donnée d'usage de l'eau souterraine n'y a été répertoriée ; (3) Les secteurs avec un usage inférieur à 500 m³/an/km² ne sont pas affichés ; (4) Cette carte combine l'ensemble des usages : total réseau, agricole total hors-réseau, ICI hors-réseau et résidentiel hors-réseau ; (5) Pour les scénarii futurs, seul l'usage ICI hors-réseau n'a pas été modifié.

Notes : Le tableau 10.15 résume les changements globaux considérés pour l'usage en climat futur (augmentations de 11.3%, 28.0% et 38.4%).





Carte 26 Distribution spatiale de la recharge effective présente et en climat futur

<p>Scénario 0B (S0B) : bilan actuel Recharge actuelle (B) Usage actuel (0)</p>	A	B	<p>Scénario 1A (S1A) : bilan futur Hausse de recharge de + 20 % (A) Hausse d'usage de + 11.3 % (1)</p>
<p>Scénario 2B (S2B) : bilan futur Recharge stable (B) Hausse d'usage de + 28.0 % (2)</p>	C	D	<p>Scénario 3C (S3C) : bilan futur Baisse de recharge de - 5 % (C) Hausse d'usage de + 38.4 % (3)</p>

Limites

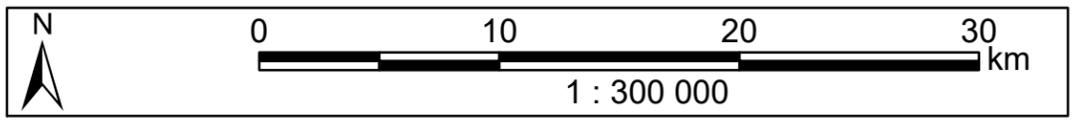
- Secteur d'évaluation de l'usage
- Modèle d'écoulement de Mercier

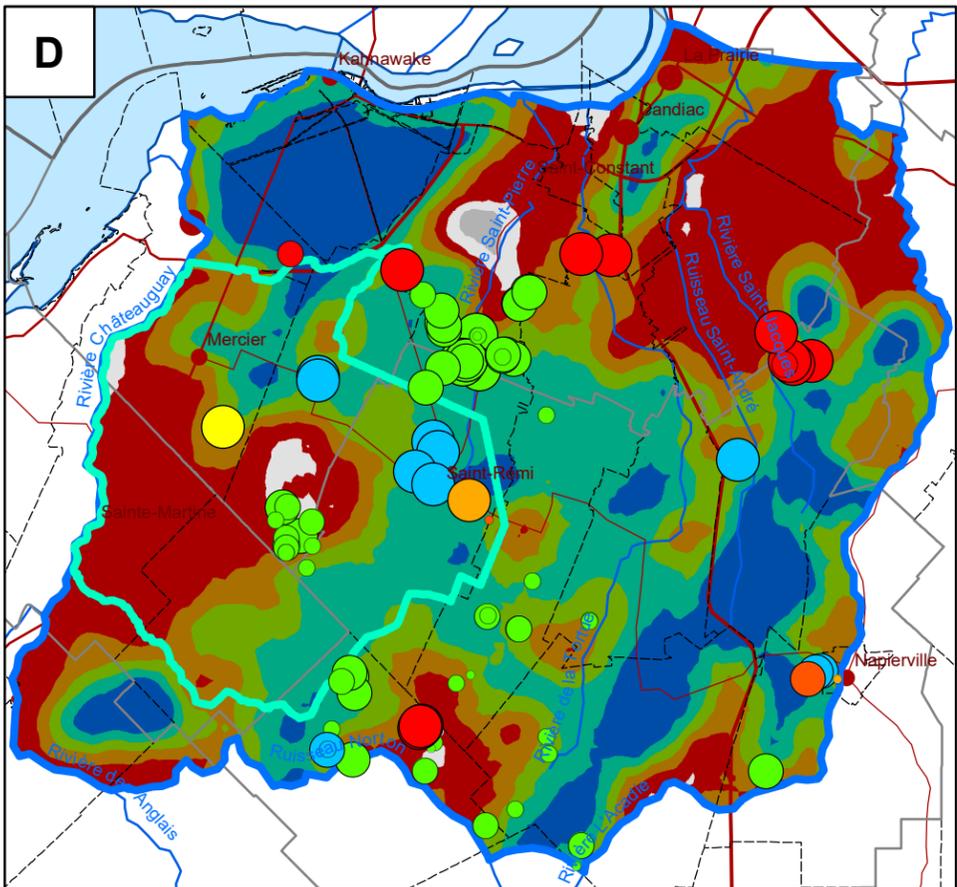
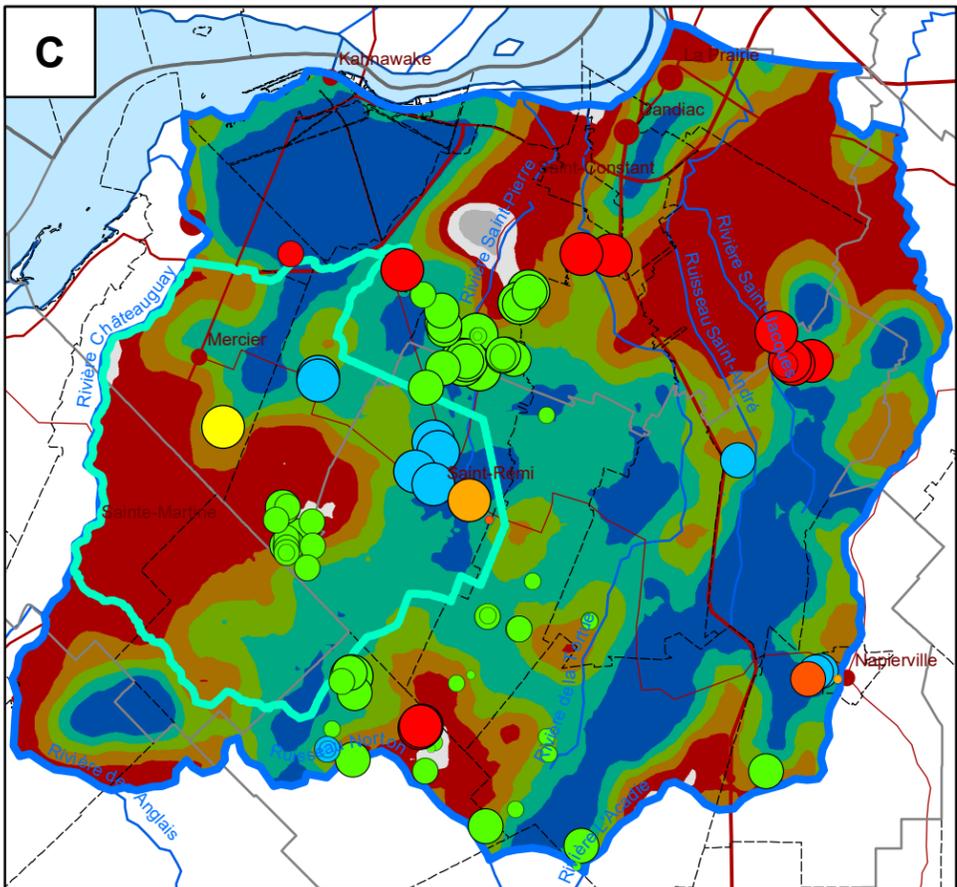
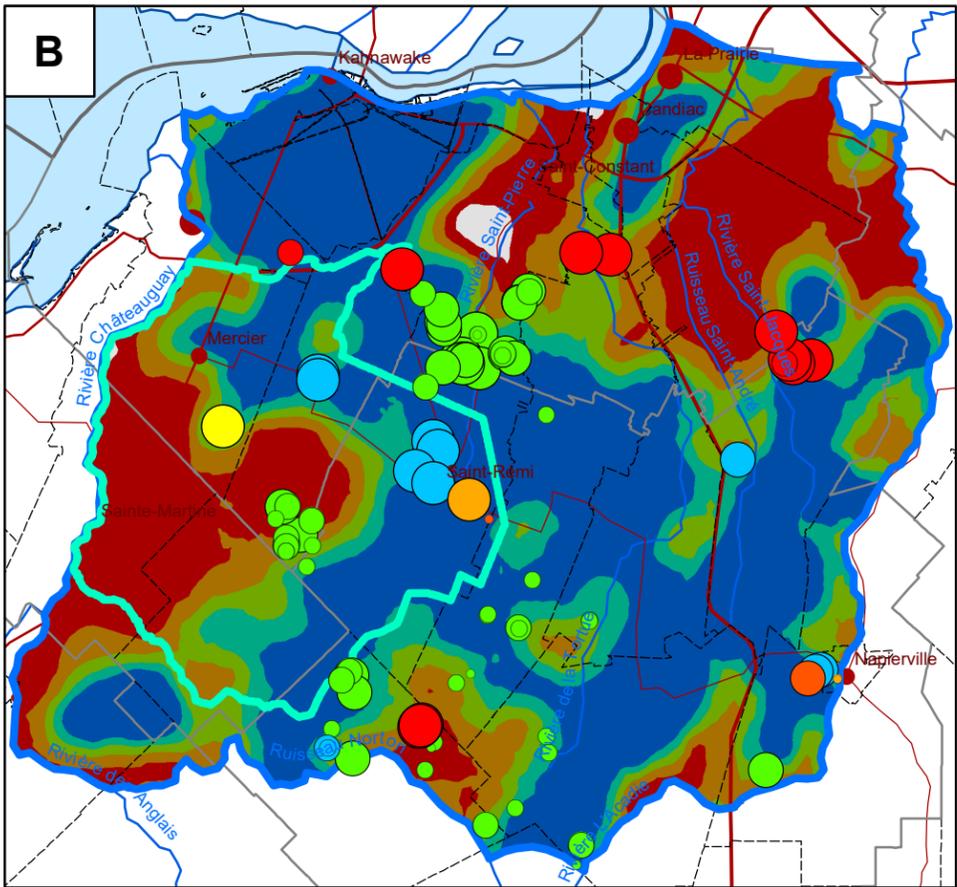
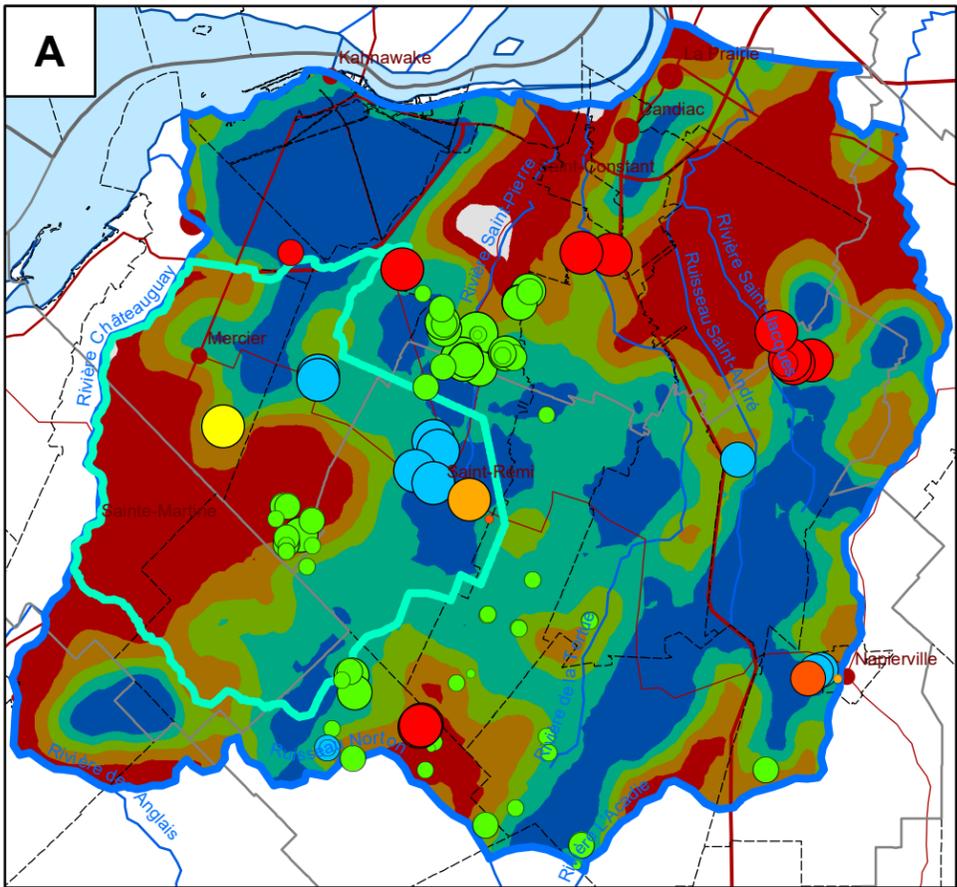
Recharge effective totale (m³/an/km²)

