

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 FINAL



Institut national
de la recherche
scientifique

INRS.CA

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

ISBN : 978-2-89146-988-3 (version numérique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2025
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2025



**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 final

François Huchet, Jean-Sébastien Gosselin, Mélanie Raynald, Julie Domaine et René Lefebvre

Soumis au

Ministère de l'Environnement et de la Lutte
contre les changements climatiques du Québec

Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau Terre Environnement (INRS-ETE)

Rapport de recherche R2061

Août 2021

RÉSUMÉ

Ce rapport synthèse documente les principaux résultats découlant des travaux réalisés par l'INRS dans le cadre du mandat suivant reçu du Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) du Québec : « *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* ». Ces travaux avaient pour but de produire des indicateurs de stress hydrique sur l'eau souterraine afin de soutenir la gestion durable de cette ressource et l'analyse des demandes d'autorisation de prélèvement d'eau faites en vertu de la *Loi sur la qualité de l'environnement* (LQE) et du *Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection* (RPEP).

Une revue de littérature a d'abord été faite sur les indicateurs de gestion durable des ressources en eau souterraine avec une emphase particulière sur les indicateurs de stress hydrique. Cette revue a permis de répertorier un grand nombre d'indicateurs de gestion durable des ressources en eau souterraine ainsi que trente-quatre (34) indicateurs de stress hydrique. Une sélection des indicateurs de stress hydrique les plus intéressants a été faite sur la base de l'échelle d'application régionale, de la disponibilité actuelle ou future des données requises au Québec et sur la possibilité de garder ces données à jour afin de suivre l'évolution des indicateurs dans le temps. Les données d'intérêt étant ou pouvant être disponibles au Québec pour la production des indicateurs de stress hydrique ont aussi été répertoriées.

Sur la base de cette analyse, les indicateurs de stress hydrique suivants ont été retenus pour une évaluation plus poussée : 1) stress hydrique de base produit à l'aide de données hydrologiques et des prélèvements totaux, 2) stress sur l'eau souterraine basé sur le rapport entre les prélèvements d'eau souterraine et la recharge, 3) indicateurs climatiques et piézométriques caractérisant la variabilité naturelle des conditions contrôlant les composantes du bilan hydrologique, 4) qualité de l'eau souterraine, et 5) problèmes d'approvisionnement. Les trois premiers indicateurs ont été produits à l'aide de données déjà disponibles afin d'illustrer ces indicateurs et de juger de leur intérêt. Les deux derniers indicateurs n'ont toutefois pas été retenus pour une application. Une réflexion plus poussée devra être faite afin de définir un indicateur de qualité de l'eau souterraine qui pourrait être basé sur les données produites par les projets régionaux antérieurs, dont principalement les projets de connaissances sur les eaux souterraines (PACES). La production d'un indicateur des problèmes d'approvisionnement nécessiterait que ces problèmes soient répertoriés de façon uniforme et systématique au Québec.

A priori, l'indicateur de stress hydrique de base semble intéressant pour caractériser globalement les pressions exercées par l'usage de l'eau à l'échelle d'un bassin. Toutefois, des difficultés considérables sont liées aux données sur les débits et à l'exploitation d'eau. Les travaux montrent aussi que l'utilisation des prélèvements (ou usage) n'est peut-être pas appropriée avec les eaux de surface. Compte tenu de la faible résolution spatiale de cet indicateur et la difficulté d'interprétation de l'impact des prélèvements d'eau souterraine par rapport à la consommation d'eau, nous ne recommandons pas de le produire pour caractériser le stress sur les ressources en eau souterraine au Québec.

L'indicateur de stress sur l'eau souterraine représente le rapport entre les prélèvements totaux d'eau souterraine et la recharge des nappes. Cet indicateur a été produit à quatre échelles différentes : (1) municipalités, (2) MRC, (3) bassins versants de niveau 1 et, (4) bassins versants de niveau 2. Pour chacune de ces échelles, trois cartes ont été produites : (a) l'utilisation totale de l'eau souterraine, (b) la recharge de l'aquifère rocheux et (c) le rapport « usage/recharge ». Cet indicateur de stress sur l'eau souterraine présente plusieurs avantages, notamment la rapidité de sa production et la possibilité de le mettre à jour régulièrement. Par contre, il apparaît nécessaire pour l'analyste d'avoir une connaissance du contexte hydrogéologique de la région afin de pouvoir ensuite définir les facteurs de stress sur les municipalités d'intérêt et aussi pour reconnaître les situations où l'indicateur n'est pas représentatif. Nous recommandons de déterminer cet indicateur à l'échelle municipale puisque l'échelle régionale par MRC ou bassin versant ne permet pas de bien identifier les secteurs avec un fort stress.

Un indicateur climatique a été considéré pour évaluer si les précipitations exercent un contrôle dominant sur la recharge et le niveau de l'eau souterraine. Si c'est le cas dans une région, l'indicateur climatique pourrait aider à distinguer un déclin du niveau d'eau souterraine relié à des facteurs climatiques par rapport à un déclin qui serait causé par l'augmentation de l'exploitation. Cet indicateur est équivalent au *Standard Precipitation Index* (SPI) communément utilisé en hydrologie. Un indicateur similaire a été produit pour les niveaux piézométriques, correspondant au *Standard Piezometric Level Index* (SPLI). L'indicateur climatique pourrait permettre d'expliquer la variabilité des niveaux d'eau souterraine ainsi que de variables hydrologiques. Dans le cas des niveaux d'eau souterraine, l'indicateur permet aussi de distinguer ces changements naturels de ceux induits par une exploitation intensive de l'eau souterraine. Il est donc recommandé de produire des indicateurs climatiques et piézométriques sur un vaste territoire pour tester leur utilisation pour définir l'état des nappes. Devant le potentiel de cette approche, le MELCC a déjà supporté l'amorce d'un nouveau projet de l'INRS ayant pour but de produire un *Bulletin sur l'état des nappes* pour la région du sud du Québec.

L'application des indicateurs climatique (SPI) et piézométrique (SPLI) exige de les relier à des régions aux conditions distinctes. Pour cette raison, des travaux ont été réalisés pour faire la définition de « secteurs hydroclimatiques ». Ces secteurs correspondent à des zones géographiques du sud du Québec dont les conditions météorologiques et hydrogéologiques sont distinctes, mais qui sont aussi reliées aux limites des grands bassins hydrologiques. Les secteurs hydroclimatiques ont été définis pour une région d'environ 36 000 km² du sud du Québec qui couvre huit (8) grands bassins versants au sud du fleuve Saint-Laurent. La distribution spatiale des conditions météorologiques de même qu'un contraste de conditions hydrogéologiques sont apparus contrôlés par la topographie et une élévation de 200 m/NMM. Ainsi, l'altitude de 200 m et les limites des grands bassins ont permis la définition de 12 secteurs hydroclimatiques dont les caractéristiques météorologiques sont distinctes.

Bien que l'échelle municipale soit bien adaptée à la production de l'indicateur de stress sur l'eau souterraine, cette échelle ne permet pas d'identifier les secteurs à l'intérieur d'une municipalité avec des pressions importantes sur l'eau souterraine ou des conflits d'usage potentiels. Conséquemment, des travaux ont été réalisés afin de produire un indicateur intramunicipal de l'usage de l'eau souterraine qui permette de distinguer les types d'usage ainsi que l'usage total de l'eau souterraine à l'intérieur des municipalités. La répartition spatiale des types d'usage hors réseau a été faite à l'aide des puits du SIH pour répartir l'usage résidentiel, de la carte d'utilisation du sol pour répartir l'usage agricole et de la base de données des Grands préleveurs d'eau (GPE) pour localiser les usages industriel-commercial-institutionnel (ICI). L'indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine permet ainsi de combler deux des principales limites de l'indicateur de stress sur l'eau souterraine à l'échelle municipale : identifier les zones sous stress au sein des municipalités et différencier les usages et donc les potentiels conflits. L'indicateur intramunicipal permet alors de mieux juger de la possibilité d'ajouter un préleveur d'importance sur les secteurs d'une municipalité en tenant compte du niveau de stress local. Cet indicateur a été testé en Montérégie Est et sur une région spécifique en Montérégie Ouest avec des résultats très probants.

L'indicateur intramunicipal de l'usage de l'eau souterraine permet de montrer la distribution spatiale des usages de l'eau souterraine dans une région sans être contraint par les limites municipales. Il est alors possible de faire un bilan de la recharge et de l'usage de l'eau souterraine à l'intérieur de limites naturelles. L'usage de telles limites fait en sorte qu'il n'y a pas (ou peu) d'échange d'eau souterraine à travers ces limites, ce qui assure un bilan représentatif entre usage et recharge. Il est alors possible de produire un indicateur de stress sur l'eau souterraine (usage/recharge) en évitant les résultats non représentatifs obtenus pour certaines municipalités où une grande partie de l'eau souterraine exploitée provient de l'extérieur de la municipalité. L'indicateur de stress sur l'eau souterraine a ainsi été calculé à l'intérieur de bassins hydrogéologiques définis par la carte piézométrique de la Montérégie Est. L'indicateur a été produit pour des bassins de niveau 1 et de niveau 2. Les bassins de niveau 1 se sont révélés être trop grands pour offrir un portrait suffisamment détaillé de la variabilité régionale du stress sur l'eau souterraine alors que les bassins de niveau 2 offraient un niveau de détail intéressant.

De plus, il s'est avéré que les données disponibles à l'intérieur des bassins versant hydrogéologiques permettaient de faire une caractérisation complète des ressources en eau souterraine et de leur exploitation à l'aide de quatre (4) indicateurs spatialement distribués : 1) la recharge moyenne annuelle (mm/an), 2) l'usage total annuel (mm/an), 3) le stress sur l'eau souterraine (% de la recharge exploitée; usage/recharge), et 4) la recharge effective annuelle (mm/an ; recharge moins l'usage). La combinaison de ces indicateurs permet d'avoir un portrait de la ressource renouvelable disponible (recharge), de l'importance des usages en termes absolus avec les mêmes unités que la recharge (mm/an), de la nature durable ou non de l'usage en considérant un seuil de 20 % de l'usage de la recharge, et de l'eau souterraine non exploitée disponible pour soutenir le débit de base des cours d'eau (recharge effective). Il s'est avéré intéressant d'estimer ainsi le changement de l'apport d'eau souterraine résultant de son usage à l'échelle des bassins versants hydrogéologiques de niveau 1 qui couvrent un plus grand territoire.

Considérant le grand intérêt de l'indicateur intramunicipal de l'usage de l'eau souterraine ainsi que des quatre indicateurs pouvant être produits à l'intérieur de sous-bassins hydrogéologique, nous avons évalué la possibilité de produire ces indicateurs pour l'ensemble du Québec municipalisé. La production de ces indicateurs nécessite la disponibilité d'une estimation spatialement distribuée de la recharge ainsi que l'évaluation des usages de l'eau souterraine à l'échelle municipale. Nous avons fait la revue des méthodes utilisées pour estimer la recharge et l'usage de l'eau souterraine dans le cadre des projets PACES déjà réalisés au Québec. Il s'est avéré que différentes méthodes ont été utilisées pour estimer la recharge et que ces méthodes n'ont pas toujours été calibrées à l'aide d'une comparaison avec des données hydrologiques. Il y a aussi eu différents niveaux de détail dans l'estimation de l'usage de l'eau souterraine, notamment par rapport aux usages agricoles.

L'utilisation directe des résultats produits par les projets PACES afin de produire l'indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine mènerait donc à des incohérences entre les régions. Il est donc recommandé que le MELCC obtienne une estimation uniforme de la recharge avec la même méthode pour toutes les régions ayant fait l'objet de projets régionaux de caractérisation hydrogéologique (PACES et autre). La méthode utilisée pour estimer la recharge devrait avoir un fondement physique et produire une estimation spatialement distribuée ainsi que permettre l'usage de simulations climatiques en plus des données météorologiques afin d'estimer la recharge historique ainsi qu'en climat futur. Le MELCC devrait aussi se doter des capacités de produire régulièrement une estimation de l'usage de l'eau (de surface et souterraine). Il serait alors possible de produire régulièrement (à intervalle quinquennal) une mise à jour de la recharge et de l'usage de l'eau souterraine, en plus des indicateurs de stress sur l'eau souterraine aux échelles municipale et intramunicipale. La réalisation de tels travaux va aussi nécessiter de garder à jour les autres données requises, soient la base de données des grands préleveurs d'eau (GPE), le SIH, les cartes d'utilisation du sol et la grille météorologique. Nos travaux ont montré que la base de données des GPE a particulièrement besoin de vérifications détaillées pour assurer la cohérence de ses informations.

Globalement, les travaux réalisés ont permis d'identifier une approche intéressante pour définir l'état des nappes ainsi que des indicateurs permettant de caractériser les ressources en eau souterraine et leur exploitation. L'application de ces outils à tout le Québec municipalisé permettrait une meilleure gestion de ces ressources. La production d'autres indicateurs pourrait aussi être d'intérêt, tel qu'un indicateur des problématiques d'approvisionnement en eau souterraine et un indicateur de qualité de l'eau souterraine. En plus des indicateurs de stress, d'autres indicateurs de gestion durable devraient être considérés pour identifier les régions du Québec nécessitant un encadrement actif de l'exploitation de l'eau souterraine.