- < -100 000
- 100 000 - -75 000
- 75 000 - -50 000
- 50 000 - -25 000
- 25 000 - 0
- 0 - 25 000
- 25 000 - 50 000
- 50 000 - 75 000
- 75 000 - 100 000
- > 100 000

Compléments :

Notes : Ces cartes sont obtenues de la soustraction de l'usage total (carte 25) de la recharge (carte 24) en conditions présente et futures. Le tableau 10.15 résume les changements globaux considérés pour la recharge et l'usage dans les conditions présentes et en climat futur.





Carte 27 Distribution spatiale sans l'effet des GPE sur la recharge effective présente et en climat futur

Scénario 0B (S0B) : bilan actuel Recharge actuelle (B) Usage actuel (0)	A	Scénario 1A (S1A) : bilan futur Hausse de recharge de + 20 % (A) Hausse d'usage de + 11.3 % (1)	B
Scénario 2B (S2B) : bilan futur Recharge stable (B) Hausse d'usage de + 28.0 % (2)	C	Scénario 3C (S3C) : bilan futur Baisse de recharge de - 5 % (C) Hausse d'usage de + 38.4 % (3)	D

Limites

- ▭ Secteur d'évaluation de l'usage
- ▭ Modèle d'écoulement de Mercier

Grand préleveur d'eau souterraine

- ICI - Carrière
- ICI - Golf
- ICI - Autre industrie
- ICI - UTES
- Municipal
- Agricole

Usage annuel maximal (m³/an)

- < 500
- 500 - 10000
- 10000 - 25000
- 25000 - 100000
- > 100000

Recharge effective partielle (m³/an/km²)

- < -100 000
- -100 000 - -75 000
- -75 000 - -50 000
- -50 000 - -25 000
- -25 000 - 0
- 0 - 25 000
- 25 000 - 50 000
- 50 000 - 75 000
- 75 000 - 100 000
- > 100 000

Compléments : (1) La recharge effective partielle considère uniquement l'usage agricole total hors-réseau et l'usage résidentiel hors-réseau ; (2) Pour les scénarii futurs, seuls les volumes des GPE municipaux et agricoles ont été modifiés (les volumes des GPE ICI restent inchangés).

Notes : Ces cartes sont obtenues de la soustraction de l'usage total (carte 25) de la recharge (carte 24) en conditions présente et futures. Toutefois, contrairement à la carte 26, les usages des GPE municipaux et ICI n'ont pas été soustraits et ces GPE sont plutôt représentés ponctuellement. Le tableau 10.15 résume les changements globaux considérés pour la recharge et l'usage dans les conditions présentes et en climat futur.



Carte 28

Conditions présentes et en climat futur de l'eau souterraine dans les bassins versants

Scénario 0B (S0B) : bilan actuel

Recharge actuelle (B)

Usage actuel (0)

Scénario 2B (S2B) : bilan futur

Recharge stable (B)

Hausse d'usage de + 28.0 % (2)

A

B

Scénario 1A (S1A) : bilan futur

Hausse de recharge de + 20 % (A)

Hausse d'usage de + 11.3 % (1)

Scénario 3C (S3C) : bilan futur

Baisse de recharge de - 5 % (C)

Hausse d'usage de + 38.4 % (3)

Limites

Secteur d'évaluation de l'usage

Bassins versants

Limites

Bassins versants de niveau 1

Châteauguay (amont)

Châteauguay (aval)

Saint-Jacques (amont)

Saint-Jacques (aval)

Saint-Régis (amont)

Saint-Régis (aval)

Suzanne (amont)

Suzanne (aval)

Tortue (amont)

Tortue (aval)

Anglais (amont)

Anglais (aval)

Esturgeon (amont)

Esturgeon (aval)

L'Acadie (amont)

L'Acadie (aval)

Résiduels

Bilan par portion de bassin versant

R : recharge (Mm³/an/km²)

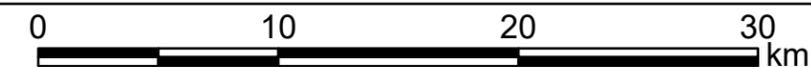
U : usage (Mm³/an/km²)

Reff (T) : recharge effective totale (Mm³/an/km²)

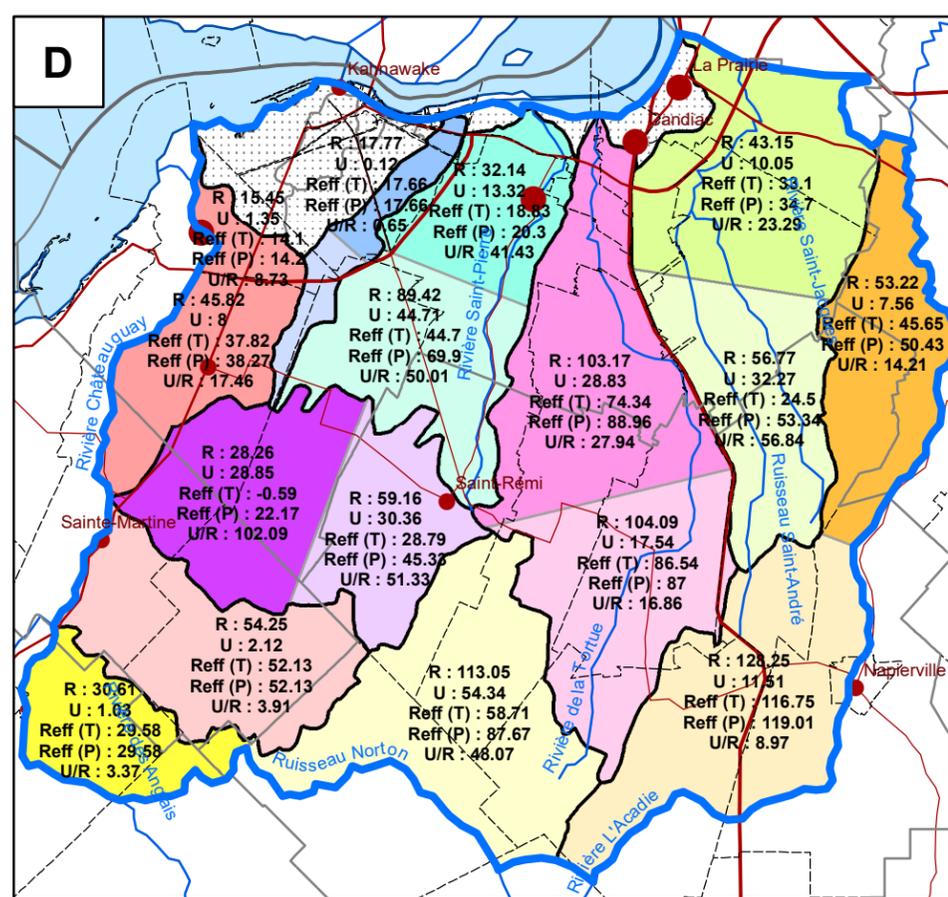
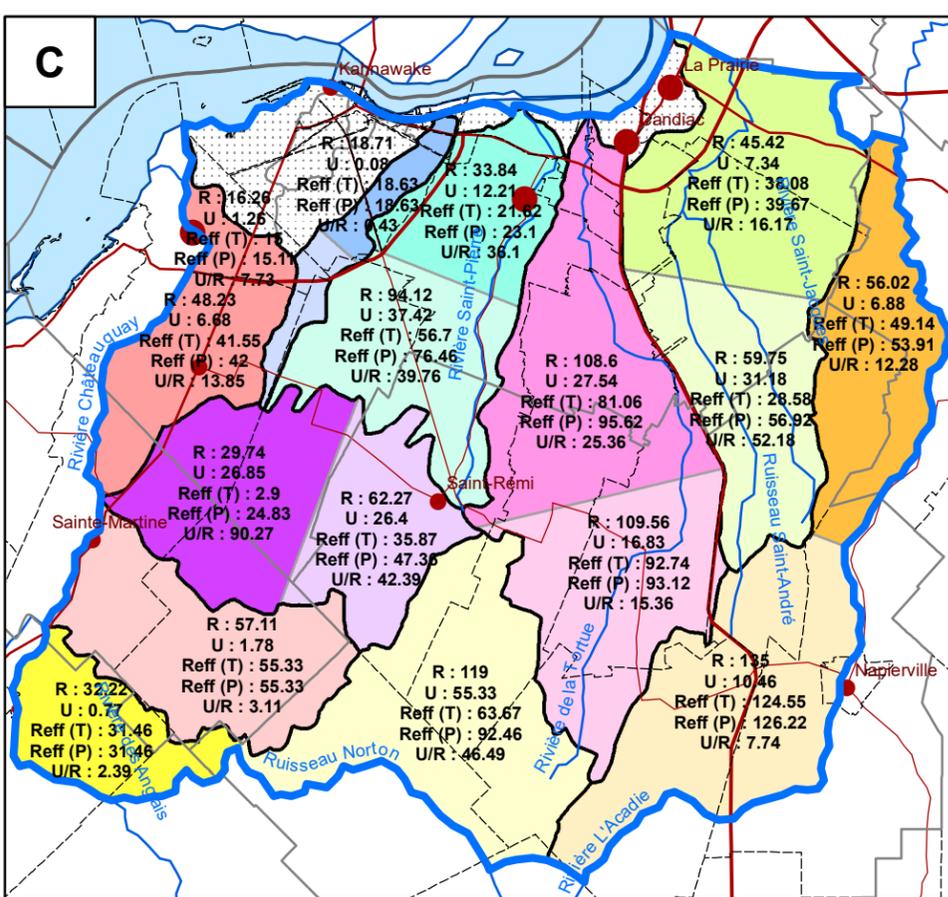
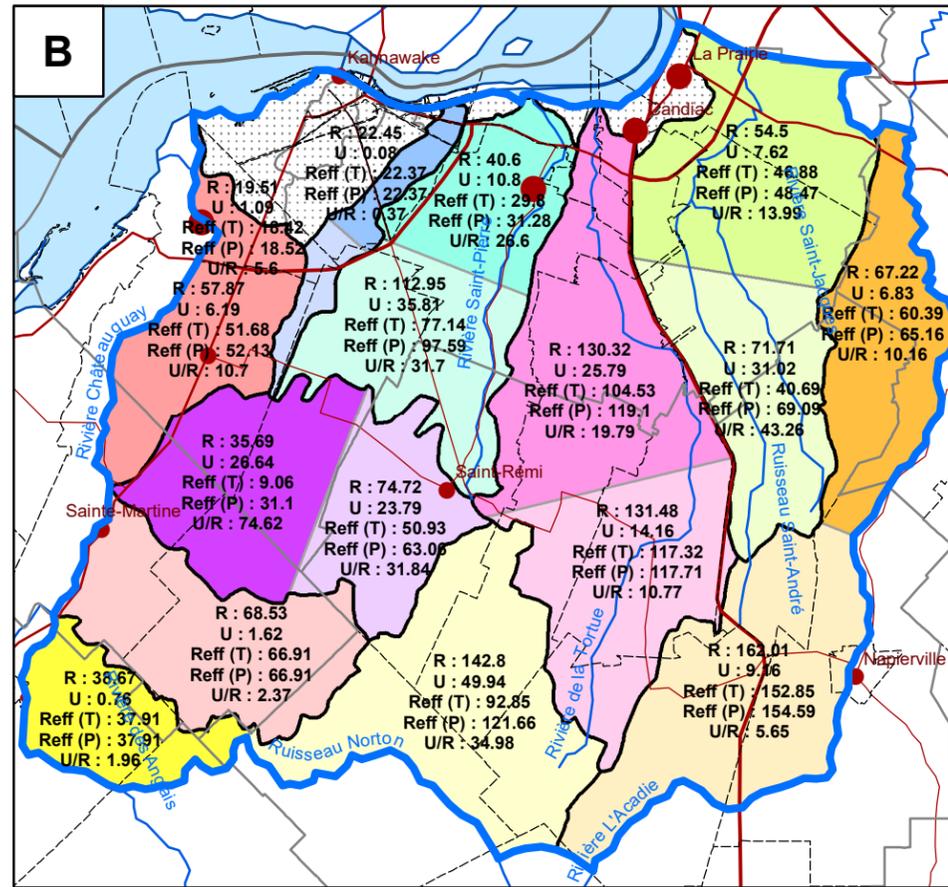
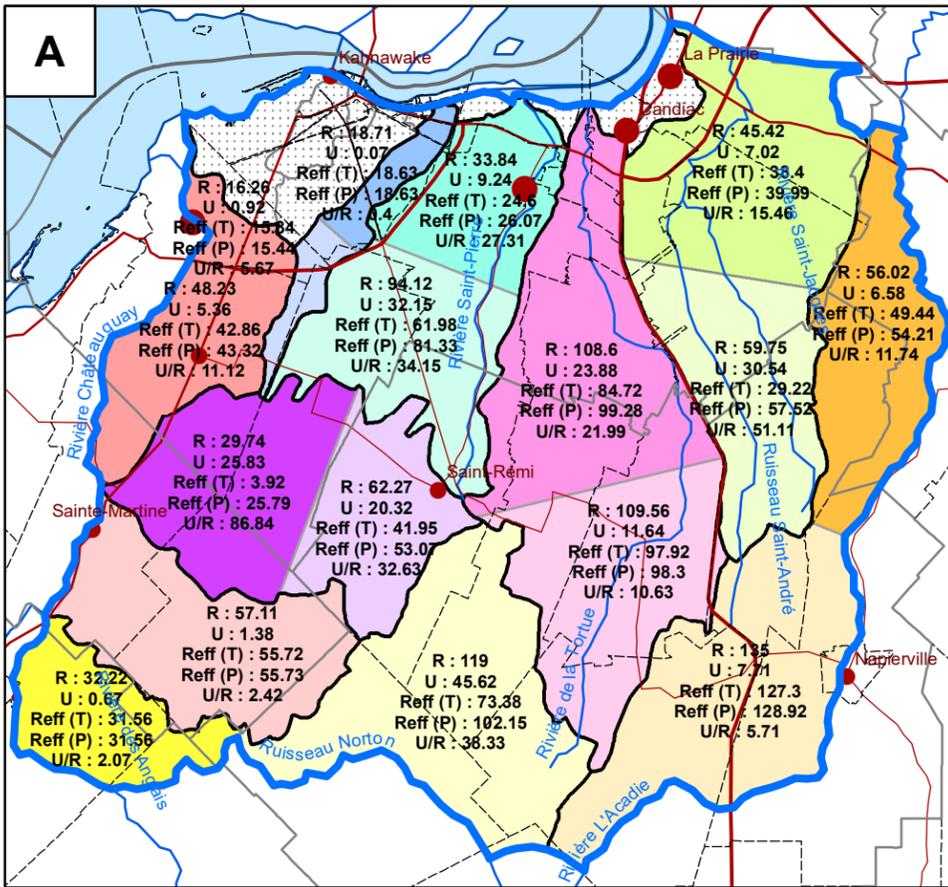
Reff (P) : recharge effective partielle (Mm³/an/km²)

U/R : ratio usage/recharge (%)