TABLE DES MATIÈRES

1	CONTEXTE ET OBJECTIFS	2
1.1	Le besoin de protection des ressources en eau souterraine	2
1.2	Le défi de la communication aux parties prenantes	2
1.2.1	<i>Défis de gestion des eaux souterraines</i>	<i>3</i>
1.2.2	<i>Défis de communication aux acteurs de l'eau.....</i>	<i>3</i>
1.3	Rôles des indicateurs de gestion durable.....	4
1.4	Mandat pour la production d'indicateurs de stress hydrique.....	4
2	INDICATEURS DE GESTION DURABLE DES EAUX SOUTERRAINES	6
2.1	Objectifs de gestion durable	6
2.2	Évaluation des indicateurs de gestion durable.....	6
2.3	Description des principaux indicateurs	7
2.3.1	<i>Ressources en eau souterraine renouvelables per capita</i>	<i>8</i>
2.3.2	<i>Exploitation totale / Recharge.....</i>	<i>9</i>
2.3.3	<i>Prélèvements totaux / Ressources exploitables</i>	<i>9</i>
2.3.4	<i>Pourcentage de l'eau souterraine dans l'usage total de l'eau d'un pays</i>	<i>10</i>
2.3.5	<i>Épuisement des ressources en eau souterraine</i>	<i>10</i>
2.3.6	<i>Exploitation des ressources non renouvelables.....</i>	<i>11</i>
2.3.7	<i>Vulnérabilité de l'eau souterraine.....</i>	<i>12</i>
2.3.8	<i>Densité des activités anthropiques dans les zones vulnérables.....</i>	<i>12</i>
2.3.9	<i>Qualité de l'eau souterraine.....</i>	<i>13</i>
2.3.10	<i>Besoins de traitement de l'eau souterraine</i>	<i>15</i>
2.3.11	<i>Dépendance des populations agricoles sur l'eau souterraine</i>	<i>17</i>
2.3.12	<i>Densité de puits résidentiels dans les zones vulnérables</i>	<i>17</i>
2.3.13	<i>Lien entre milieux humides et eaux souterraines</i>	<i>17</i>
2.3.14	<i>Détermination du débit de base assurant la viabilité des écosystèmes</i>	<i>18</i>
2.3.15	<i>Usages de l'eau souterraine.....</i>	<i>18</i>
2.3.16	<i>Efficacité de l'utilisation de l'eau souterraine.....</i>	<i>18</i>
2.3.17	<i>Indicateurs de bonne gouvernance.....</i>	<i>18</i>
3	INDICATEURS DE STRESS HYDRIQUE.....	20
3.1	Inventaire des indicateurs de stress hydrique	20
3.2	Sélection des indicateurs de stress hydrique à tester	20
3.2.1	<i>Baseline Water Stress (prélèvements / débit total).....</i>	<i>20</i>
3.2.2	<i>Interannual variability (écart-type/moyenne approvisionnements)</i>	<i>20</i>
3.2.3	<i>Drought Severity (précipitations – ETP).....</i>	<i>20</i>
3.2.4	<i>Groundwater stress (prélèvements / recharge)</i>	<i>28</i>
3.2.5	<i>Resilience.....</i>	<i>28</i>
3.2.6	<i>Groundwater Quality</i>	<i>29</i>
3.2.7	<i>Public Perceptions of Water.....</i>	<i>29</i>
3.2.8	<i>Indice de résistance à la sécheresse (IRIS)</i>	<i>29</i>
3.2.9	<i>Tableaux synthèse des indicateurs de stress hydrique</i>	<i>29</i>
3.3	Combinaison d'indicateurs et classement des régions	32
3.4	Indicateurs locaux.....	32
4	APPLICATION DES INDICATEURS DE STRESS HYDRIQUE	33
4.1	Élaboration d'une base de données spatialisée sur grille	33

4.2	Mise en forme des cartes d'indicateurs	34
5	STRESS HYDRIQUE DE BASE (USAGE/DÉBIT)	37
5.1	Produits préliminaires pour l'indicateur de stress hydrique de base	37
5.2	Analyse de l'indicateur de stress hydrique de base	39
5.2.1	<i>Calcul par bassin versant.....</i>	39
5.2.2	<i>Calcul par portion de bassin versant</i>	40
5.3	Apports et limitations de l'indicateur de stress hydrique de base	40
6	STRESS SUR L'EAU SOUTERRAINE (USAGE/RECHARGE).....	48
6.1	Produits préliminaires pour l'indicateur de stress sur l'eau souterraine.....	48
6.2	Analyse de l'indicateur de stress sur la ressource en eau souterraine	48
6.3	Municipalités avec un important stress sur l'eau souterraine.....	55
6.4	Apports et limitations de l'indicateur de stress sur l'eau souterraine.....	56
7	INDICATEURS CLIMATIQUE ET PIÉZOMÉTRIQUE	58
7.1	Conditions climatiques et niveaux d'eau souterraine.....	58
7.2	Indicateurs climatique et piézométrie.....	61
7.3	Relation avec les paramètres hydrologiques	62
7.4	Apports et limitations des indicateurs climatique et piézométrie.....	64
8	DÉFINITION DES SECTEURS HYDROCLIMATIQUES	65
8.1	Définition des contextes hydroclimatiques sur le sud du Québec	66
8.1.1	<i>Objectifs.....</i>	66
8.1.2	<i>Territoire d'application.....</i>	66
8.1.3	<i>Élaboration des cartes de base.....</i>	66
8.1.4	<i>Définition des secteurs hydroclimatiques.....</i>	68
8.1.5	<i>Caractérisation des secteurs hydroclimatiques.....</i>	71
8.2	Mise en forme des fiches descriptives de chaque secteur hydroclimatique	73
8.3	Description des divers secteurs hydroclimatiques identifiés.....	76
8.4	Avantages et limitations de la procédure de définition des secteurs hydroclimatiques.....	79
8.5	Intégration des secteurs hydroclimatiques pour produire l'indicateur climatique.....	80
8.6	Perspectives liées à la définition des secteurs hydroclimatiques.....	82
9	USAGE INTRAMUNICIPAL DE L'EAU SOUTERRAINE.....	83
9.1	Démarche de définition de l'indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine	83
9.2	Traitement des données sur les grands préleveurs d'eau (GPE)	86
9.2.1	<i>Traitement préliminaire des déclarations originales et création d'un numéro unique.....</i>	86
9.2.2	<i>Traitement spécifique de la BD des GPE pour la Montérégie Est.....</i>	87
9.2.3	<i>Analyse des données issues de la BD des GPE</i>	89
9.3	Élaboration des grilles d'usage.....	91
9.3.1	<i>Usage total réseau.....</i>	91
9.3.2	<i>Usage agricole hors-réseau</i>	91
9.3.3	<i>Usage ICI hors-réseau</i>	94
9.3.4	<i>Usage résidentiel hors-réseau.....</i>	94
9.3.5	<i>Usage total</i>	96
9.3.6	<i>Production des grilles finales.....</i>	96
9.4	Production de l'indicateur intramunicipal et définition de seuils d'usage	102
9.5	Apports et limitations de l'indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine.....	106

10	STRESS SUR L'EAU SOUTERRAINE PAR SOUS-BASSIN	108
10.1	Définition des indicateurs de stress sur l'eau souterraine par bassin	108
10.2	Application à la Montérégie Est	110
10.3	Planche cartographique pour l'analyse des indicateurs de stress sur l'eau souterraine	123
11	APPLICABILITÉ À L'ENSEMBLE DU QUÉBEC MUNICIPALISÉ	125
11.1	Estimation de l'usage de l'eau souterraine par les projets régionaux antérieurs	125
11.2	Estimation de la recharge de l'eau souterraine par les projets régionaux antérieurs	130
11.3	Recommandations pour la production d'indicateurs sur tout le Québec municipalisé	134
12	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	136
13	BIBLIOGRAPHIE	138

ANNEXES

Annexe 1 :	Élaboration d'une base de données spatialisée sur grille	146
Annexe 2 :	Production de l'indicateur de stress hydrique de base	154
Annexe 3 :	Production de l'indicateur de stress sur l'eau souterraine	164
Annexe 4 :	Cartes utilisées pour la définition des contextes hydroclimatiques	171
Annexe 5 :	Définition des secteurs hydroclimatiques au sud du Québec	188
Annexe 6 :	Fiches informatives élaborées pour chaque secteur hydroclimatique	196
Annexe 7 :	Planches cartographiques élaborées pour chaque secteur hydroclimatique	209
Annexe 8 :	Traitement de la base de données des grands préleveurs d'eau	222
Annexe 9 :	Production de l'indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine.....	241
Annexe 10 :	Cartes produites lors de l'élaboration de l'indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine	267
Annexe 11 :	Cartes des indicateurs de stress sur l'eau souterraine appliqués sur les limites naturelles (bassins hydrogéologiques de niveau 1)	290
Annexe 12 :	Statistiques descriptives et bilan des bassins hydrogéologiques de niveau 2 en Montérégie Est	295
Annexe 13 :	Protocole de production des divers indicateurs de stress sur l'eau souterraine en considérant les limites naturelles (bassins hydrogéologiques de niveau 2)	301
Annexe 14 :	Légende la planche cartographique pour l'analyse des indicateurs de stress sur l'eau souterraine	308
Annexe 15 :	Comparatif des méthodologies employées selon les projets régionaux antérieurs pour estimer l'usage de l'eau souterraine au Québec	310
Annexe 16 :	Comparatif des méthodologies employées selon les projets régionaux antérieurs pour estimer la recharge de l'eau souterraine au Québec	316

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Inventaire des indicateurs de stress hydrique suggérés dans la littérature.....	21
Tableau 3.2 : Grille de critères pour sélectionner les indicateurs à produire au Québec	28
Tableau 3.3 : Informations d'intérêt pour évaluer le stress hydrique d'après Martin et al. (2013) et le PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013a).....	30
Tableau 3.4 : Indicateurs de stress hydrique recommandés (voir tableau 3.1 et les sections précédentes pour la définition des indicateurs)	31
Tableau 5.1 : Stations hydrométriques et tronçons de l'Atlas hydroclimatique sélectionnés pour le calcul de l'indicateur hydrologique	37
Tableau 8.1 : Caractéristiques du territoire concerné par la définition des contextes hydroclimatiques et anciens projets de caractérisation hydrogéologique régionaux recoupés	66
Tableau 8.2 : Organismes de bassins versants inclus au sein de la région d'étude	67
Tableau 8.3 : Caractéristiques physiographiques et stations de suivi des secteurs hydroclimatiques.....	77
Tableau 8.4 : Normales climatiques des secteurs hydroclimatiques	77
Tableau 8.5 : Valeurs de l'indice SPI.....	80
Tableau 9.1 : Ensemble des GPE retenus après la phase traitement des données initiales	89
Tableau 9.2 : Bilan des GPE conservés pour le Québec lors de la définition de GPE permanents.....	89
Tableau 9.3 : Bilan des GPE conservés pour la Montérégie Est lors de la définition de GPE permanents	90
Tableau 9.4 : Catégories générales d'utilisation du territoire en Montérégie Est	93
Tableau 9.5 : Catégories du projet « pesticides » d'utilisation du territoire en Montérégie Est	93
Tableau 9.6 : Synthèse des municipalités au regard de l'usage agricole végétal et des surfaces maraichères en Montérégie Est.....	94
Tableau 9.7 : Distribution de la densité de puits résidentiels en Montérégie Est.....	95
Tableau 10.1 : Comparatif des surfaces de définition de l'indicateur de stress sur l'eau souterraine.....	110
Tableau 10.2 : Quantité de ressource disponible (recharge de l'eau souterraine) en Montérégie Est pour les bassins hydrogéologiques de niveau 1	112
Tableau 10.3 : Niveau d'usage (usage absolu de l'eau souterraine) en Montérégie Est pour les bassins hydrogéologiques de niveau 1	112
Tableau 10.4 : Aspect durable de l'exploitation des eaux souterraines (ratio usage/recharge) en Montérégie Est pour les bassins hydrogéologiques de niveau 1.....	112
Tableau 10.5 : Niveau des ressources en eau souterraine après exploitation (recharge effective) en Montérégie Est pour les bassins hydrogéologiques de niveau 1	112

Tableau 10.6 : Statistiques descriptives (aire et points de prélèvement) des bassins hydrogéologiques de niveau 1 en Montérégie Est (1/2)	113
Tableau 10.7 : Statistiques descriptives (indicateurs de stress sur l'eau souterraine) des bassins hydrogéologiques de niveau 1 en Montérégie Est (2/2).....	114
Tableau 10.8 : Quantité de ressource disponible (recharge de l'eau souterraine) en Montérégie Est pour les bassins hydrogéologiques de niveau 2	116
Tableau 10.9 : Niveau d'usage (usage absolu de l'eau souterraine) en Montérégie Est pour les bassins hydrogéologiques de niveau 2	116
Tableau 10.10 : Aspect durable de l'exploitation des eaux souterraines (ratio usage/recharge) en Montérégie Est pour les bassins hydrogéologiques de niveau 2.....	116
Tableau 10.11 : Niveau des ressources en eau souterraine après exploitation (recharge effective) en Montérégie Est pour les bassins hydrogéologiques de niveau 2	116
Tableau 11.1 : Synthèse des estimés d'usage produits par les projets régionaux antérieurs (1/2)	128
Tableau 11.2 : Synthèse des estimés d'usage produits par les projets régionaux antérieurs (2/2)	129
Tableau 11.3 : Synthèse des estimés de recharge produits par les projets régionaux antérieurs.....	131