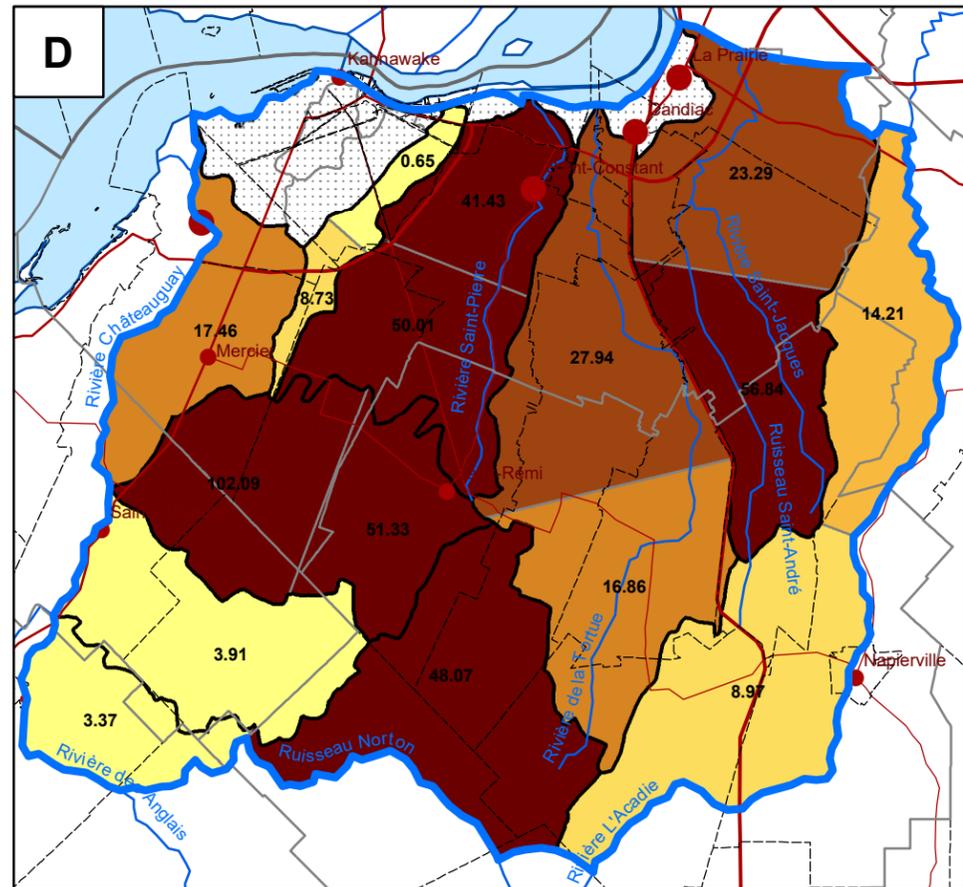
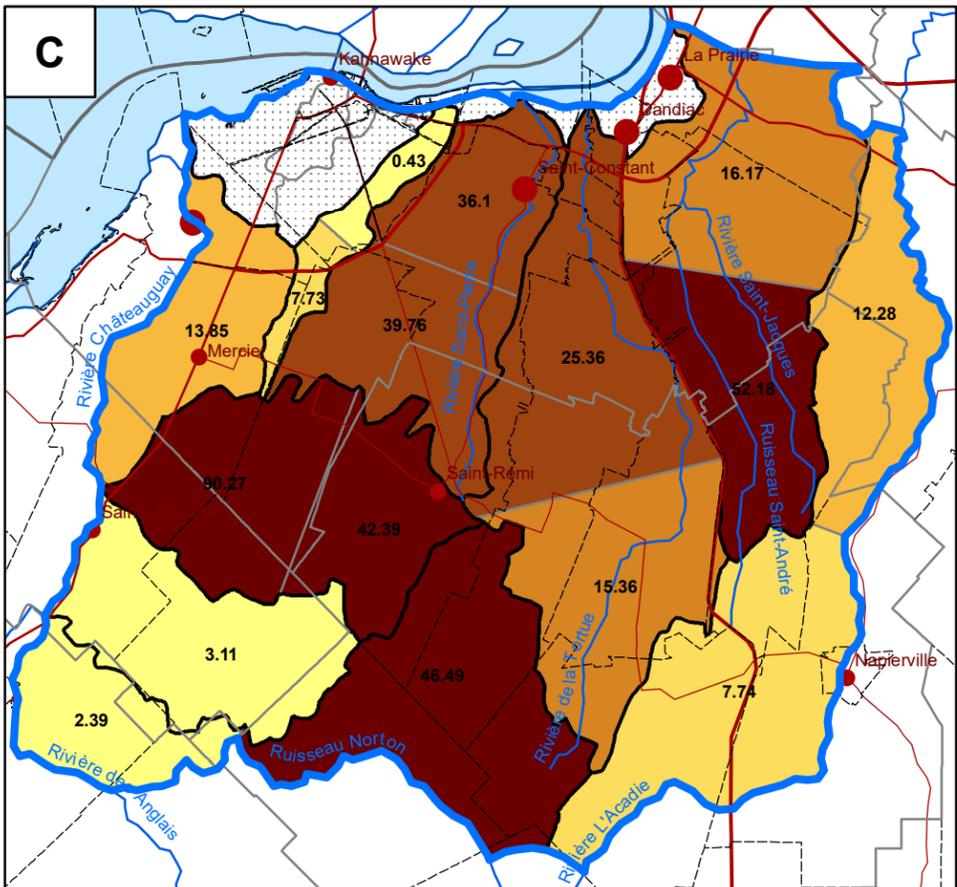
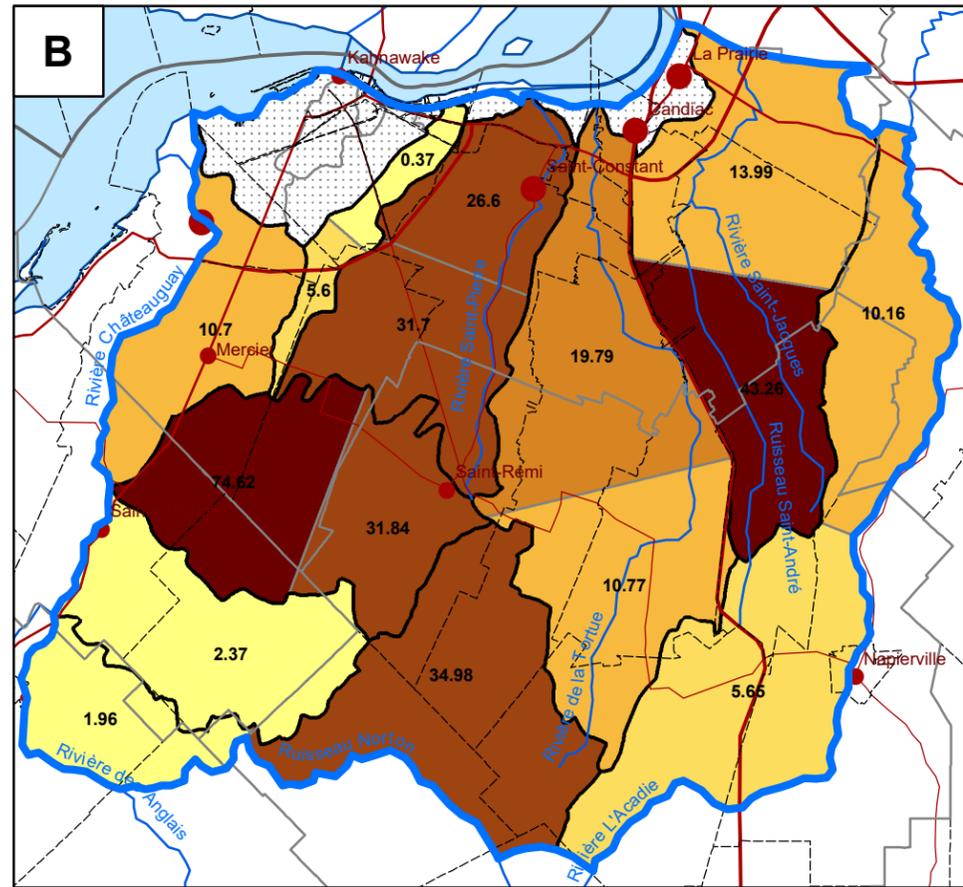
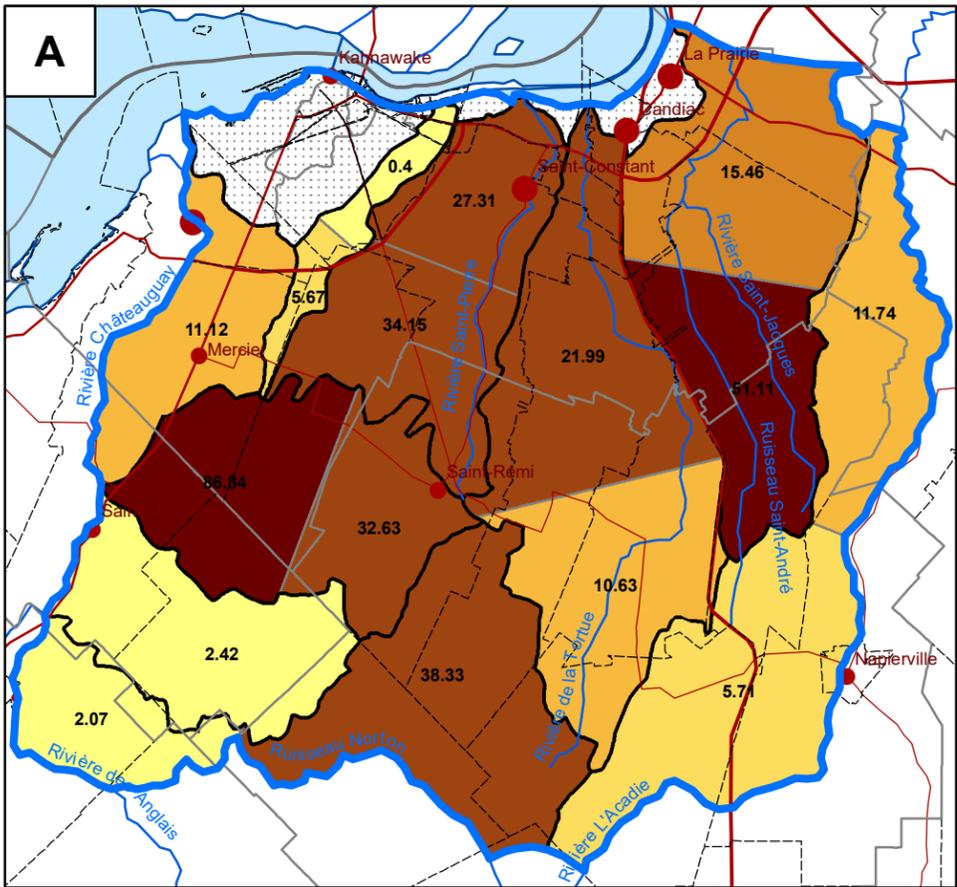
Compléments : (1) La recharge effective partielle considère uniquement l'usage agricole total hors-réseau et l'usage résidentiel hors-réseau.



1 : 300 000



Notes : Les bassins versants ont été séparés en une partie amont et une partie aval. Les conditions représentées pour chaque partie de sous-bassin sont la recharge, l'usage, la recharge effective totale (recharge moins les usages), la recharge effective partielle (sans considérer les GPE municipaux et ICI) et le % d'usage de la recharge.



Carte 29
Proportion (%) présente et en climat futur de l'usage de la recharge dans les bassins versants

Scénario 0B (S0B) : bilan actuel Recharge actuelle (B) Usage actuel (0)	A	B	Scénario 1A (S1A) : bilan futur Hausse de recharge de + 20 % (A) Hausse d'usage de + 11.3 % (1)
Scénario 2B (S2B) : bilan futur Recharge stable (B) Hausse d'usage de + 28.0 % (2)	C	D	Scénario 3C (S3C) : bilan futur Baisse de recharge de - 5 % (C) Hausse d'usage de + 38.4 % (3)

Limites
 Secteur d'évaluation de l'usage

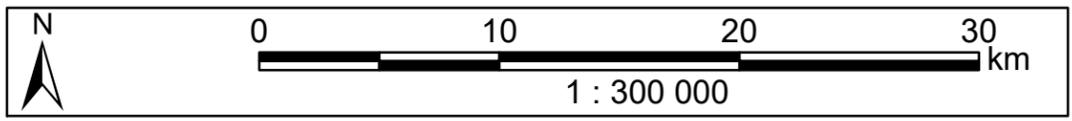
Bassins versants
 Limites

Autres bassins versants
 Résiduels

Indicateur usage/recharge (%)

- < 5
- 5 - 10
- 10 - 15
- 15 - 20
- 20 - 40
- > 40

Notes : Les bassins versants ont été séparés en une partie amont et une partie aval.