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Démarche de production et d'usage des indicateurs proposée par Martin et al. (2013)	7
Figure 4.1 : Planche cartographique formatée pour visualiser les indicateurs de stress hydrique – Cas particulier de la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu.....	36
Figure 5.1 : Position des sources de données de débit sélectionnées et des bassins drainés : (a) stations de jaugeage (cercle rouge) et bassins drainés (polygone rouge) et (b) tronçons de l'Atlas hydroclimatique 2018 (ligne bleue) et bassins drainés (polygone violet)	38
Figure 5.2 : Comparaison du calcul du débit de base avec les filtres de Chapman et d'Eckhardt pour deux stations de jaugeage : (a) station 030345 et (b) station 030421.....	38
Figure 5.3 : Usage totale de l'eau pour chaque bassin versant.....	42
Figure 5.4 : Débit total pour chaque bassin versant	43
Figure 5.5 : Débit de base calculé à l'aide du filtre de Chapman pour chaque bassin versant.....	44
Figure 5.6 : Stress hydrique de base en 2010 calculé par rapport au débit total des cours d'eau.....	45
Figure 5.7 : Stress hydrique de base en 2010 calculé par rapport au débit de base des cours d'eau.....	46
Figure 5.8 : Stress hydrique de base en 2010 calculé pour les bassins partiels.....	47
Figure 6.1 : Indicateur de stress sur l'eau souterraine par municipalité : (a) Exploitation de l'eau souterraine (m^3/an) ; (b) Recharge de l'aquifère rocheux régional (m^3/an) ; (c) Indicateur de la proportion de recharge utilisée (%) – Cas particulier de la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu	49
Figure 6.2 : Indicateur de stress sur l'eau souterraine par MRC : (a) Exploitation de l'eau souterraine (m^3/an) ; (b) Recharge de l'aquifère rocheux régional (m^3/an) ; (c) Indicateur de la proportion de recharge utilisée (%) – Cas particulier de la MRC du Haut-Richelieu.....	50
Figure 6.3 : Indicateur de stress sur l'eau souterraine par bassin versant de niveau 1 : (a) Exploitation de l'eau souterraine (m^3/an) ; (b) Recharge de l'aquifère rocheux régional (m^3/an) ; (c) Indicateur de la proportion de recharge utilisée (%) – Cas particulier du bassin versant de la rivière Richelieu (niveau 1)	51
Figure 6.4 : Indicateur de stress sur l'eau souterraine par bassin versant de niveau 2 : (a) Exploitation de l'eau souterraine (m^3/an) ; (b) Recharge de l'aquifère rocheux régional (m^3/an) ; (c) Indicateur de la proportion de recharge utilisée (%) – Cas particulier du bassin versant de la rivière de la Barbotte (niveau 2).....	52
Figure 7.1 : Indicateur climatique et niveaux d'eau souterraine à Pont-Rouge : (a) Précipitations totales annuelles et leur moyenne (trait vert) ; (b) niveaux d'eau mensuels (trait bleu) et moyennes annuelles (losange rouge) ; (c) écart des précipitations totales par rapport à la moyenne	59
Figure 7.2 : Indicateur climatique et niveaux d'eau souterraine à Saint-Rémi : (a) Précipitations totales annuelles et leur moyenne (trait vert) ; (b) niveaux d'eau mensuels (trait bleu) et moyennes annuelles (losange rouge) ; (c) écart des précipitations totales par rapport à la moyenne	60
Figure 7.3 : Tendances temporelles des niveaux d'eau moyens annuels au puits de Saint-Rémi	60

Figure 7.4 : Comparaison des écarts normalisés des précipitations et des niveaux d'eau pour les puits de Pont-Rouge (a) et de Saint-Rémi (b).....	61
Figure 7.5 : Localisations de la station météorologique Farnham (7022320), de la station de jaugeage 030345 et du tronçon MON0016 de l'Atlas hydroclimatique du Québec. Les polygones montrent que les sous-bassins correspondant à la station de jaugeage et au tronçon sont très similaires	62
Figure 7.6 : Comparaison des écarts normalisés des précipitations à la station météorologique de Farnham (7022320) avec des variables hydrologiques pour la station de jaugeage 030345 et l'Atlas hydroclimatique pour le tronçon de cours d'eau MON0016 dans un sous-bassin de la rivière Yamaska	63
Figure 8.1 : Normales climatiques (1981-2010) selon la zone (seuil fixé à 200 m/NMM) : (a) précipitations totales moyennes annuelles et (b) températures moyennes annuelles.....	69
Figure 8.2 : Normales climatiques (1981-2010) selon la zone (seuil fixé à 1 150 mm/an) : (a) précipitations totales moyennes annuelles et (b) températures moyennes annuelles.....	70
Figure 8.3 : Statistiques descriptives (minimum, maximum et moyenne) des normales climatiques (1981-2010) des différents secteurs hydroclimatiques par rapport à l'ensemble du sud du Québec (PACC).....	72
Figure 8.4 : Fiche descriptive formatée pour visualiser les informations relatives aux secteurs hydroclimatiques (1/2) – Cas particulier du secteur Nicolet Nord & Saint-François Nord	74
Figure 8.5 : Planche cartographique formatée pour visualiser les informations relatives aux secteurs hydroclimatiques (2/2) – Cas particulier du secteur Nicolet Nord & Saint-François Nord	75
Figure 8.6 : Normales climatiques (1981-2010) selon le secteur hydroclimatique : (a) précipitations totales moyennes annuelles et (b) températures moyennes annuelles	78
Figure 8.7 : Exemple de SPI sur 6 mois calculé sur une maille arbitraire de la grille Info-climat.....	81
Figure 9.1 : Processus de production de l'indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine	85
Figure 9.2 : Exemple d'incohérences constatées dans la base de données des GPE.....	87
Figure 9.3 : Distribution des GPE retenus (n = 330) après la phase de traitement des données initiales....	88
Figure 9.4 : Ensemble des grands préleveurs d'eau souterraine et des captages municipaux d'importance en Montérégie Est	92
Figure 9.5 : Distribution de la densité de puits résidentiels en Montérégie Est	95
Figure 9.6 : Usage total réseau de l'eau souterraine en Montérégie Est	97
Figure 9.7 : Usage agricole hors-réseau de l'eau souterraine et grands préleveurs agricoles d'eau souterraine en Montérégie Est.....	98
Figure 9.8 : Usage ICI hors-réseau de l'eau souterraine en Montérégie Est	99
Figure 9.9 : Usage résidentiel hors-réseau de l'eau souterraine et puits résidentiels en Montérégie Est ..	100
Figure 9.10 : Usage total de l'eau souterraine en Montérégie Est.....	101
Figure 9.11 : Indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine en Montérégie Est.....	103
Figure 9.12 : Exemple d'indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine sur la ville de Granby .	105

Figure 10.1 : Carte de la recharge utilisée pour produire l'indicateur de quantité de ressource disponible en Montérégie Est (voir figure 10.3).....	117
Figure 10.2 : Carte de l'usage total lissé utilisée pour produire l'indicateur de niveau d'usage absolu en Montérégie Est (voir figure 10.4).....	118
Figure 10.3 : Quantité de ressource disponible (recharge) par bassin hydrogéologique de niveau 2 en Montérégie Est	119
Figure 10.4 : Niveau d'usage absolu (usage) par bassin hydrogéologique de niveau 2 en Montérégie Est	120
Figure 10.5 : Niveau relatif d'exploitation (ratio usage/recharge) par bassin hydrogéologique de niveau 2 en Montérégie Est	121
Figure 10.6 : Niveau des ressources après exploitation (recharge effective) par bassin hydrogéologique de niveau 2 en Montérégie Est	122
Figure 10.7 : Exemple de planche permettant de visualiser les indicateurs de stress sur l'eau souterraine (A : recharge ; B : usage ; C : ratio usage/recharge et D : recharge effective) à l'échelle régionale au 1 : 1 000 000 (ici : en Montérégie Est) et comprenant une carte au 1 : 100 000 offrant un niveau de détail supplémentaire (E : indicateur intramunicipal) sur chaque municipalité (ici : cas de la ville de Granby)	124
Figure 11.1 : Données de recharge disponibles en 2021 pour les secteurs couverts par les projets régionaux antérieurs	133

Liste des tableaux en annexe

Tableau A.2.1 : Champs conservés pour la grille simplifiée d'utilisation de l'eau (XYGrilleUsage_ponctuel.shp)	154
Tableau A.2.2 : Données brutes reçues pour l'Atlas hydroclimatique 2018	155
Tableau A.2.3 : Fichiers produits pour l'extraction des polygones de bassins versants par tronçon	156
Tableau A.2.4 : Stations de jaugeage utilisables et sélectionnées pour le calcul du stress hydrique de base	157
Tableau A.2.5 : Tronçons de l'Atlas hydroclimatique 2018 sélectionnés pour le calcul du stress hydrique de base	157
Tableau A.2.6 : Production des polygones de bassin versant (BV) partiel	158
Tableau A.2.7 : Fichiers utilisés et produits pour le calcul de l'usage de l'eau par bassin versant	159
Tableau A.2.8 : Description des calculs de l'onglet Q_quotidien du fichier Traitement_Qtotal.xlsx	160
Tableau A.2.9 : Description des calculs de l'onglet Q_annuel du fichier Traitement_Qtotal.xlsx	161
Tableau A.2.10 : Onglets du fichier Traitement_Qtotal.xlsx correspondant à des tables	162
Tableau A.2.11 : Champs à joindre pour associer les tables de débit au shapefile des polygones de bassin versant	162
Tableau A.2.12 : Calculs des différentes versions de l'indicateur de stress hydrique de base	163
Tableau A.5.1 : Synthèse de la phase de découpage des OBV pour obtenir les secteurs hydroclimatiques	194
Tableau A.8.1 : Description des champs de la base de données des grands préleveurs d'eau	222
Tableau A.8.2 : Association des codes SCIAN avec la catégorie d'usage correspondante	225
Tableau A.8.3 : Description des champs de la table des GPE du Québec après la phase de traitement préliminaire des données (GPE_Volume_2015-2016-2017-2018-2019)	226
Tableau A.8.4 : Description de l'indice de confiance attribué à la source de prélèvement	234
Tableau A.8.5 : Description de l'indice de confiance attribué à la méthode de mesure	236
Tableau A.8.6 : Description de l'indice de confiance attribué à la localisation du site	236
Tableau A.8.7 : Description des champs de la table des GPE de la Montérégie Est (GPE_ME_SIG) après la phase de traitement spécifique des données (GPE_Monteregie_Est)	238
Tableau A.9.1 : Description des champs de la grille d'utilisation du territoire de la Montérégie Est (Grille_ME_Uti_Ter_SIG) après la phase de simplification (Utilisation_Territoire)	243
Tableau A.9.2 : Description des champs de la grille de densité des puits résidentiels de la Montérégie Est (Grille_ME_Nb_Puits_Residentiels) après calculs (Grille_ME_Nb_Puits_Residentiels)	248