Annexes électroniques

Feuilles de calcul

Les feuilles de calcul au format Excel ont été classées dans plusieurs dossiers faisant référence aux diverses sections du rapport. Les points suivants décrivent succinctement le contenu de chaque fichier :



Section 3



Section 3.2



StRemi_RSESQ_Modele_HELP_FINAL

Liste des puits du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ) inclus dans la zone du projet et sélection des puits d'observation des niveaux de nappe d'intérêt.



StRemi_Stations_Meteo_Modele_HELP_FINAL

Liste des stations météorologiques d'Environnement Canada et critères utilisés pour sélectionner les stations les plus représentatives pour la définition des conditions climatiques sur le territoire d'étude.



StRemi_Synthese_Suivi_FINAL

Synthèse des stations de suivi environnemental (stations météorologiques d'Environnement Canada, puits d'observation du RSESQ et stations de jaugeage du CEHQ – Centre d'expertise hydrique du Québec) sélectionnées.

Ces stations d'intérêt sont aussi indiquées dans le tableau 3.2 et localisées sur la carte 3.



Section 4



StRemi_Occupation_Sol_Municipalites_FINAL

Catégories d'utilisation du territoire dans la région d'étude et statistiques associées à la distribution des types d'occupation du sol (catégories générales) et des types de cultures (selon la classification « pesticides ») par municipalité.

Les graphes des figures 4.2 et 4.3 sont extraits de ce tableur et la carte 7 présente la distribution des catégories générales d'occupation du sol en distinguant les secteurs maraîchers.

 Section 6*StRemi_Recharge_Zone_Sans_Donnees_FINAL*

Procédure de définition de la recharge de l'aquifère régional rocheux sur la zone dans données de recharge à partir de l'association d'un type de dépôt quaternaire à la médiane de recharge issue de projets antérieurs (projet Châteauguay et PACES Montérégie Est).

Le tableau 6.1 du rapport reprend les données de ce fichier et la carte 13 offre un aperçu de la zone comblée permettant d'établir la carte de recharge finale (carte 14).

*StRemi_Recharge_Municipalites_FINAL*

Statistiques de recharge moyenne par municipalité établies à partir de la grille (mailles de 250 m par 250 m) de recharge moyenne de l'aquifère régional rocheux

Les cartes 15 et 16 reprennent ces statistiques par municipalité

 Section 7*StRemi_Estimation_Utilisation_Eau_FINAL*

Fichier de calcul de l'usage actuel de l'eau (de surface et souterraine) par municipalité utilisé également pour établir les scénarii d'usage de l'eau souterraine en climat futur.

Le tableau 7.1 offre une synthèse de ce fichier de calcul et la carte 17 présente les ouvrages de captages ainsi que les données d'usage à l'échelle municipale.

Ces données sont aussi utilisées dans les sections 8, 9, 10 et 11 dont certaines figures sont extraites de ce tableur.

 Section 8 Section 8.1*StRemi_Maraichage_MELCC_vs_MAPAQ_FINAL*

Comparaison des superficies maraîchères par municipalité selon la provenance des données (carte d'occupation du sol du MELCC et données des activités agricoles fournies par le MAPAQ) et relation entre l'usage agricole de l'eau souterraine et la taille des surfaces maraîchères.

Les graphes de la figure 8.2 sont extraits de ce tableur.

*StRemi_Usage_Recharge_Municipalites_FINAL*

Recensement des ouvrages municipaux et des GPE localisés dans chaque municipalité et statistiques d'usage annuel moyen par municipalité permettant de définir l'indicateur « usage / recharge » à l'échelle municipal.

Les divers graphes de la figure 8.1 sont issus de ce tableur de même que le tableau A.1 de l'annexe 2 et la carte 18 reprend les données extraites de ce même tableur.

 Section 8 Section 8.2*StRemi_Solution_Analytique_Chesnaux_et_al_2005_FINAL*

Calcul de l'incidence des prélèvements sur le niveau piézométrique en utilisant une solution analytique et en déterminant la recharge effective (recharge – usages).

La figure 8.4 est extraite de ce tableur.

 Section 10  Section 10.1 *StRemi_Tmoy_Grille_Info_Climat_FINAL*

Données de températures moyennes calculées à partir de la grille météorologique d'Info-Climat (MELCC) utilisées pour déterminer les normales climatiques (1981-2010) sur la zone d'étude.

 *StRemi_Ptot_Grille_Info_Climat_FINAL*

Données de précipitations totales extraites de la grille météorologique d'Info-Climat (MELCC) et utilisées pour déterminer les normales climatiques (1981-2010) sur la zone d'étude.

 *StRemi_Donnees_Grille_Info_Climat_FINAL*

Synthèse des données de la grille météorologique sur les mailles situées sur la région d'étude et utilisées pour établir les normales climatiques (1981-2010)

La figure 10.1 et une partie des données du tableau 10.1 se basent sur ce tableur.

 *StRemi_Recharge_Potentielle_Chateauguay_PACES_FINAL*

Essai de détermination de la recharge potentielle sur la zone d'étude à partir des données historiques du projet Châteauguay et du PACES Montérégie Est

 *StRemi_Projections_Recharge_UL_HGS_FINAL*

Données de recharge potentielle extraites sur la région d'étude à partir du modèle HydroGeoSphere (HGS) selon la période de référence (1981-2010) et les modèles climatiques pour les périodes futures : milieu du siècle (2041-2070) et fin du siècle (2070-2095).

La carte 19 présente les mailles considérées et les cartes 20 à 22 reproduisent cette grille de recharge potentielle annuelle selon les périodes actuelles et futures.

 *StRemi_Recharge_vs_CC_FINAL*

Fichier de calcul des différents bilans hydrologiques utilisées dans la section 10.1.

 Section 11  Section 11.1

-  *StRemi_Grille_FINAL*
Grille utilisée pour estimer l'usage à l'échelle intramunicipale dans la région d'étude soit sur des mailles de 250 m par 250 m.
-  *StRemi_Recharge_Projections_FINAL*
Grille de recharge (mailles de 250 m par 250 m) actuelle brute et simplifiée (lissage) pour les trois scénarii de recharge considérés : hausse de 20 %, stabilisation et baisse de 5 %.
La carte 23 découle de cette grille.

 Section 11  Section 11.2

-  *StRemi_GPE_Volume_2018_2019_FINAL*
Liste des GPE (eau de surface et eau souterraine) du Québec pour 2018 et 2019 (données fournies par le MELCC) et établissement du numéro unique associé à chaque GPE pour la province puis calcul du volume annuel moyen de prélèvements et détermination de leur catégorie d'usage (municipal, ICI ou agricole).
-  *StRemi_GPE_Quebec_FINAL*
Synthèse des GPE (eau de surface et eau souterraine) recensés au Québec pour 2018 et 2019.
-  *StRemi_GPE_Saint_Remi_FINAL*
Traitement de la BD des GPE pour les GPE localisés dans les limites du projet actuel.
-  *StRemi_GPE_FINAL*
Synthèse des GPE situés dans la région d'étude et extraction des GPE puisant les eaux de surface des GPE prélevant les eaux souterraines.
Les GPE reliés à l'eau souterraine sont visibles sur la carte 24 et également sur la carte A.1.
-  *StRemi_Grille_GPE_FINAL*
Répartition de l'usage de l'eau souterraine par les divers GPE (municipaux, ICI et agricoles) sur les mailles de la grille.

 Section 11 Section 11.2 (suite)*StRemi_UTES_FINAL*

Données reliées à l'UTES.

*StRemi_Grille_UTES_FINAL*

Répartition de l'usage de l'eau souterraine par l'UTES sur les mailles de la grille.

*StRemi_Usage_Eau_Municipalites_FINAL*

Calcul de l'usage de l'eau souterraine par municipalité et pour les diverses catégories utilisées par la suite pour distribuer l'usage sur les mailles de la grille dans le but de définir l'indicateur intramunicipal.

*StRemi_Grille_Nb_Puits_Residentiels_FINAL*

Calcul du nombre de puits résidentiels par maille de la grille à partir de la BD du SIH (MELCC) et détermination de la densité de puits privés dans la région d'étude.

*StRemi_Utilisation_Territoire_FINAL*

Attribution de la catégorie d'occupation du sol et du type de culture sur les mailles de la grille à partir de la carte d'utilisation du sol de 2017 (MELCC).

*StRemi_Usage_Eau_Total_Reseau_FINAL*

Calcul de l'usage réseau actuel de l'eau souterraine eau et répartition de cet usage sur les mailles de la grille situées sur la région d'étude.
La carte A.2 présente cet usage sur le territoire d'étude.

*StRemi_Usage_Eau_Agricole_Hors_Reseau_FINAL*

Calcul de l'usage agricole hors-réseau actuel de l'eau souterraine et répartition de cet usage sur les mailles de la grille situées sur la région d'étude.
La carte A.3 présente cet usage ainsi que les GPE agricoles présents sur la région d'étude.

*StRemi_Usage_Eau_ICI_Hors_Reseau_FINAL*

Calcul de l'usage ICI (industriel, commercial et institutionnel) hors-réseau actuel de l'eau souterraine eau et répartition de cet usage sur les mailles de la grille situées sur la région d'étude.
La carte A.4 présente cet usage sur le territoire d'étude.

 Section 11 Section 11.2 (suite) *StRemi_Usage_Eau_Residentiel_Hors_Reseau_FINAL*

Calcul de l'usage résidentiel hors-réseau actuel de l'eau souterraine et répartition de cet usage sur les mailles de la grille situées sur la région d'étude.

La carte A.5 présente cet usage sur le territoire d'étude accompagné de la distribution des puits résidentiels extraits du SIH.

 *StRemi_Usage_Eau_Total_FINAL*

Combinaison de toutes les grilles d'usage de l'eau souterraine pour le calcul de l'usage total.

L'usage total est présenté sur la carte 25 tandis que chaque usage est distingué sur la carte 24 de l'indicateur intramunicipal.

 *StRemi_GPE_Projections_FINAL*

Calcul des usages de l'eau souterraine pour les trois scénarii futurs à partir des estimations de l'usage actuel pour les GPE situés dans la région d'étude.

Les variations de volumes de prélèvements faits par les GPE sont présentés sur la carte 24 pour les quatre scénarii considérés.

 *StRemi_Usage_Projections_FINAL*

Calcul des grilles d'usage de l'eau souterraine pour les trois scénarii futurs à partir des estimations de l'usage actuel réparti sur la grille afin de produire l'indicateur intramunicipal pour les périodes actuelles et futures.

L'indicateur intramunicipal ainsi que l'usage total de l'eau souterraine sont respectivement présentés sur les cartes 24 et 25 pour les quatre scénarii considérés.

 Section 11  Section 11.3 *StRemi_Recharge_Effective_FINAL*

Calcul de la recharge effective totale et partielle selon les quatre scénarii considérés (scénario actuel et trois scénarii futurs) à partir des grilles de recharge de l'aquifère régional rocheux et d'usage total de l'eau souterraine.

Ces données sont visibles sur les carte 26 et 27 qui présentent respectivement la recharge effective totale et partielle (cette dernière étant complétée par les données ponctuelles issues de la BD des GPE).

 Section 11  Section 11.4 *StRemi_Bilan_Recharge_Effective_FINAL*

Bilan déterminé sur les portions amont et aval des différents sous-bassins versants de la région d'étude.

La carte 28 retranscrit l'ensemble de ces données tandis que la carte 29 présente la proportion d'usage de la recharge sur les portions amont et aval de ces sous-bassins versants.

Couches SIG

Un fichier MapPackage (*StRemi_FINAL*) a été produit à partir d'ArcGIS. Il regroupe l'ensemble des couches d'information géographique visible sur les cartes annexées au présent rapport. Les couches sont décrites brièvement ci-dessous :



Premier plan

<u>Shapefile (polygone)</u>	◆◆◆	<i>Limites_Modele_Ecoulement_Mercier</i> Limites du modèle d'écoulement
<u>Shapefile (polygone)</u>	◆◆◆	<i>Limites_Evaluation_Usage_Eau</i> Limites de la zone d'évaluation de l'usage de l'eau souterraine
<u>Shapefile (polygone)</u>	◆◆◆	<i>Limites_Zone_Exclusion</i> Limites de la zone d'exclusion de pompage
<u>Shapefile (polygone)</u>	◆◆◆	<i>Kahnawake_Saint_Remi</i> Limites du territoire autochtone de Kahnawake
<u>Shapefile (polygone)</u>	◆◆◆	<i>Limites_Zone_Sans_Donnees_Recharge</i> Limites de la zone sans données de recharge
<u>Shapefile (polygone)</u>	◆◆◆	<i>Limites_Modele_HELP</i> Limites du modèle d'évaluation de la recharge (HELP)
<u>Shapefile (polygone)</u>	◆◆◆	<i>Limites_Pontlevoy_INRS_2004</i> Limites du projet antérieur de Pontlevoy (2004)
<u>Shapefile (polygone)</u>	◆◆◆	<i>Limites_CDAQ_Technorem_2008</i> Limites du projet antérieur de Technorem (2008)
<u>Shapefile (polygone)</u>	◆◆◆	<i>Limites_PACES_ME</i> Limites du projet antérieur du PACES Montérégie Est (2013)
<u>Shapefile (polygone)</u>	◆◆◆	<i>Limites_Projet_Chateauguay</i> Limites du projet antérieur de Châteauguay (2006)
<u>Shapefile (point)</u>	◆◆◆	<i>Lieux_Habites_Saint_Remi</i> Principales villes



Premier plan (suite)

- Shapefile (polyligne) *Limites_Administratives_Saint_Remi*
Limites administratives (frontières, régions, MRC et municipalités)
- Shapefile (polyligne) *Routes_Saint_Remi*
Réseau routier principal (autoroutes, routes nationales et régionales)
- Shapefile (polygone) *Lacs_Saint_Remi*
Étendues d'eau
- Shapefile (polyligne) *Rivieres_Saint_Remi*
Cours d'eau



Cartes



Carte 1

- Shapefile (polygone) *Municipalites_Selectionnees_Evaluation_Usage_Eau_Saint_Remi*
Limites des municipalités sélectionnées pour l'évaluation de l'usage de l'eau souterraine
- Shapefile (polygone) *Municipalites_Autres_Selectionnees_Evaluation_Usage_Eau_Saint_Remi*
Limites des municipalités recoupées par la région d'étude mais non retenues pour l'évaluation de l'usage de l'eau souterraine
- Shapefile (polygone) *Municipalites_Non_Selectionnees_Evaluation_Usage_Eau_Saint_Remi*
Autres municipalités



Carte 2

- Image *PZ_Technorem_Reperes_Saint_Remi.PNG*
Carte de la piézométrie extraite du rapport de Technorem (1008) et géoréférencée

 Cartes (suite)

 Carte 3

- Shapefile (point)  *BD_QC_Stations_Meteo_Env_Can_Selectionnees_Saint_Remi*
Stations météorologiques d'Environnement Canada d'intérêt
- Shapefile (point)  *BD_QC_Stations_Meteo_Env_Can_Actives_Saint_Remi*
Autres stations météorologiques actives d'Environnement Canada
- Shapefile (point)  *Puits_RSESQ_Selectionnees_Modele_HELP*
Puits d'observation du RSESQ (MELCC) d'intérêt
- Shapefile (point)  *Puits_RSESQ_Actifs_St_Remi*
Autres puits d'observation actifs du RSESQ (MELCC)
- Shapefile (point)  *Stations_Hydrometriques_Selectionnees_Modele_HELP*
Stations hydrométriques (CEHQ) d'intérêt
- Shapefile (point)  *Stations_Hydrometriques_Ouvertes_Saint_Remi*
Autres stations hydrométriques actives (CEHQ)
- Shapefile (polygone)  *BV_Stations_Selectionnees_Modele_HELP*
Bassins versants jaugés

 Carte 4

- Shapefile (polyligne)  *Contours_DEM_Simp_Saint_Remi*
Ligne de contours au 5 m du modèle numérique d'élévation simplifié
- Shapefile (polygone)  *BV_Niveau_2_Evaluation_Usage_Eau_Saint_Remi*
Limites des bassins versants principaux de niveau 2 (superficie supérieure à 100 km²)
- Shapefile (polygone)  *BV_Niveau_1_Evaluation_Usage_Eau_Saint_Remi*
Limites des bassins versants de niveau 1
-

 Cartes (suite)	 Carte 5
<u>Shapefile (polyligne)</u>	 <i>Failles_Regionales_Saint_Remi</i> Structures géologiques régionales
<u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>Zone_Geologique_Saint_Remi</i> Limites des unités géologiques
<u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>Zone_Geologique_Evaluation_Usage_Saint_Remi</i> Limites des unités géologiques (couche utilisée pour la légende seulement)
	 Carte 6
<u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>Quaternaire_CGC_BSL_Saint_Remi</i> Limites des unités quaternaires
<u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>Quaternaire_CGC_BSL_Evaluation_Usage_Eau_Saint_Remi</i> Limites des unités quaternaires (couche utilisée pour la légende seulement)
	 Carte 7
<u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>Maraicher_Saint_Remi</i> Limites des cultures maraîchères
<u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>Occ_St_Remi</i> Catégories générales d'occupation du sol selon la carte d'utilisation du territoire de 2017 (MELCC)
	 Carte 8
<u>Raster</u>	 <i>tot_st_remi</i> Épaisseur totale des dépôts meubles
	 Carte 9
<u>Raster</u>	 <i>til_st_remi</i> Épaisseur des tills

 Cartes (suite)	 Carte 10
<u>Raster</u>	 <i>esk_st_remi</i> Épaisseur de l'esker de Mercier
	 Carte 11
<u>Raster</u>	 <i>arg_st_remi</i> Épaisseur d'argile
	 Carte 12
<u>Raster</u>	 <i>LIDAR_25m.tif</i> LiDAR
	 Carte 13
<u>Raster</u>	 <i>Recharge_ME</i> Recharge moyenne annuelle du roc estimée pour le projet PACES Montérégie Est
<u>Raster</u>	 <i>recharge_ch</i> Recharge moyenne annuelle du roc estimée pour le projet Châteauguay
<u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>Quaternaire_CGC_BSL_Evaluation_Usage_Eau_Saint_Remi</i> Limites des unités quaternaires
	 Carte 14
<u>Raster</u>	 <i>rech_st_remi</i> Recharge moyenne annuelle du roc calculée dans les limites du projet actuel
	 Carte 15
<u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>Usage_Recharge_Municipalites_Saint_Remi</i> Recharge moyenne annuelle du roc (mm/an) estimée dans chaque municipalité de la région d'étude

 Cartes (suite)	 Carte 16
<u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>Usage_Recharge_Municipalites_Saint_Remi</i> Recharge moyenne annuelle du roc ($\text{Mm}^3/\text{an}/\text{km}^2$) estimée dans chaque municipalité de la région d'étude
	 Carte 17
<u>Shapefile (point)</u>	 <i>Captages_Municipaux_Saint_Remi</i> Captages d'eau souterraine municipaux
<u>Shapefile (point)</u>	 <i>GPE_Saint_Remi</i> GPE prélevant les eaux souterraines
<u>Shapefile (point)</u>	 <i>Puits_Prives_Saint_Remi</i> Puits résidentiels issus du SIH
<u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>Usage_Recharge_Municipalites_Saint_Remi</i> Usage annuel moyen de l'eau souterraine ($\text{Mm}^3/\text{an}/\text{km}^2$) estimé dans chaque municipalité de la région d'étude
	 Carte 18
<u>Shapefile (point)</u>	 <i>Captages_Municipaux_Saint_Remi</i> Captages d'eau souterraine municipaux
<u>Shapefile (point)</u>	 <i>GPE_Saint_Remi</i> GPE prélevant les eaux souterraines
<u>Shapefile (point)</u>	 <i>Puits_Prives_Saint_Remi</i> Puits résidentiels issus du SIH
<u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>Usage_Recharge_Municipalites_Saint_Remi</i> Usage de la recharge ($\text{Mm}^3/\text{an}/\text{km}^2$) estimé dans chaque municipalité de la région d'étude