Tableau A.9.3 : Description des champs de la table d'usage de l'eau par municipalité de la Montérégie Est (Usage_Eau_Sout_Mun_SIG) après formatage (Usage_Eau_Municipalites)	249
Tableau A.9.4 : Municipalités supprimées dans le fichier « Mun_ME »	250
Tableau A.9.5 : Description des champs de la grille traitant des volumes d'eau souterraine prélevés par GPE de la Montérégie Est (Grille_GPE_ME) après estimation (Grille_GPE_ME)	254
Tableau A.9.6 : Description des champs des captages municipaux non déclarés comme GPE en Montérégie Est (Autres_Captages_Mun_ME_SIG) après sélection (Autres_Captages_Mun_ME)	255
Tableau A.9.7 : Description des champs de la grille traitant des volumes d'eau souterraine prélevés par les quelques captages municipaux non déclarés comme GPE en Montérégie Est (Grille_ME_Aut_Cap_Mun_Calcul) après estimation (Grille_Autres_Captages_Municipaux_ME)	258
Tableau A.9.8 : Municipalités avec de l'usage agricole végétale hors-réseau mais aucune surface maraîchère selon la couche d'utilisation du territoire du MELCC produite de 2017	259
Tableau A.9.9 : Description des champs de la grille d'usage agricole hors-réseau en Montérégie Est (Grille_ME_GW_HR_Agr_SIG) après traitement des données (Usage_Eau_Agricole_Hors-Reseau) ...	260
Tableau A.9.10 : Description des champs de la grille d'usage résidentiel hors-réseau en Montérégie Est (Grille_ME_GW_HR_Res_SIG) après traitement des données (Usage_Eau_Residentiel_Hors-Reseau)	261
Tableau A.9.11 : Description des champs de la grille d'usage ICI hors-réseau en Montérégie Est (Grille_ME_GW_HR_ICI_SIG) après traitement des données (Usage_Eau_ICI_Hors-Reseau)	262
Tableau A.9.12 : Description des champs de la grille d'usage total réseau en Montérégie Est (Grille_ME_GW_R_T_SIG) après traitement des données (Usage_Eau_Total_Reseau)	263
Tableau A.9.13 : Description des champs de la grille d'usage total en Montérégie Est (Grille_ME_GW_T_SIG) après assemblage des données des grilles d'usage (Usage_Eau_Total)	265
Tableau A.9.14 : Champs du fichier « Grille_ME_GW_T » utilisés pour la production des rasters d'usage	266
Tableau A.12.1 : Statistiques descriptives (aire, points de prélèvement et indicateurs de stress sur l'eau souterraine) des bassins hydrogéologiques de niveau 2 en Montérégie Est (1/5)	296
Tableau A.12.2 : Statistiques descriptives (aire, points de prélèvement et indicateurs de stress sur l'eau souterraine) des bassins hydrogéologiques de niveau 2 en Montérégie Est (2/5)	297
Tableau A.12.3 : Statistiques descriptives (aire, points de prélèvement et indicateurs de stress sur l'eau souterraine) des bassins hydrogéologiques de niveau 2 en Montérégie Est (3/5)	298
Tableau A.12.4 : Statistiques descriptives (aire, points de prélèvement et indicateurs de stress sur l'eau souterraine) des bassins hydrogéologiques de niveau 2 en Montérégie Est (4/5)	299
Tableau A.12.5 : Statistiques descriptives (aire, points de prélèvement et indicateurs de stress sur l'eau souterraine) des bassins hydrogéologiques de niveau 2 en Montérégie Est (5/5)	300
Tableau A.13.1 : Description des champs des indicateurs selon les bassins versants hydrogéologiques de niveau 2 du raster « Indicateur_Usage_Recharge_BS2 »	307

Tableau A.15.1 : Comparaison des approches utilisées pour estimer l'usage de l'eau souterraine pour les projets antérieurs couvrant la zone PACC (1/2)	311
Tableau A.15.2 : Comparaison des approches utilisées pour estimer l'usage de l'eau souterraine pour les projets antérieurs couvrant la zone PACC (2/2)	312
Tableau A.15.3 : Comparaison des approches utilisées pour estimer l'usage de l'eau souterraine pour les projets antérieurs en dehors de la zone PACC (1/3)	313
Tableau A.15.4 : Comparaison des approches utilisées pour estimer l'usage de l'eau souterraine pour les projets antérieurs en dehors de la zone PACC (2/3)	314
Tableau A.15.5 : Comparaison des approches utilisées pour estimer l'usage de l'eau souterraine pour les projets antérieurs en dehors de la zone PACC (3/3)	315
Tableau A.16.1 : Comparaison des approches utilisées pour estimer la recharge de l'eau souterraine pour les projets antérieurs couvrant la zone PACC	317
Tableau A.16.2 : Comparaison des approches utilisées pour estimer la recharge de l'eau souterraine pour les projets antérieurs en dehors de la zone PACC (1/2)	318
Tableau A.16.3 : Comparaison des approches utilisées pour estimer la recharge de l'eau souterraine pour les projets antérieurs en dehors de la zone PACC (2/2)	319

LISTE DES FIGURES EN ANNEXE

Figure A.3.1 : Démarche de production de l'indicateur de stress sur l'eau souterraine (ici, la recharge de l'aquifère au roc par municipalité) à partir de la grille d'extraction	170
Figure A.5.1 : Démarche de production des cartes des normales climatiques pour le sud du Québec	191
Figure A.5.2 : Démarche de délimitation des secteurs hydroclimatiques pour le sud du Québec	195
Figure A.8.1 : Exemple de lieu (fictif) avec plusieurs sites de prélèvement et des divergences dans les données déclarées selon l'année	223
Figure A.8.2 : Estimation des GPE « permanents » en comparant l'ensemble des GPE de la Montérégie Est déclarés au moins une fois entre 2015 et 2019 (a, c et e) avec ceux uniquement déclarés sur les deux périodes de temps : 2009-2011 à 2015-2019 (b, d et f)	228
Figure A.8.3 : Estimation du volume « représentatif » en comparant les volumes annuels moyens et maximaux pour l'ensemble des GPE du Québec (a, c et e) et de la Montérégie Est (b, d et f) selon la source de prélèvement (eau souterraine ou eau de surface)	231
Figure A.8.4 : Estimation du volume « représentatif » en comparant les volumes annuels moyens et maximaux pour l'ensemble des GPE du Québec (a, c et e) et de la Montérégie Est (b, d et f) selon la catégorie d'usage de l'eau (agricole, ICI ou municipal)	232
Figure A.8.5 : Exemple d'erreur associée à l'attribution de la catégorie d'usage de l'eau	234
Figure A.8.6 : Exemples d'erreurs associées à l'attribution d'une source de prélèvement inadéquate dans la déclaration initiale : (a) cas d'un bassin tampon en milieu agricole, (b) cas d'un golf avec un puits et (c) cas d'une carrière pompant les eaux souterraines	235
Figure A.8.7 : Exemples d'erreurs associées à une localisation inexacte des sites de prélèvement dans la déclaration initiale : (a) cas d'un site mal positionné (initialement en rive sud du fleuve mais réellement sur la rive nord) et (b) cas de plusieurs GPE agricoles pompant l'eau de surface dans un lac à proximité	237
Figure A.8.8 : Comparaison (a) de l'usage total réseau (PACES de Montérégie Est – 2013) avec les GPE municipaux (2015-2019) et (b) de l'usage ICI hors-réseau (PACES de Montérégie Est – 2013) avec les GPE ICI (2015-2019)	240
Figure A.9.1 : Comparaison de la grille d'utilisation du sol avec la résolution initiale au 30 m (a et c) puis après simplification sur une grille au 250 m (b et d) selon les classes générales (a et b) et les classes définies dans le cadre du projet « pesticides » (c et d)	245

LISTE DES CARTES EN ANNEXE

Carte A.4.1 : Limites du territoire concerné par la définition des contextes hydroclimatiques sur le sud du Québec et anciens projets de caractérisation hydrogéologique régionaux recoupés	172
Carte A.4.2 : Provinces géologiques sur le sud du Québec	173
Carte A.4.3 : Subdivisions géologiques sur le sud du Québec	174
Carte A.4.4 : Modèle numérique d'élévation brut sur le sud du Québec	175
Carte A.4.5 : Modèle numérique d'élévation simplifié sur le sud du Québec	176
Carte A.4.6 : Centroïdes des mailles de la grille Info-climat sur le sud du Québec	177
Carte A.4.7 : Précipitations totales moyennes annuelles entre 1981 et 2010 sur le sud du Québec	178
Carte A.4.8 : Températures moyennes annuelles entre 1981 et 2010 sur le sud du Québec	179
Carte A.4.9 : Organismes de bassins versants (OBV) sur le sud du Québec	180
Carte A.4.10 : Précipitations totales moyennes annuelles entre 1981 et 2010 et isolignes à 200 m d'altitude et à 1 150 mm de précipitations annuelles	181
Carte A.4.11 : OBV et isolignes à 200 m d'altitude et à 1 150 mm de précipitations annuelles	182
Carte A.4.12 : Secteurs hydroclimatiques et isolignes à 200 m d'altitude et à 1 150 mm de précipitations annuelles	183
Carte A.4.13 : Secteurs hydroclimatiques sur le sud du Québec	184
Carte A.4.14 : Classement des secteurs hydroclimatiques sur le sud du Québec	185
Carte A.4.15 : Regroupements des secteurs hydroclimatiques sur le sud du Québec au regard des précipitations totales moyennes annuelles	186
Carte A.4.16 : Regroupements des secteurs hydroclimatiques sur le sud du Québec au regard des températures moyennes annuelles	187
Carte A.10.1 : Ensemble des GPE de la Montérégie Est (n = 330)	268
Carte A.10.2 : Ensemble des GPE de la Montérégie Est prélevant les eaux de surface (n = 92)	269
Carte A.10.3 : Ensemble des GPE de la Montérégie Est prélevant les eaux souterraines (n = 238)	270
Carte A.10.4 : Utilisation du territoire initiale selon les classes de catégories générales en Montérégie Est	271
Carte A.10.5 : Utilisation du territoire initiale selon les classes du projet « pesticides » en Montérégie Est	272
Carte A.10.6 : Utilisation du territoire simplifiée selon les classes de catégories générales en Montérégie Est	273

Carte A.10.7 : Utilisation du territoire simplifiée selon les classes du projet « pesticides » en Montérégie Est	274
Carte A.10.8 : Ensemble des puits résidentiels extraits du SIH en Montérégie Est (n = 30 526)	275
Carte A.10.9 : Densité de puits résidentiels en Montérégie Est	276
Carte A.10.10 : Distribution des municipalités au regard de l'usage agricole végétal et des surfaces maraîchères en Montérégie Est	277
Carte A.10.11 : Grille de l'usage total réseau de l'eau souterraine en Montérégie Est	278
Carte A.10.12 : Grille de l'usage agricole végétal hors-réseau de l'eau souterraine en Montérégie Est ...	279
Carte A.10.13 : Grille de l'usage agricole animal hors-réseau de l'eau souterraine en Montérégie Est	280
Carte A.10.14 : Grille de l'usage agricole total hors-réseau de l'eau souterraine en Montérégie Est	281
Carte A.10.15 : Grille de l'usage ICI hors-réseau de l'eau souterraine en Montérégie Est	282
Carte A.10.16 : Grille de l'usage résidentiel hors-réseau de l'eau souterraine en Montérégie Est	283
Carte A.10.17 : Grille de l'usage total de l'eau souterraine en Montérégie Est	284
Carte A.10.18 : Secteurs d'usage total réseau de l'eau souterraine importants en Montérégie Est	285
Carte A.10.19 : Secteurs d'usage agricole hors-réseau de l'eau souterraine importants et GPE agricoles en Montérégie Est	286
Carte A.10.20 : Secteurs d'usage ICI hors-réseau de l'eau souterraine importants en Montérégie Est	287
Carte A.10.21 : Secteurs d'usage résidentiel hors-réseau de l'eau souterraine importants en Montérégie Est	288
Carte A.10.22 : Secteurs d'usage total de l'eau souterraine importants en Montérégie Est	289
Carte A.11.1 : Quantité de ressource disponible (recharge) par bassin hydrogéologique de niveau 1 en Montérégie Est	291
Carte A.11.2 : Niveau d'usage absolu (usage) par bassin hydrogéologique de niveau 1 en Montérégie Est	292
Carte A.11.3 : Niveau relatif d'exploitation (ratio usage/recharge) par bassin hydrogéologique de niveau 1 en Montérégie Est	293
Carte A.11.4 : Niveau des ressources après exploitation (recharge effective) par bassin hydrogéologique de niveau 1 en Montérégie Est	294

LISTE DES FICHES EN ANNEXES

Fiche A.6.1 : Secteur #1 – Chaudière	197
Fiche A.6.2 : Secteur #2 – Saint-François Est	198
Fiche A.6.3 : Secteur #3 – Saint-François Ouest	199
Fiche A.6.4 : Secteur #4 – Nicolet Nord & Saint-François Nord	200
Fiche A.6.5 : Secteur #5 – Nicolet Sud	201
Fiche A.6.6 : Secteur #6 – Richelieu	202
Fiche A.6.7 : Secteur #7 – Bécancour Nord	203
Fiche A.6.8 : Secteur #8 – Bécancour Sud	204
Fiche A.6.9 : Secteur #9 – Du Chêne	205
Fiche A.6.10 : Secteur #10 – Yamaska Nord	206
Fiche A.6.11 : Secteur #11 – Yamaska Sud & Baie Missisquoi	207
Fiche A.6.12 : Secteur #12 – Châteauguay	208

LISTE DES PLANCHES EN ANNEXES

Planche A.7.1 : Secteur #1 – Chaudière	210
Planche A.7.2 : Secteur #2 – Saint-François Est	211
Planche A.7.3 : Secteur #3 – Saint-François Ouest	212
Planche A.7.4 : Secteur #4 – Nicolet Nord & Saint-François Nord	213
Planche A.7.5 : Secteur #5 – Nicolet Sud	214
Planche A.7.6 : Secteur #6 – Richelieu	215
Planche A.7.7 : Secteur #7 – Bécancour Nord	216
Planche A.7.8 : Secteur #8 – Bécancour Sud	217
Planche A.7.9 : Secteur #9 – Du Chêne	218
Planche A.7.10 : Secteur #10 – Yamaska Nord	219
Planche A.7.11 : Secteur #11 – Yamaska Sud & Baie Missisquoi	220
Planche A.7.12 : Secteur #12 – Châteauguay	221