 Cartes (suite)

 Carte 19

Shapefile (point)  *Grille (mailles de 5 x 5 km) de la recharge potentielle (HGS - UL)*
Mailles de la grille de recharge potentielle extraites du modèle HGS (Université Laval) et comprises dans la zone d'étude

Shapefile (point)  *Grille (mailles de 5 x 5 km) de la recharge potentielle (HGS - UL)*
Ensemble des mailles de la grille de recharge potentielle extraites du modèle HGS (Université Laval)

 Carte 20

Shapefile (point)  *Grille_Recharge_Donnees_UL_HGS_StRemi*
Données de recharge potentielle (mm/an) pour la période de référence (1981-2010) issues du modèle HGS (Université Laval)

Raster  *ref_an_proj*
Recharge potentielle (mm/an) pour la période de référence (1981-2010) extraite du modèle HGS (Université Laval)

 Carte 21

Shapefile (point)  *Grille_Recharge_Donnees_UL_HGS_StRemi*
Données de recharge potentielle (mm/an) pour le milieu du siècle (2041-2070) issues du modèle HGS (Université Laval)

Raster  *mid_an_proj*
Recharge potentielle (mm/an) pour le milieu du siècle (2041-2070) extraite du modèle HGS (Université Laval)

 Carte 22

Shapefile (point)  *Grille_Recharge_Donnees_UL_HGS_StRemi*
Données de recharge potentielle (mm/an) pour la fin du siècle (2071-2095) issues du modèle HGS (Université Laval)

Raster  *end_an_proj*
Recharge potentielle (mm/an) pour la fin du siècle (2071-2095) extraite du modèle HGS (Université Laval)

 Cartes (suite)

 Carte 23

- A Raster  *R_S_Sta_m2km2*
Recharge moyenne annuelle actuelle ($\text{m}^3/\text{an}/\text{km}^2$) lissée (scénario B)
- B Raster  *R_S_Hau_m2km2*
Recharge moyenne annuelle future ($\text{m}^3/\text{an}/\text{km}^2$) lissée considérant une hausse de 20 % de recharge (scénario A)
- C Raster  *R_S_Sta_m2km2*
Recharge moyenne annuelle future ($\text{m}^3/\text{an}/\text{km}^2$) lissée considérant aucun changement de recharge par rapport à l'actuel (scénario B)
- D Raster  *R_S_Red_m2km2*
Recharge moyenne annuelle future ($\text{m}^3/\text{an}/\text{km}^2$) lissée considérant une baisse de 5 % de recharge (scénario C)

 Carte 24

- A Shapefile (point)  *GPE_Carriere_Projetes_StRemi*
Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m^3/an) des carrières (GPE) du scénario 0 (actuel)
- A Shapefile (point)  *GPE_Golf_Projetes_StRemi*
Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m^3/an) des golfs (GPE) du scénario 0 (actuel)
- A Shapefile (point)  *GPE_Autre_Industrie_Projetes_StRemi*
Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m^3/an) des autres industries (GPE) du scénario 0 (actuel)
- A Shapefile (point)  *GPE_UTES_Projetes_StRemi*
Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m^3/an) de l'UTES (GPE) du scénario 0 (actuel)
- A Shapefile (point)  *GPE_Municipal_Projetes_StRemi*
Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m^3/an) des puits municipaux (GPE) du scénario 0 (actuel)

	Cartes (suite)		Carte 24 (suite)
A	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Agricole_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des puits agricoles (GPE) du scénario 0 (actuel)
A	<u>Shapefile (polygone)</u>		<i>HRResB0m3km2P</i> Usage résidentiel hors-réseau de l'eau souterraine (m ³ /an/km ²) du scénario 0 (actuel)
A	<u>Raster</u>		<i>HRAgrTS0m3km2</i> Usage agricole total hors-réseau de l'eau souterraine (m ³ /an/km ²) du scénario 0 (actuel)
A	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_ICI_Sout_Type</i> GPE ICI (couche utilisée pour la légende seulement)
A	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_Sout</i> GPE agricoles et municipaux (couche utilisée pour la légende seulement)
A	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_Sout</i> Volumes de prélèvement annuel maximal d'eau souterraine des GPE (couche utilisée pour la légende seulement)
B	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Carriere_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des carrières (GPE) du scénario 1 (futur)
B	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Golf_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des golfs (GPE) du scénario 1 (futur)
B	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Autre_Industrie_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des autres industries (GPE) du scénario 1 (futur)
B	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_UTES_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) de l'UTES (GPE) du scénario 1 (futur)

	Cartes (suite)		Carte 24 (suite)
B	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Municipal_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des puits municipaux (GPE) du scénario 1 (futur)
B	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Agricole_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des puits agricoles (GPE) du scénario 1 (futur)
B	<u>Shapefile (polygone)</u>		<i>HRResB1m3km2P</i> Usage résidentiel hors-réseau de l'eau souterraine (m ³ /an/km ²) du scénario 1 (futur)
B	<u>Raster</u>		<i>HRAgrTS1m3km2</i> Usage agricole total hors-réseau de l'eau souterraine (m ³ /an/km ²) du scénario 1 (futur)
B	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_ICI_Sout_Type</i> GPE ICI (couche utilisée pour la légende seulement)
B	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_Sout</i> GPE agricoles et municipaux (couche utilisée pour la légende seulement)
B	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_Sout</i> Volumes de prélèvement annuel maximal d'eau souterraine des GPE (couche utilisée pour la légende seulement)
C	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Carriere_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des carrières (GPE) du scénario 2 (futur)
C	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Golf_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des golfs (GPE) du scénario 2 (futur)
C	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Autre_Industrie_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des autres industries (GPE) du scénario 2 (futur)

	Cartes (suite)		Carte 24 (suite)
C	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_UTES_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) de l'UTES (GPE) du scénario 2 (futur)
C	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Municipal_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des puits municipaux (GPE) du scénario 2 (futur)
C	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Agricole_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des puits agricoles (GPE) du scénario 2 (futur)
C	<u>Shapefile (polygone)</u>		<i>HRResB2m3km2P</i> Usage résidentiel hors-réseau de l'eau souterraine (m ³ /an/km ²) du scénario 2 (actuel)
C	<u>Raster</u>		<i>HRAgrTS2m3km2</i> Usage agricole total hors-réseau de l'eau souterraine (m ³ /an/km ²) du scénario 2 (futur)
C	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_ICI_Sout_Type</i> GPE ICI (couche utilisée pour la légende seulement)
C	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_Sout</i> GPE agricoles et municipaux (couche utilisée pour la légende seulement)
C	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_Sout</i> Volumes de prélèvement annuel maximal d'eau souterraine des GPE (couche utilisée pour la légende seulement)
D	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Carriere_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des carrières (GPE) du scénario 3 (futur)
D	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Golf_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des golfs (GPE) du scénario 3 (futur)

	Cartes (suite)		Carte 24 (suite)
D	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Autre_Industrie_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des autres industries (GPE) du scénario 3 (futur)
D	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_UTES_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) de l'UTES (GPE) du scénario 3 (futur)
D	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Municipal_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des puits municipaux (GPE) du scénario 3 (futur)
D	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Agricole_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des puits agricoles (GPE) du scénario 3 (futur)
D	<u>Shapefile (polygone)</u>		<i>HRResB3m3km2P</i> Usage résidentiel hors-réseau de l'eau souterraine (m ³ /an/km ²) du scénario 3 (actuel)
D	<u>Raster</u>		<i>HRAgrTS3m3km2</i> Usage agricole total hors-réseau de l'eau souterraine (m ³ /an/km ²) du scénario 3 (futur)
D	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_ICI_Sout_Type</i> GPE ICI (couche utilisée pour la légende seulement)
D	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_Sout</i> GPE agricoles et municipaux (couche utilisée pour la légende seulement)
D	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_Sout</i> Volumes de prélèvement annuel maximal d'eau souterraine des GPE (couche utilisée pour la légende seulement)

 Cartes (suite)

 Carte 25

- A Raster  *TS0m3km2*
 Usage total annuel de l'eau souterraine ($\text{m}^3/\text{an}/\text{km}^2$) lissé pour le scénario 0 (actuel)
- B Raster  *TS1m3km2*
 Usage total annuel de l'eau souterraine ($\text{m}^3/\text{an}/\text{km}^2$) lissé pour le scénario 1 (futur)
- C Raster  *TS2m3km2*
 Usage total annuel de l'eau souterraine ($\text{m}^3/\text{an}/\text{km}^2$) lissé pour le scénario 2 (futur)
- D Raster  *TS3m3km2*
 Usage total annuel de l'eau souterraine ($\text{m}^3/\text{an}/\text{km}^2$) lissé pour le scénario 3 (futur)

 Carte 26

- A Raster  *RE_Tot_S0B*
 Recharge effective totale annuelle de l'eau souterraine ($\text{m}^3/\text{an}/\text{km}^2$) pour le scénario 0B (actuel)
- B Raster  *RE_Tot_S1A*
 Recharge effective totale annuelle de l'eau souterraine ($\text{m}^3/\text{an}/\text{km}^2$) pour le scénario 1A (futur)
- C Raster  *RE_Tot_S2B*
 Recharge effective totale annuelle de l'eau souterraine ($\text{m}^3/\text{an}/\text{km}^2$) pour le scénario 2B (futur)
- D Raster  *RE_Tot_S3C*
 Recharge effective totale annuelle de l'eau souterraine ($\text{m}^3/\text{an}/\text{km}^2$) pour le scénario 3C (futur)
-