ACRONYMES

AAC	Agriculture et Agroalimentaire du Canada
BD	Base de données
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CAC	Conseil des académies canadiennes
CCME	Conseil canadien des ministres de l'environnement
CEHQ	Centre d'expertise hydrique du Québec
CGC	Commission géologique du Canada
CMQ	Communauté métropolitaine de Québec
COVABAR	Comité de concertation et de valorisation du bassin de la rivière Richelieu
CDWR	California Department of Water Resources
DSPIR	Approche « <i>Driver State Pressure Impact Responses</i> »
ETP	Évapotranspiration potentielle
FPEIR	Approche « Force motrice, Pression, État, Impact et Réponse »
GC	<i>Geomorphic Condition</i>
GDB	<i>Geodatabase</i>
GDI	<i>Groundwater Deficit Index</i>
GGDI	<i>GRACE Groundwater Drought Index</i>
GPE	Grand préleveur d'eau
GRACE	<i>Gravity Recovery and Climate Experiment</i>
GWRR	<i>Renewable Groundwater Resources</i>
ICI	Industriel, commercial et institutionnel
IDPR	Indice de développement et de persistance des réseaux
IHP	<i>International Hydrological Programme</i>
INRS	Institut national de la recherche scientifique
IRIS	Indice de résistance à la sécheresse
IUCN	<i>International Union for Conservation of Nature</i>
LQE	Loi sur la qualité de l'environnement
MAMROT	Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire du Québec
MAPAQ	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
MDDEFP	Ministère du Développement durable, Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec
MDDELCC	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MRC	Municipalité régionale de comté

NADM	<i>North American Drought Monitor</i>
OBV	Organisme de bassin versant
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
OSSC	Outil de surveillance des sécheresses au Canada
PACC	Plan d'Action sur les changements climatiques
PACES	Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines
PDE	Plan directeur de l'eau
REL	<i>Reliability</i>
RES	<i>Resilience</i>
RGP	Registre des grands préleveurs
RSESQ	Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec
SAGO	Système d'aide à la gestion des opérations
SDA	Système sur les découpages administratifs
SI	<i>Sustainability Index</i>
SIG	Système d'information géographique
SIH	Système d'information hydrogéologique
TNO	Territoire non organisé
UNESCO	<i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>
UL	Université Laval
UQAC	Université du Québec à Chicoutimi
UQAM	Université du Québec à Montréal
UQAR	Université du Québec à Rimouski
UQAT	Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue
UQTR	Université du Québec à Trois-Rivières
VUL	<i>Vulnerability</i>
WESA	<i>Water and Earth Science Associates</i>
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>
WRI	<i>World Resources Institute</i>
WWAP	<i>World Water Assessment Programme</i>

1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

1.1 Le besoin de protection des ressources en eau souterraine

D'après l'*International Hydrological Programme* (IHP) et le *World Water Assessment Programme* (WWAP), le rôle des eaux souterraines est reconnu dans l'évaluation globale des ressources en eau de la planète. Les eaux souterraines doivent être prises en compte comme composante hydrologique importante des bassins versants et doivent être intégrées dans les politiques économiques, sociales et écologiques. Il est important qu'elles soient incluses dans les politiques liées à son utilisation et aux conséquences de cette utilisation (UNESCO, 2007).

L'exploitation intensive des aquifères affecte les débits des cours d'eau, les sources, les zones humides, les niveaux piézométriques, le stockage des eaux souterraines et l'interface eau de surface-eau souterraine. Elle peut également produire un affaissement du sol (UNESCO, 2007).

La gestion intégrée de l'eau souterraine de façon durable est rendue possible grâce à la politique de l'eau et aux contraintes sociales et économiques. L'objectif est d'assurer la quantité, la qualité et la durabilité des eaux souterraines. L'eau souterraine est une source importante de vie notamment par sa consommation en eau potable mais aussi une source de développement économique par son utilisation dans les industries et les activités agricoles (UNESCO, 2007).

Au Québec, l'eau souterraine constitue une source importante d'eau potable. Cette eau est utilisée par 25% de la population qui consomme près de 500 milliards de litres d'eau par an (MELCC, 2019c) pour différents usages : agricole, résidentiel, institutionnel et industriel. Certaines municipalités n'arrivent pas à s'approvisionner suffisamment en eau souterraine pour leur alimentation en eau potable et d'autres s'inquiètent de la vulnérabilité de leurs nappes qui sont surexploitées (M'Couezou, 2018). Il est alors important de répondre à ces inquiétudes en appliquant une meilleure gestion de l'eau souterraine.

Le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) est responsable de la gestion et de la protection des ressources en eau du Québec. Dans le cadre de ses obligations, le Ministre responsable du MELCC doit s'assurer que les ressources en eau souterraine soient disponibles en quantité suffisante et en qualité adéquate pour les usages actuels (approvisionnement en eau potable, protection des écosystèmes dépendants, activités socio-économique) et qu'elles le seront pour les usages futurs. Dans cette perspective, le Ministre doit mettre en œuvre un cadre de gestion qui permettra une utilisation durable des ressources en eau souterraine en considérant le principe de précaution et les effets anticipés des changements climatiques.

Pour qu'une gestion intégrée de l'eau au Québec soit faite dans l'optique d'être durable, il faut que les actions et les outils utilisés soient menés conjointement par le gouvernement et les instances locales et régionales (MELCC, 2019b). La participation des citoyens dans la gestion intégrée de l'eau est indispensable pour pouvoir mener à bien les actions prises par les différents acteurs de l'eau. Ils peuvent prendre part aux consultations ou encore devenir membre des organismes (MELCC, 2019b).

1.2 Le défi de la communication aux parties prenantes

L'eau souterraine au Québec est généralement présente en quantité suffisante pour répondre aux besoins de la population. Toutefois, les mesures prises pour protéger cette ressource sont souvent insatisfaisantes. De plus, la répartition inégale de l'eau provoque des conflits d'usage qui ne devraient qu'aller en augmentant, notamment en contexte de changement climatique. La proposition d'un nouvel usage pour une nappe peut déclencher de fortes oppositions (MELCC, 2019a).

La gestion de l'eau concerne donc beaucoup d'intervenants et d'usages. Dans cette perspective, la gestion efficace de l'eau souterraine doit être effectuée en collaboration avec les différents acteurs de l'eau, qui consistent au Québec en huit ministères du gouvernement québécois, 1 306 municipalités locales, 96 Municipalités régionales de comté (MRC), trois communautés urbaines (de Québec, de Montréal et d'Outaouais) et huit ministères fédéraux (MELCC, 2019a).

1.2.1 Défis de gestion des eaux souterraines

Différents intervenants agissent dans la gestion des eaux souterraines. Leurs besoins en données sont différents, de même que leurs processus de collecte et de diffusion de ces données (CCME, 2017). En effet, la collecte va dépendre de la superficie du secteur d'étude et des ressources disponibles ainsi que des intérêts portés par les intervenants (CCME, 2017). Des priorités vont être définies selon les conditions et les pressions auxquelles font face les acteurs de l'eau (CCME, 2017).

Un seul intervenant ne pourrait pas rassembler, analyser puis enregistrer toutes les données utilisées pour une étude scientifique visant à assurer la pérennité des ressources en eau souterraine. La gestion des eaux souterraines doit être faite en prenant en compte les objectifs des acteurs locaux afin de renforcer la production de résultats qui seront plus utiles et plus faciles à communiquer (CCME, 2017).

Dans une activité portant sur la gestion des eaux souterraines, il est important que l'équipe soit pluridisciplinaire (professionnels en hydrogéologie, ingénieurs, biologistes, agronomes, économistes, spécialistes en aménagement du territoire, etc.) et issue de différents organismes (ministères, universités, municipalités régionales de comté (MRC), organismes de bassin versant (OBV)) (CCME, 2017). Les financements sont très importants pour réaliser ce projet à long terme dans le but d'avoir une gestion optimale des ressources. Ces projets doivent être réalisés à long terme puisque les problématiques hydrogéologiques évoluent lentement.

1.2.2 Défis de communication aux acteurs de l'eau

La communication sur la gestion des eaux souterraines doit se faire auprès des différents acteurs de l'eau (*stakeholders*), intervenants, partenaires de projets, décideurs et responsables des politiques liés à l'eau (CCME, 2017). Il est important de communiquer du début à la fin avec eux afin de connaître leurs opinions sur des enjeux particuliers, comprendre leurs besoins et savoir si les résultats correspondent à leurs attentes.

Il est parfois difficile de communiquer les résultats de projet de gestion des eaux souterraines aux acteurs de l'eau. Cela relève d'une tâche délicate de leur communiquer les résultats en employant des mots simples mais traduisant bien les termes techniques. Les acteurs ont parfois des difficultés à bien saisir les informations présentées ou à décider des mesures de gestion à prendre par la suite (CCME, 2017).

Pour une bonne communication, l'équipe s'occupant de la gestion des eaux souterraines doit décider des informations utiles à fournir aux parties prenantes en créant un plan de communication (CCME, 2017) qui décrit les problématiques et les objectifs à atteindre. Dans le cadre des projets d'acquisition de connaissance des eaux souterraines (PACES) antérieurs menés par l'INRS, les modèles conceptuels et les indicateurs de gestion durable ont été utilisés pour aider à communiquer l'état des ressources régionales en eau souterraine aux acteurs de l'eau (Lefebvre et al., 2013 ; Lefebvre et al., 2016). De tels indicateurs ont aussi servi à supporter l'intégration des résultats techniques d'un projet PACES dans le plan directeur d'un organisme de bassin versant (M'Couezou, 2018). Le MELCC a aussi soutenu le développement d'ateliers réalisés par le Réseau québécois sur les eaux souterraines (RQES) et visant spécifiquement à faire le transfert des connaissances produites par le PACES aux acteurs de l'eau (<https://rqes.ca/strategie-de-transfert-dechange-de-connaissances-eaux-souterraines-2/>).

1.3 Rôles des indicateurs de gestion durable

Les indicateurs de gestion durable des eaux souterraines donnent des informations sur l'état des aquifères, aident à analyser l'étendue des impacts anthropiques sur la ressource en eau souterraine, facilitent la communication au public et permettent la création de politiques sur la gestion durable des eaux souterraines (UNESCO, 2007). Les indicateurs de gestion durable participent à l'amélioration de la politique de gestion des ressources en eau en améliorant l'évaluation des ressources en eau et en déterminant les problèmes et leurs causes (UNESCO, 2007).

Les indicateurs de gestion durable servent à décrire l'état de la ressource. Les séries de mesures des indicateurs enregistrées régulièrement apportent des informations sur le fonctionnement du système aquifère et les simplifient ou ils apportent des informations sur la réponse du système à la gestion (UNESCO, 2007). Ils servent aussi à la communication puisque ce sont des outils aidant à transmettre les objectifs et les résultats d'une politique aux différents groupes d'utilisateurs de l'eau de manière simple et claire (Lefebvre et al., 2016). De plus, ils peuvent servir à prédire l'évolution future du système aquifère grâce à l'utilisation de modèles. L'élaboration d'indicateurs est rendue possible grâce au principe de développement durable indiquant si les ressources doivent être utilisées pour répondre aux besoins actuels et d'en assurer leur pérennité (M'Couezou, 2018).

Le Conseil des académies canadiennes (CAC, 2009) avait recommandé la production d'indicateurs pour répondre aux objectifs de gestion durable des ressources en eau souterraine. Le Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME) a alors développé un projet pilote afin d'évaluer les indicateurs de gestion durable pouvant s'adapter à l'hydrogéologie de quelques régions au Canada, notamment au Québec (CCME, 2011 ; WESA, 2013). Des indicateurs de gestion durable des ressources en eau souterraine ont été produits à partir des données du PACES de la région de Montérégie Est dans le cadre d'un projet pilote (Lefebvre et al., 2013 ; Martin et al., 2013). Par la suite, M'Couezou (2018) a aussi utilisé les indicateurs de gestion durable dans le bassin versant de la rivière Richelieu afin que les résultats du projet PACES Montérégie Est soient intégrés dans le Plan directeur de l'eau de l'OBV de ce bassin (COVABAR).

1.4 Mandat pour la production d'indicateurs de stress hydrique

Au Québec, les efforts ont surtout été concentrés au cours des années précédentes sur le développement de la connaissance sur la ressource en eau souterraine. Pour maximiser les retombées de cette connaissance et permettre une gestion éclairée de la ressource en eau, des indicateurs doivent être élaborés et s'intégrer au cadre de gestion actuel. Une revue des cadres de gestion des ressources en eau souterraine d'autres juridictions a été produite pour les besoins de ce projet dans le but d'aider à l'identification des indicateurs. Cette revue a fait l'objet d'un rapport indépendant (Domaine, 2019). Le présent rapport s'attarde uniquement à la revue des indicateurs de gestion durable, notamment ceux concernant le stress hydrique.

L'élaboration de certains indicateurs de gestion durable a été examinée dans le cadre d'un projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (Martin et al., 2013). Les indicateurs facilitent l'interprétation de l'état des ressources et le suivi de l'évolution des tendances observées. Certains de ces indicateurs sont déjà considérés comme potentiellement très utiles à court terme, mais demandent à être examinés plus en détail pour des applications à plus long terme, ce qui constitue la raison d'être de ce projet. Le MELCC a décidé de compléter cette démarche par le développement d'indicateurs pour répondre à ses besoins spécifiques de gestion, notamment dans l'analyse des demandes de prélèvement d'eau. Il a constitué un comité composé de membres du MELCC et d'universitaires pour l'aider dans sa démarche.

En premier lieu, les indicateurs doivent donc aider à soutenir les décisions des analystes du MELCC qui doivent évaluer les demandes d'autorisation de prélèvement d'eau souterraine. Il apparaissait donc souhaitable au MELCC que le niveau de stress hydrique des régions du Québec soit d'abord défini pour aider au processus d'autorisation de prélèvement d'eau. Dans cette perspective, le MELCC a donné le mandat à l'INRS de développer des indicateurs de stress hydrique qui seraient pertinents et applicables avec les données disponibles, notamment les données produites par les projets du PACES. Le territoire de la Montérégie Est ayant déjà fait l'objet d'un projet PACES (Carrier et al., 2013a) qui a servi de base à la production d'indicateurs de gestion durable (Martin et al., 2013), la production des indicateurs de stress hydrique sera ainsi testée dans cette région.

Brièvement, les objectifs du projet consistent à :

- Réaliser une revue critique de la littérature des approches utilisées au Canada et à l'étranger pour l'élaboration des indicateurs que ces juridictions utilisent pour évaluer les pressions sur la disponibilité de leurs ressources en eau souterraine, en particulier en contexte d'augmentation de la demande et de la diminution anticipée de la recharge résultant des changements climatiques ;
- Sur la base de la revue de littérature, et en collégialité avec les représentants de la Direction de l'eau potable et des eaux souterraines (DEPES) du MELCC, sélectionner les indicateurs qui s'avèrent pertinents et applicables en fonction des données pour évaluer au Québec les pressions sur les ressources en eau souterraine, ainsi que l'évolution de l'état de ces ressources en tenant compte du climat futur ;
- Développer une méthodologie d'utilisation des indicateurs pertinents pour évaluer les pressions actuelles et futures sur les ressources en eau souterraine du Québec, dans l'analyse des demandes d'autorisation des prélèvements d'eau souterraine, et appliquer la démarche à une zone d'étude qui sera déterminée avec le MELCC en fonction des indicateurs choisis et des données disponibles ;
- Valider la méthodologie sur des secteurs spécifiques où des pressions importantes ou des conflits d'usage ont été rapportés et développer des outils pour faciliter l'analyse ;
- Examiner d'autres paramètres pertinents pour déterminer si leur utilisation faciliterait l'interprétation et l'identification de zones problématiques (*hot spots*) ou pourrait donner un complément d'information à une échelle plus fine ;
- Produire un rapport synthèse de l'information analysée et décrivant la méthodologie proposée et ses avantages et ses inconvénients dans le but d'une application des indicateurs pour d'autres régions du Québec.

Le projet de recherche vise à répondre aux objectifs exprimés par le MELCC pour le développement et l'utilisation d'indicateurs évaluant les pressions sur les ressources en eau souterraine, notamment en contexte de changements climatiques. Il se divise en quatre étapes :

- Étape 1 : Revue critique de la littérature et analyse comparative des approches ;
- Étape 2 : Développement et application d'une méthodologie opérationnelle ;
- Étape 3 : Validation et finalisation des indicateurs ;
- Étape 4 : Rapport synthèse final.

Le présent rapport constitue le rapport final du projet et combine les étapes 1 à 4 du mandat. Un rapport synthèse a également été rédigé afin de résumer les étapes essentielles au développement des indicateurs de stress hydrique et de mettre en évidence les principaux constats et recommandations émis suite à ce travail (Huchet et al., 2021).

2 INDICATEURS DE GESTION DURABLE DES EAUX SOUTERRAINES

2.1 Objectifs de gestion durable

D'après le Conseil des académies canadiennes (CAC, 2009), l'atteinte des cinq objectifs suivants est nécessaire pour assurer la gestion durable de la ressource en eau souterraine :

- Protéger la quantité d'eau souterraine ;
- Protéger la qualité de l'eau souterraine ;
- Préserver la santé des écosystèmes ;
- Assurer le bien-être socio-économique relié à l'usage de l'eau souterraine ;
- Appliquer les principes de bonne gouvernance de l'eau.

Le CAC (2009) a recommandé la production d'indicateurs de gestion durable des eaux souterraines afin d'assurer le suivi et l'atteinte des cinq objectifs.

2.2 Évaluation des indicateurs de gestion durable

Afin de donner suite à la recommandation du CAC (2009), le Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME, 2011) a développé un projet pilote ayant pour but d'évaluer les indicateurs de gestion durable qu'il serait possible et pertinent de produire au Canada. Pour ce faire, des projets distincts ont été réalisés dans plusieurs provinces canadiennes à des échelles et dans des contextes hydrogéologiques différents. Au Québec, le projet pilote a été réalisé lors du PACES de Montérégie Est (Martin et al., 2013).

Suite aux résultats des projets pilotes de Water and Earth Science Associates (WESA, 2013), le CCME (2017) a déterminé les orientations pratiques pour évaluer la pérennité des eaux souterraines, notamment sur la base d'indicateurs de gestion durable. Cette évaluation des indicateurs de gestion durable permet de vérifier qu'il existe des liens entre les objectifs et les indicateurs produits. Les indicateurs sont examinés pour (CCME, 2017) :

- Leur utilité : sont-ils utiles aux intervenants et aux décideurs ?
- Leur mesurabilité : avec quelles données ont-ils été produits ?
- Leur action : des mesures d'améliorations peuvent être mises en place grâce à ces indicateurs ?
- Leur pertinence : sont-ils utilisés de façon adéquate à court et à long terme ?
- La communication : sont-ils facilement compréhensibles auprès du public, des intervenants et des décideurs ?
- La priorité : permettent-ils d'établir des actions prioritaires ?
- La responsabilité : permettent-ils de répondre aux objectifs des ministères ou des organismes gouvernementaux responsables ?

Des correspondances doivent être trouvées entre l'indicateur souhaité et les données ou les informations disponibles dans la région concernée. S'il n'y a aucune correspondance, il faut alors éliminer l'indicateur ou acquérir des données qui permettront de produire cet indicateur. Il est important d'établir une liste d'indicateurs envisagés pour ensuite l'examiner grâce à des processus de gouvernance multidisciplinaire pour identifier les indicateurs qui vont être conservés afin de les produire et ceux qui vont être éliminés (CCME, 2017). Il faut pour cela réaliser un tableau avec différentes catégories, incluant le nom, la description de l'indicateur, les paramètres d'estimation et l'échelle d'application.

2.3 Description des principaux indicateurs

L'*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization* (UNESCO, 2007) a proposé dix indicateurs de gestion durable des eaux souterraines applicables à l'échelle mondiale, nationale ou locale (système aquifère). Plusieurs de ces indicateurs ont été examinés dans le cadre des travaux du CCME (2011). Lors de la réalisation du projet pilote en Montérégie Est, Martin et al. (2013) ont évalué les indicateurs suggérés par le CCME (2011) sur la base d'une consultation avec les acteurs de l'eau régionaux. M'Couezou (2018) a repris et réévalué les indicateurs produits en Montérégie Est afin d'utiliser ces indicateurs pour intégrer les résultats du PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013a) dans le Plan directeur de l'eau du Comité de concertation et de valorisation du bassin de la rivière Richelieu (COVABAR).

Les indicateurs produits dans le cadre et à la suite du projet pilote du CCME (2017) ont été établis à la fois sur la base des objectifs de gestion durable formulés par le CAC (2009) et le cadre FPEIR (Force motrice, Pression, État, Impact et Réponse ; ou *DSPIR* : *Driver, Pressure, State, Impact, Response*). Ce modèle FPEIR présente les forces motrices qui affectent l'usage des ressources (*Driver*), les pressions naturelles et anthropiques qui agissent sur les ressources (*Pressure*), l'état des eaux souterraines qui en résulte (*State*), les impacts socioéconomiques et sur les écosystèmes résultant de ces pressions (*Impact*) et enfin les réponses pouvant être apportées pour assurer la gestion durable des ressources en eau (*Response*) (CCME, 2017 ; M'Couezou, 2018).

Les indicateurs de gestion durable des eaux souterraines peuvent être produits grâce à des données mesurables et observables (UNESCO, 2007). Ils donnent des informations sur la quantité et la qualité des eaux souterraines. Ils sont fondés sur les aspects socio-économiques (accessibilité, exploitabilité des eaux souterraines, protection des eaux souterraines, etc.) ainsi que sur les aspects environnementaux (vulnérabilité, stress hydrique, pollution des eaux souterraines) de la gestion des eaux souterraines (UNESCO, 2007). Les indicateurs de gestion durable des eaux souterraines peuvent être intégrés à d'autres indicateurs liés à l'eau ou liés aux activités anthropiques dépendantes de l'eau comme l'agriculture (UNESCO, 2007). Dans le cadre du projet pilote réalisé en Montérégie Est, Martin et al. (2013) ont testé la possibilité de produire des indicateurs de gestion durable reliés aux cinq objectifs proposés par le CAC (2009) à partir des données et cartes produites dans le cadre des projets PACES (figure 2.1).

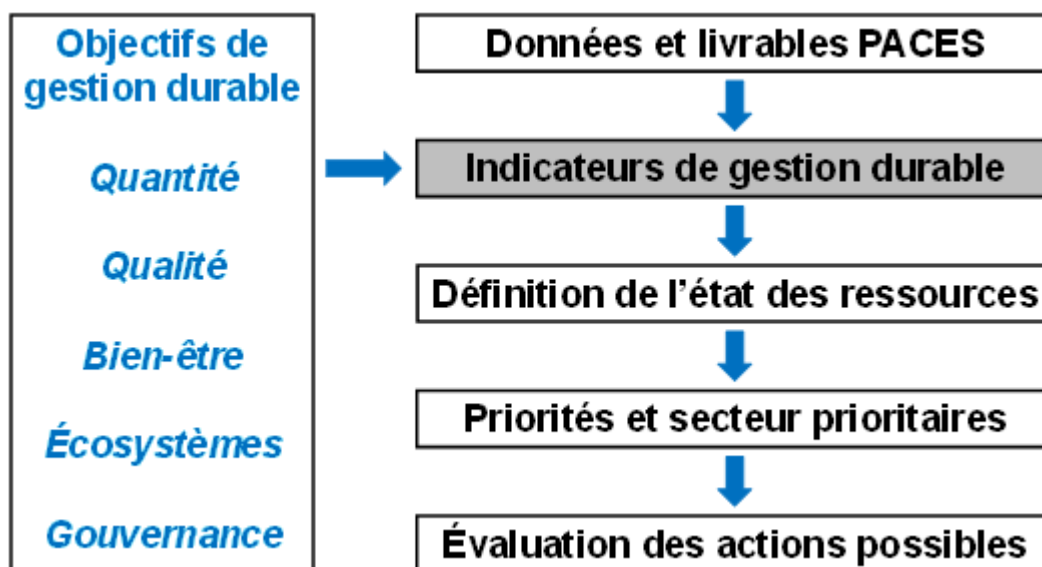


Figure 2.1 : Démarche de production et d'usage des indicateurs proposée par Martin et al. (2013)

Afin que les indicateurs supportent la gestion durable des ressources en eau souterraine, Martin et al. (2013) ont souligné que les indicateurs devaient 1) définir l'état des ressources en eau souterraine et faciliter la communication de cet état aux acteurs de l'eau, 2) permettre d'identifier les enjeux importants reliés à l'eau souterraine ainsi que les secteurs où ces enjeux sont présents, et 3) soutenir l'évaluation des actions pouvant être posées en relation avec les enjeux reliés aux eaux souterraines. L'ensemble de cette démarche a été appliqué dans le cadre du projet PACES réalisé en Montérégie Est (Carrier et al., 2013a). M'Couezou (2018) a poursuivi cette démarche afin d'exploiter les connaissances sur les eaux souterraines produites dans le cadre du PACES Montérégie Est pour définir des éléments du Plan directeur de l'eau du COVABAR en relation avec les ressources en eau souterraine.

Les sous-sections suivantes font une brève revue des principaux indicateurs de gestion durable avant d'aborder plus en détails les indicateurs de stress hydrique dans la sous-section subséquente. Les sous-sections suivantes n'ont ainsi pour but que de répertorier les indicateurs de gestion durable et il n'y a donc pas de discussion sur l'intérêt, la pertinence ou l'applicabilité de ces indicateurs dans le contexte québécois. Martin et al. (2013) font une brève description de la perception des acteurs de l'eau de la Montérégie Est par rapport à la pertinence des indicateurs retenus pour le projet pilote du CCME (2011). Les indicateurs retenus par Martin et al. (2013) ne sont toutefois qu'un sous-ensemble des indicateurs répertoriés dans les sous-sections suivantes. Le comité formé par le MELCC réalise présentement une démarche d'évaluation des indicateurs de gestion durable par rapport aux besoins du MELCC pour l'allocation d'eau aux demandeurs de permis de prélèvement.