	Cartes (suite)		Carte 27
A	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Carriere_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des carrières (GPE) du scénario 0 (actuel)
A	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Golf_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des golfs (GPE) du scénario 0 (actuel)
A	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Autre_Industrie_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des autres industries (GPE) du scénario 0 (actuel)
A	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_UTES_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) de l'UTES (GPE) du scénario 0 (actuel)
A	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Municipal_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des puits municipaux (GPE) du scénario 0 (actuel)
A	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Agricole_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des puits agricoles (GPE) du scénario 0 (actuel)
A	<u>Raster</u>		<i>RE_Par_SOB</i> Recharge effective partielle annuelle de l'eau souterraine (m ³ /an/km ²) pour le scénario 0B (actuel)
A	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_ICI_Sout_Type</i> GPE ICI (couche utilisée pour la légende seulement)
A	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_Sout</i> GPE agricoles et municipaux (couche utilisée pour la légende seulement)
A	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_Sout</i> Volumes de prélèvement annuel maximal d'eau souterraine des GPE (couche utilisée pour la légende seulement)

	Cartes (suite)		Carte 27 (suite)
B	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Carriere_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des carrières (GPE) du scénario 1 (futur)
B	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Golf_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des golfs (GPE) du scénario 1 (futur)
B	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Autre_Industrie_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des autres industries (GPE) du scénario 1 (futur)
B	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_UTES_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) de l'UTES (GPE) du scénario 1 (futur)
B	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Municipal_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des puits municipaux (GPE) du scénario 1 (futur)
B	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Agricole_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des puits agricoles (GPE) du scénario 1 (futur)
B	<u>Raster</u>		<i>RE_Par_SIA</i> Recharge effective partielle annuelle de l'eau souterraine (m ³ /an/km ²) pour le scénario 1A (futur)
B	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_ICI_Sout_Type</i> GPE ICI (couche utilisée pour la légende seulement)
B	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_Sout</i> GPE agricoles et municipaux (couche utilisée pour la légende seulement)
B	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_Sout</i> Volumes de prélèvement annuel maximal d'eau souterraine des GPE (couche utilisée pour la légende seulement)

	Cartes (suite)		Carte 27 (suite)
C	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Carriere_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des carrières (GPE) du scénario 2 (futur)
C	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Golf_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des golfs (GPE) du scénario 2 (futur)
C	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Autre_Industrie_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des autres industries (GPE) du scénario 2 (futur)
C	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_UTES_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) de l'UTES (GPE) du scénario 2 (futur)
C	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Municipal_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des puits municipaux (GPE) du scénario 2 (futur)
C	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Agricole_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des puits agricoles (GPE) du scénario 2 (futur)
C	<u>Raster</u>		<i>RE_Par_S2B</i> Recharge effective partielle annuelle de l'eau souterraine (m ³ /an/km ²) pour le scénario 2B (futur)
C	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_ICI_Sout_Type</i> GPE ICI (couche utilisée pour la légende seulement)
C	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_Sout</i> GPE agricoles et municipaux (couche utilisée pour la légende seulement)
C	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_Sout</i> Volumes de prélèvement annuel maximal d'eau souterraine des GPE (couche utilisée pour la légende seulement)

	Cartes (suite)		Carte 27 (suite)
D	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Carriere_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des carrières (GPE) du scénario 3 (futur)
D	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Golf_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des golfs (GPE) du scénario 3 (futur)
D	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Autre_Industrie_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des autres industries (GPE) du scénario 3 (futur)
D	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_UTES_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) de l'UTES (GPE) du scénario 3 (futur)
D	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Municipal_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des puits municipaux (GPE) du scénario 3 (futur)
D	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_Agricole_Projetes_StRemi</i> Volumes de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des puits agricoles (GPE) du scénario 3 (futur)
D	<u>Raster</u>		<i>RE_Par_S3C</i> Recharge effective partielle annuelle de l'eau souterraine (m ³ /an/km ²) pour le scénario 3C (futur)
D	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_ICI_Sout_Type</i> GPE ICI (couche utilisée pour la légende seulement)
D	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_Sout</i> GPE agricoles et municipaux (couche utilisée pour la légende seulement)
D	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_Sout</i> Volumes de prélèvement annuel maximal d'eau souterraine des GPE (couche utilisée pour la légende seulement)

 Cartes (suite)	 Carte 28
A <u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>BV_Bilan_StRemi</i> Limites des bassins versants
A <u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>Bilan_Amont_Aval_StRemi</i> Bilan de chaque portion (amont/aval) de bassin versant pour le scénario 0B (actuel)
A <u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>BV_Bilan_Amont_Aval_StRemi</i> Limites des portions amont/aval des bassins versants
A <u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>BV_Bilan_Residuels_StRemi</i> Limites des bassins versants résiduels
B <u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>BV_Bilan_StRemi</i> Limites des bassins versants
B <u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>Bilan_Amont_Aval_StRemi</i> Bilan de chaque portion (amont/aval) de bassin versant pour le scénario 1A (futur)
B <u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>BV_Bilan_Amont_Aval_StRemi</i> Limites des portions amont/aval des bassins versants
B <u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>BV_Bilan_Residuels_StRemi</i> Limites des bassins versants résiduels
C <u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>BV_Bilan_StRemi</i> Limites des bassins versants
C <u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>Bilan_Amont_Aval_StRemi</i> Bilan de chaque portion (amont/aval) de bassin versant pour le scénario 2B (futur)
C <u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>BV_Bilan_Amont_Aval_StRemi</i> Limites des portions amont/aval des bassins versants
C <u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>BV_Bilan_Residuels_StRemi</i> Limites des bassins versants résiduels

 Cartes (suite)	 Carte 28 (suite)
D <u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>BV_Bilan_StRemi</i> Limites des bassins versants
D <u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>Bilan_Amont_Aval_StRemi</i> Bilan de chaque portion (amont/aval) de bassin versant pour le scénario 3C (futur)
D <u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>BV_Bilan_Amont_Aval_StRemi</i> Limites des portions amont/aval des bassins versants
D <u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>BV_Bilan_Residuels_StRemi</i> Limites des bassins versants résiduels
	 Carte 29
A <u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>BV_Bilan_StRemi</i> Limites des bassins versants
A <u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>Bilan_Amont_Aval_StRemi</i> Usage de la recharge (%) sur les portions amont/aval de chaque bassin versant pour le scénario 0B (actuel)
A <u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>BV_Bilan_Residuels_StRemi</i> Limites des bassins versants résiduels
B <u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>BV_Bilan_StRemi</i> Limites des bassins versants
B <u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>Bilan_Amont_Aval_StRemi</i> Usage de la recharge (%) sur les portions amont/aval de chaque bassin versant pour le scénario 1A (futur)
B <u>Shapefile (polygone)</u>	 <i>BV_Bilan_Residuels_StRemi</i> Limites des bassins versants résiduels

	Cartes (suite)		Carte 29 (suite)
C	<u>Shapefile (polygone)</u>		<i>BV_Bilan_StRemi</i> Limites des bassins versants
C	<u>Shapefile (polygone)</u>		<i>Bilan_Amont_Aval_StRemi</i> Usage de la recharge (%) sur les portions amont/aval de chaque bassin versant pour le scénario 2B (futur)
C	<u>Shapefile (polygone)</u>		<i>BV_Bilan_Residuels_StRemi</i> Limites des bassins versants résiduels
D	<u>Shapefile (polygone)</u>		<i>BV_Bilan_StRemi</i> Limites des bassins versants
D	<u>Shapefile (polygone)</u>		<i>Bilan_Amont_Aval_StRemi</i> Usage de la recharge (%) sur les portions amont/aval de chaque bassin versant pour le scénario 3C (futur)
D	<u>Shapefile (polygone)</u>		<i>BV_Bilan_Residuels_StRemi</i> Limites des bassins versants résiduels
			Carte A.1
	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_ICI_Sout_Carriere</i> Volumes actuels de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des carrières (GPE)
	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_ICI_Sout_Golf</i> Volumes actuels de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des golfs (GPE)
	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_ICI_Sout_Autre_Industrie</i> Volumes actuels de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) des autres industries (GPE)
	<u>Shapefile (point)</u>		<i>GPE_StRemi_ICI_Sout_UTES</i> Volumes actuels de prélèvement annuel d'eau souterraine (m ³ /an) de l'UTES (GPE)

 Cartes (suite)

 Carte A.1 (suite)

Shapefile (point)  *GPE_StRemi_Sout_Municipal*
Volumes actuels de prélèvement annuel d'eau souterraine (m³/an) des puits municipaux (GPE)

Shapefile (point)  *GPE_StRemi_Sout_Agricole*
Volumes actuels de prélèvement annuel d'eau souterraine (m³/an) des puits agricoles (GPE)

Shapefile (point)  *GPE_StRemi_ICI_Sout_Type*
GPE ICI (couche utilisée pour la légende seulement)

Shapefile (point)  *GPE_StRemi_Sout*
GPE agricoles et municipaux (couche utilisée pour la légende seulement)

Shapefile (point)  *GPE_StRemi_Sout*
Volumes de prélèvement annuel maximal d'eau souterraine des GPE (couche utilisée pour la légende seulement)

 Carte A.2

Raster  *RT_m3ankm2C*
Usage total réseau annuel actuel de l'eau souterraine (m³/an/km²)

 Carte A.3

Shapefile (point)  *GPE_StRemi_Sout_Agricole*
Volumes actuels de prélèvement annuel d'eau souterraine (m³/an) des puits agricoles (GPE)

Shapefile (point)  *GPE_StRemi_Sout*
GPE agricoles (couche utilisée pour la légende seulement)

Shapefile (point)  *GPE_StRemi_Sout*
Volumes de prélèvement annuel maximal d'eau souterraine des GPE (couche utilisée pour la légende seulement)

 Cartes (suite) Carte A.3 (suite)

Raster  *HRAT_m3ankm2C*
Usage agricole total hors-réseau annuel actuel de l'eau souterraine (m³/an/km²)

 Carte A.4

Raster  *HRI_m3ankm2C*
Usage ICI hors-réseau annuel actuel de l'eau souterraine (m³/an/km²)

 Carte A.5

Shapefile (point)  *SIH_DontZoneExclusion_StRemi*
Localisation des puits résidentiels issus du SIH (MELCC)

Raster  *HRR_m3ankm2C*
Usage résidentiel hors-réseau annuel actuel de l'eau souterraine (m³/an/km²)

 Arrière-plan

 *omb_st_remi*
Couche d'ombrage du modèle numérique d'élévation