2.3.1 Ressources en eau souterraine renouvelables per capita

Cet indicateur (*Renewable Groundwater Resources (GWRR) per capita*), exprimé en m³ par an, représente la quantité d'eau souterraine totale annuelle renouvelable par habitant (UNESCO, 2007). Cet indicateur est applicable à l'échelle régionale ou nationale. La production de cet indicateur permet d'estimer globalement la quantité d'eau disponible pour l'ensemble des usages de l'eau. Cet indicateur ne considère que les eaux de bonne qualité et ne prend pas en compte les eaux saumâtres et salines qui peuvent servir à certains usages. Le GWRR est un indicateur important pour le développement socio-économique d'un pays.

Les données nécessaires à la production de cet indicateur sont des statistiques sur les précipitations et la population. Selon la géologie, la topographie et la structure du sol, une partie des précipitations peut s'infiltrer afin de recharger les nappes (UNESCO, 2007). D'après l'UNESCO (2007), cet indicateur se calcule de la manière suivante :

$$GWRR = \text{Recharge} + \text{Infiltration des rivières} - \text{Débit de base} + \text{Débit entrant} - \text{Débit sortant} + \text{Recharge artificielle}$$
$$(GWRR = \text{Recharge} + \text{Seepage} - \text{Base-flow} + \text{Inflow} - \text{Outflow} + \text{Artificial Recharge})$$

La recharge correspond à la recharge totale d'eau souterraine par les précipitations de la région considérée. L'infiltration (*seepage*) s'ajoute à la recharge si les cours d'eau sont « influents » et qu'une partie de l'eau des cours d'eau s'infiltré jusqu'à la nappe. Le débit de base (*base-flow*) est l'afflux d'eau souterraine dans les rivières qui devient alors une partie de la ressource en eau de surface. Le débit entrant (*inflow*) correspond aux ressources en eaux souterraines renouvelables totales qui pénètrent dans le système aquifère de la région considérée à partir de l'amont (naturellement ou par des accords entre juridictions ou pays). Le débit sortant (*outflow*) est le total des ressources renouvelables en eaux souterraines qui quittent les systèmes aquifères de la région considérée pour entrer dans les aquifères des régions en aval. La recharge artificielle (*artificial recharge*) correspond à la recharge artificielle au sens de l'UNESCO/*World Meteorological Organization* (WMO, 1992). Elle correspond à l'accroissement de la reconstitution naturelle des eaux souterraines dans les aquifères par l'alimentation en eau par le biais de puits ou fossés, par la propagation ou par l'évolution des conditions naturelles.

2.3.2 Exploitation totale / Recharge

Le rapport entre l'exploitation totale et la recharge de l'eau souterraine (*total groundwater abstraction / groundwater recharge*) est un indicateur commun qui se calcule de la façon suivante :

$$\text{Exploitation totale / Recharge} \times 100$$

Les sources d'alimentation des nappes constituant la recharge sont les précipitations, les masses d'eau de surface, les pertes d'irrigation et les infiltrations venant de la distribution d'eau potable et des eaux usées (UNESCO, 2007). L'exploitation totale (*total groundwater abstraction*) représente l'extraction totale d'un aquifère par les puits, les forages, les sources ou usages agricoles, etc. (UNESCO, 2007). Les données sur le captage des eaux souterraines par les institutions, les exploitations agricoles, les industries et les municipalités sont accessibles dans la plupart des pays puisque les preuves sont obligatoires et enregistrées dans une base de données. Les prélèvements en eau souterraine dans les puits domestiques peuvent également être estimés. Au Québec, l'usage de l'eau souterraine n'est pas systématiquement répertorié pour les petits prélèvements (les prélèvements qui ne nécessitent pas d'autorisation du ministre, par exemple, les puits résidentiels et les prélèvements dont le débit est inférieur à 75 m³/jour et qui alimentent au maximum 20 personnes), et l'estimation de l'usage d'eau souterraine, notamment pour des fins agricoles, exige un effort important et complexe (voir par exemple le rapport du PACES Montérégie Est de Carrier et al., 2013a).

Trois scénarios sont proposés par l'UNESCO (2007) afin de discuter les résultats des valeurs obtenus pour cet indicateur :

- Scénario 1 : abstraction < recharge → c'est-à-dire < 90 % ;
- Scénario 2 : abstraction = recharge → c'est-à-dire = 100 % ;
- Scénario 3 : abstraction > recharge → c'est-à-dire > 100 %.

Le scénario 2 ne se traduit pas directement par un développement durable des eaux souterraines. Des aquifères locaux ou régionaux peuvent être surexploités, il convient d'envisager d'autres facteurs pour l'application de cette mesure (UNESCO, 2007). Il est important de souligner que l'exploitation de toute la recharge implique à long terme le tarissement saisonnier des cours d'eau dont le débit de base supporté par l'eau souterraine disparaîtrait. Une valeur de 20% de l'exploitation de la recharge a été utilisée dans le cadre des projets PACES réalisés en Montérégie Est (Carrier et al., 2013a) et en Chaudière-Appalaches (Lefebvre et al., 2015) comme seuil indiquant l'utilisation d'une proportion jugée « importante » de l'eau souterraine. Le même seuil de 20% a aussi été proposé dans le cadre d'autres travaux (Raskin, 1997). Le seuil de l'exploitation de la recharge correspondant à une gestion durable des ressources en eau souterraine dans une région donnée devrait être établi en tenant compte des besoins des écosystèmes et aussi de l'usage récréotouristique de l'eau alimentée par l'eau souterraine.

2.3.3 Prélèvements totaux / Ressources exploitables

Un indicateur similaire à la proportion de la recharge exploitée est celui des prélèvements totaux d'eau souterraine par rapport aux ressources en eau souterraine exploitables (*total groundwater abstraction / exploitable groundwater resources*). Le prélèvement total se définit de la même façon que pour l'indicateur précédent décrit à la section 2.3.2. Quant aux ressources en eau souterraine exploitables (*exploitable groundwater resources*), elles représentent la quantité d'eau pouvant être extraite d'un aquifère chaque année selon les conditions et les contraintes économiques, technologiques et institutionnelles (UNESCO, 2007). Pour estimer les ressources exploitables, il faut combiner les méthodes hydrologiques avec les méthodes hydrauliques (modèles d'écoulement des nappes) ainsi que les contraintes écologiques. La qualité des eaux souterraines doit aussi être observée car elle varie en fonction de son niveau d'exploitation. Enfin, l'exploitabilité des eaux souterraines peut être affectée par les activités anthropiques.

Ainsi, une seule définition des ressources en eau souterraines exploitables ne peut pas être appliquée uniformément puisque les conditions d'exploitation peuvent varier d'un pays à un autre (UNESCO, 2007). Les critères de développement durable doivent être sélectionnés et le bon état des eaux souterraines tant en quantitatif qu'en qualitatif doit être le mieux préservé. Trois scénarios sont proposés par l'UNESCO (2007) pour interpréter cet indicateur :

- Scénario 1 : abstraction < quantité d'eau souterraine exploitable → c'est-à-dire < 90 % ;
- Scénario 2 : abstraction $\approx$ quantité d'eau souterraine exploitable → c'est-à-dire $\approx$ 100 % ;
- Scénario 3 : abstraction > quantité d'eau souterraine exploitable → c'est-à-dire > 100 %.

Le premier scénario représente les ressources en eau souterraine d'un pays comme étant sous-exploitées. Le deuxième scénario décrit un pays avec des ressources en eau souterraine développées et une gestion durable. Le troisième scénario représente les ressources en eau souterraine d'un pays en surexploitation et où la gestion de ces ressources doit prendre en compte le stress hydrique. Il est évidemment possible de considérer cet indicateur à une échelle plus locale que l'ensemble d'un pays.

2.3.4 Pourcentage de l'eau souterraine dans l'usage total de l'eau d'un pays

Les enquêtes publiques ainsi que le suivi et l'évaluation des eaux souterraines ont permis une meilleure compréhension des systèmes d'eau souterraine et de l'une utilisation croissante de ces ressources pour la consommation humaine dans de nombreux pays (UNESCO, 2007). La proportion d'usage des eaux de surface et des eaux souterraines utilisées pour l'alimentation en eau potable est disponible pour de nombreux pays (*groundwater as a percentage of total use of drinking water at national level*). Cet indicateur informe sur le niveau de dépendance aux eaux souterraines pour l'approvisionnement en eau à l'échelle d'une nation. Les données d'utilisation des ressources en eau sont enregistrées dans des bases de données à l'échelle municipale, à l'échelle régionale ou à l'échelle nationale (UNESCO, 2007). Les données des puits domestiques ne sont pas stockées mais elles peuvent être estimées. Cet indicateur pourrait aussi être produit à des échelles plus détaillées que nationale. Tel que mentionné précédemment, l'usage de l'eau est difficile à estimer au Québec, mais les projets réalisés dans le cadre du PACES donnent des estimations pour la majorité des régions.

2.3.5 Épuisement des ressources en eau souterraine

L'épuisement des ressources en eau souterraine (*groundwater depletion*) peut se produire si le prélèvement de l'eau souterraine n'est pas compensé par la recharge. Le prélèvement d'eau souterraine à un taux excédant la recharge va mener à une baisse du niveau piézométrique et à une réduction du stockage d'eau souterraine dans le système aquifère. Toutefois, le régime d'écoulement dans un système aquifère sous forte exploitation peut s'adapter et la capacité de « capture » d'eau souterraine peut augmenter en relation avec l'exploitation elle-même pour atteindre un nouvel équilibre (Konikow et Leake, 2014). Pétré et al. (2019) montrent comment la modification de l'écoulement régional suite à une sollicitation importante peut mener à une exploitation durable même si elle excède la recharge directe dans un aquifère. Même en conditions durables, la baisse des niveaux d'eaux souterraines fait augmenter les coûts de pompage, diminuer la production des puits et peut rendre l'utilisation des eaux souterraines économiquement et socialement irréalisable (UNESCO, 2007). Il est donc important, mais complexe, de connaître la quantité d'eau pouvant être prélevée sans qu'il y ait d'impacts irréparables sur les eaux souterraines (tant en quantité qu'en qualité) ou sur les écosystèmes (UNESCO, 2007).

La production de l'indicateur sur l'épuisement de l'eau souterraine (*groundwater depletion*) a pour but de prévenir une surexploitation de l'eau souterraine grâce à la mise en place d'une meilleure gestion durable. L'épuisement des eaux souterraines doit être évalué méticuleusement puisque les niveaux piézométriques sont soumis aux variations naturelles et saisonnières à cause des conditions climatiques variables et des caractéristiques de l'aquifère qui affectent leur réponse (UNESCO, 2007). L'épuisement des stocks d'eau souterraine n'est pas forcément causé par un problème d'exploitation non durable d'un aquifère, mais à l'évolution des conditions climatiques. Il faut discerner les baisses de niveaux permanentes et régionales des baisses de niveaux non permanentes et locales causées par la proximité des puits de pompage. Un épuisement est possible lorsque les baisses régionales du niveau des eaux souterraines sont associées aux problèmes suivants (UNESCO, 2007) :

- Zones à forte densité de puits ;
- Changement du débit de base ;
- Changement des caractéristiques de qualité des eaux souterraines ;
- Affaissement des terres.

L'indicateur d'épuisement des eaux souterraines (en pourcentage) se calcule de la manière suivante :

$$\frac{\sum \text{Aires avec un problème d'épuisement}}{\text{Aire totale de la région d'étude}} \times 100$$

Les surfaces ayant un problème d'épuisement des eaux souterraines correspondent à la zone, exprimée en km², où un déclin régional du niveau des eaux souterraines a été observé. Le dénominateur est la surface totale étudiée exprimée en km² correspondant à un aquifère ou une partie d'un aquifère.

2.3.6 Exploitation des ressources non renouvelables

Dans les situations où des ressources en eau non renouvelables sont exploitées, il peut être d'intérêt d'évaluer le nombre d'années d'exploitation restantes. Le nombre d'années est obtenu du rapport entre le volume total d'exploitation de ressources non renouvelables sur le prélèvement annuel de ces ressources non renouvelables (*total exploitable non-renewable groundwater resources / annual abstraction of non-renewable groundwater resources*) :

$$\frac{\text{Volume total de ressources non renouvelables (m}^3\text{)}}{\text{Prélèvement annuel de ressources non renouvelables (m}^3\text{/an)}}$$

Ces ressources en eau souterraine non renouvelables sont représentées par le volume fini d'eau pouvant être extrait d'un aquifère dont la recharge est faible voire nulle. Ce volume représente l'eau qui peut être extraite d'un aquifère dans les conditions socio-économiques et écologiques actuelles (UNESCO, 2007). Les prélèvements d'eau annuels doivent être estimés comme une valeur moyenne sur plusieurs années. Il est recommandé d'utiliser une courbe de tendance sur un nombre d'années significatif puisque cette estimation est variable dans le temps (UNESCO, 2007). Ces estimations peuvent changer d'un pays à un autre mais elles doivent traduire la moyenne des extrêmes observés (UNESCO, 2007). Margat et al. (2006) ont proposé des critères définissant les ressources en eau souterraine non renouvelables :

- Recharge annuelle moyenne inférieure à 0.1% du volume stocké ;
- Exploitation des eaux souterraines sans impact sur les systèmes aquifères renouvelables voisins ou les masses d'eau souterraine rechargées.

Les régions arides d'Afrique du Nord, la péninsule arabique, l'Australie et le pergélisol de Sibérie occidentale sont les plus grands systèmes aquifères mondiaux non renouvelables (WWAP, 2006 ; UNESCO, 2007).

2.3.7 *Vulnérabilité de l'eau souterraine*

La vulnérabilité d'une eau souterraine (*groundwater vulnerability*) est définie comme la propriété intrinsèque d'un système d'eau souterraine dépendante de la sensibilité aux impacts naturels et anthropiques du système aquifère (Vrba et Zaporozec, 1994 ; UNESCO, 2007). D'après l'UNESCO (2007), la vulnérabilité intrinsèque est déterminée sur la base des caractéristiques d'un aquifère, les caractéristiques du sol et du matériel géologique non saturé. La vulnérabilité spécifique d'un système d'eaux souterraines est la plupart du temps évaluée pour définir le risque qu'a un système aquifère d'être exposé à des contaminants spécifiques. Cette vulnérabilité spécifique n'est pas prise en compte pour la production de l'indicateur sur la vulnérabilité de l'eau souterraine.

L'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines prend en compte les variables suivantes : la recharge nette, les propriétés du sol, l'épaisseur et la lithologie de la zone non saturée, le niveau des eaux souterraines, les milieux aquifères et la conductivité hydraulique (K) de l'aquifère (UNESCO, 2007). La topographie est également à prendre en compte. La méthode par indices DRASTIC est une des méthodes les plus utilisées pour évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines (Aller et al., 1987 ; Carrier et al., 2013a). Sept paramètres correspondant à une des lettres du mot « DRASTIC » sont utilisés pour calculer l'indice DRASTIC : la profondeur à la nappe (D pour *Depth*), la recharge nette (R pour *net Recharge*), le milieu aquifère (A pour *Aquifer media*), le type de sol (S pour *Soil media*), la pente topographique (T pour *Topographic slope*), l'impact de la zone vadose (I pour *Impact of vadose zone*) et la conductivité hydraulique de l'aquifère K (C pour *aquifer Conductivity*) (Carrier et al., 2013a). Une pondération est appliquée à chacun des paramètres selon l'importance des processus physiques des paramètres par rapport à leur contribution à la vulnérabilité de l'eau souterraine (Carrier et al., 2013a).

L'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines grâce à l'indice DRASTIC aide à l'amélioration de la politique de protection des eaux souterraines en fournissant des orientations sur la planification rationnelle de l'utilisation des sols et la gestion durable (UNESCO, 2007). Cet indicateur aide également pour la prise de mesures de réduction de stress hydrique. L'indicateur de vulnérabilité des eaux souterraines permet aussi de sensibiliser le public à la protection des eaux souterraines car le terme « vulnérabilité » est compris par les non spécialistes en hydrogéologie.

2.3.8 *Densité des activités anthropiques dans les zones vulnérables*

L'indicateur de la densité des activités anthropiques dans les zones vulnérables a été proposé par Martin et al. (2013) et appliqué en Montérégie Est. Cet indicateur représente le « risque » de dégradation de la qualité de l'eau souterraine car il combine la vulnérabilité de l'aquifère avec les causes possibles d'émission de contaminants en surface. Les données utilisées pour la production de cet indicateur sont les activités anthropiques (incluant le nombre de sites contaminés) pondérées par niveau de risque (Carrier et al., 2013a) et le pourcentage des aires de recharge dans les zones vulnérables. Les projets réalisés dans le cadre du PACES fournissent les données requises pour la production de cet indicateur.

2.3.9 Qualité de l'eau souterraine

Les indicateurs de qualité des eaux souterraines (*groundwater quality*) renseignent sur l'état de la qualité de ces eaux et aident à analyser les problèmes de qualité dans l'espace et dans le temps (UNESCO, 2007 ; M'Couezou, 2018). Ces indicateurs de qualité d'eaux souterraines sont produits à l'échelle régionale. Les données de qualité des eaux souterraines sont obtenues grâce à l'échantillonnage des eaux des puits de pompage privés ou publics. Des problèmes peuvent survenir avec cette méthode (UNESCO, 2007) :

- Les puits d'exploitation ne conviennent pas à l'échantillonnage des eaux souterraines peu profondes. Ces puits profonds mélangent de l'eau à différents niveaux pouvant avoir des origines et des compositions différentes ;
- La distribution irrégulière des puits dans une zone rend difficile d'identifier la qualité des eaux souterraines et la contamination de l'ensemble de l'aquifère. Si les puits sont proches, un panache de contaminants peut être détecté, limitant la capacité à définir l'état de la qualité de l'eau souterraine à une échelle régionale ;
- Les mauvaises constructions et le manque d'entretien des puits peuvent causer une contamination localisée du puits échantillonné.

Échantillonner les problèmes de qualité naturelle doit se faire pour les aquifères ou toute partie d'aquifères ayant des conditions géologiques et hydro-chimiques qui portent à croire qu'il existe un risque que de tels problèmes se produisent, comme une minéralogie ou un environnement géochimique spécifique dans les aquifères (UNESCO, 2007). L'indicateur proposé par l'UNESCO (2007) pour les problèmes de qualité d'origine naturelle se calcule de la façon suivante :

$$\Sigma \text{Zones posant des problèmes naturels de qualité des eaux souterraines} / \text{Aire totale de la région d'étude} \times 100$$

Les zones posant des problèmes naturels de qualité des eaux souterraines correspondent aux parties de l'aquifère où la limite maximale indiquée dans les directives de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) sur l'eau potable a été dépassée par la concentration du paramètre de l'indicateur (UNESCO, 2007). La surface totale est définie par une ligne tracée autour des points d'échantillonnage avec une concentration supérieure aux valeurs guides dans les mêmes conditions géologiques et géochimiques (UNESCO, 2007). Elle est exprimée en km² et correspond donc à la superficie d'un aquifère ou d'une partie d'un aquifère étudié.

Les substances à étudier en priorité pour ce type de contamination sont l'arsenic, le fer, les chlorures et les fluorures. Il convient d'étudier également le magnésium, les sulfates, le manganèse, le sélénium ou d'autres espèces inorganiques. Pour certaines substances comme l'arsenic, leur concentration varie sur de courtes distances ; il est alors difficile de délimiter la surface totale en traçant une ligne autour des points d'échantillonnage les plus hauts car cela correspondrait alors à une zone trop large où certaines concentrations ne sont pas problématiques (UNESCO, 2007). Pour éviter d'avoir des résultats faussement pessimistes de la qualité des eaux souterraines, il faut prendre en compte l'ampleur probable de la contamination si les observations réelles ne sont pas disponibles. Par conséquent, cet indicateur est utilisé uniquement à grande échelle.

Alternativement à la superficie affectée par des problèmes de qualité d'eau, la proportion des puits ayant des dépassements des normes de potabilité pour l'un ou l'autre des composés chimiques de l'eau peut être utilisée comme indicateur. Cette approche a été utilisée dans le cadre du projet PACES réalisé en Montérégie Est où les puits échantillonnés étaient relativement bien distribués spatialement dans la région d'étude (Carrier et al., 2013a). Des statistiques et des cartes ont été produites par type d'eau, mais elles auraient pu l'être aussi par municipalité régionale de comté.

Dans certains pays, où un réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines a été mis en place, les problèmes anthropiques provenant des activités agricoles ou de l'assainissement urbain peuvent être identifiés grâce à des variables de qualité comme les nitrates, les chlorures ou la conductivité électrique (UNESCO, 2007). D'après l'UNESCO (2007), la sélection de ces variables de qualité est fondée sur les faits suivants :

- De nombreuses activités émettent une gamme de contaminants potentiels qui augmentent la salinité, ce qui entraîne aussi une augmentation de la conductivité électrique de l'eau. Des chlorures sont aussi communément émis par plusieurs activités potentiellement polluantes, ce qui fait de l'augmentation de la concentration de chlorures un indicateur que d'autres polluants ont aussi pu être émis car il y a très peu de processus naturels pouvant émettre des chlorures ;
- Le contaminant principal des eaux souterraines associé aux activités anthropiques correspond aux nitrates (activités agricoles et assainissement particulièrement).

Les nitrates et les chlorures sont des éléments mobiles et persistants dans de nombreuses eaux souterraines peu profondes. L'augmentation de concentration de ces éléments dans les eaux souterraines peut indiquer la présence d'autres contaminants tels que les composés organiques volatils (COV) ou semi-volatils, les métaux et les polluants inorganiques.

L'indicateur proposé par l'UNESCO pour les eaux souterraines soumises à un stress anthropique se calcule de la manière suivante :

$$\Sigma \text{Zones avec augmentation de la concentration pour une variable de qualité} / \text{Aire totale de la région d'étude} \times 100$$

Les zones ayant détecté une augmentation de la concentration pour une variable de qualité spécifique correspondent aux zones où une augmentation de concentration en chlorures, en nitrates ou de conductivité électrique ont été détectées durant la période d'observation. La surface totale étudiée correspond également à l'aquifère ou une partie de l'aquifère étudié.

L'augmentation des concentrations de variables de qualité doit être appuyée par des méthodes statistiques utilisant une base de données de trois ans ou plus afin d'identifier les changements et les problèmes de qualité des eaux souterraines. Lorsqu'une ou plusieurs variables de qualité où aucune tendance n'est observée, c'est l'hydrogéologue local qui doit juger de l'état de la qualité des eaux souterraines. Alternativement, si une seule campagne d'échantillonnage est disponible, il pourrait être envisageable d'identifier les zones impactées en définissant les concentrations de fond (*background*) pour les chlorures, les nitrates ou la conductivité électrique et en délimitant les zones où ces concentrations sont significativement excédées.

Plusieurs isotopes environnementaux (^{18}O , ^2H , ^3H , ^{14}C et ^{15}N) peuvent servir de paramètres à associer aux variables de qualité pour surveiller et comprendre le processus de modification de la qualité pour des problèmes naturels ou anthropiques des eaux souterraines (UNESCO, 2007). Cela est réalisable lorsque les ressources techniques et financières sont disponibles. Ces indicateurs, particulièrement ceux concernant le temps de résidence (^3H et ^{14}C), sont particulièrement importants pour caractériser des problèmes de qualité d'eau découlant de processus naturels et qui peuvent être associés à des types d'eau particuliers. C'est ce qui a été fait par Beaudry et al. (2018) dans le cadre du PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013a).

L'ensemble des paramètres chimiques suivis peut indiquer des changements dans la qualité des eaux souterraines. Lorsque l'indicateur a été produit grâce aux variables de qualité, les échantillonnages des eaux souterraines doivent être faits tous les trimestres ou au moins une fois en période sèche et une fois en période humide (UNESCO, 2007). Cependant, la conductivité électrique peut être enregistrée en continue par la présence de capteurs dans les puits de surveillance. Bien que ce réseau vise avant tout à suivre les niveaux d'eau, la conductivité électrique est aussi mesurée dans quelques puits du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ) géré par le Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. Lorsque l'indicateur a été produit par l'utilisation des isotopes, les eaux souterraines doivent être échantillonnées au moins une fois par an.

L'indicateur des zones à usage résidentiel présentant un risque pour la santé permet d'identifier les secteurs de consommation d'eau souterraine dangereux pour la santé des consommateurs. Il est fondé sur la qualité naturelle de l'eau souterraine et nécessite, pour être produit, les données de géochimie de l'eau, la carte de la zone de qualité et la densité de puits municipaux et résidentiels dans les zones de faible qualité (M'Couezou, 2018).

Au Québec, le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC, 2016) a produit des statistiques sur la qualité des eaux alimentant les systèmes de distribution municipaux. Ces données ne permettent pas de cartographier précisément les zones problématiques au niveau de la qualité d'eau, mais elles donnent des indications sur les paramètres qui sont problématiques à l'échelle régionale. Bondu et al. (2019) ont compilé les données géochimiques sur les eaux souterraines produites par les projets du PACES. L'analyse initiale de ces données indique qu'elles permettraient de définir les problématiques de qualité d'eau à l'échelle régionale et pourraient servir de base à la formulation d'indicateurs de qualité d'eau. La production de tels indicateurs serait facilitée par la compilation d'une base de données géochimique cohérente et vérifiée qui a été faite dans le cadre des travaux de Bondu et al. (2019).

2.3.10 Besoins de traitement de l'eau souterraine

Le besoin de traitement de l'eau souterraine (*groundwater treatment requirements*) est un indicateur produit pour savoir si l'eau souterraine, utilisée pour la consommation humaine (eau potable) ou utilisée pour les activités agricoles ou industrielles, est soumise à un traitement. Il existe des méthodes de traitement simples : dilution, aération, filtration, désinfection, ajustement de l'alcalinité ou encore élimination du fer du manganèse par séparation (UNESCO, 2007). Mais il existe aussi des méthodes de traitement exigeantes qui sont regroupées en trois catégories sur le plan technologique :

- La désalinisation ;
- L'osmose inverse ;
- La filtration sur membrane pour éliminer le fluor ou l'arsenic.

Plus le traitement est complexe et plus le coût de l'approvisionnement en eau et de l'entretien du matériel est important. Les réseaux publics d'aqueduc peuvent donner les informations sur les traitements utilisés sous forme de statistique au niveau national ou local. Pour les approvisionnements domestiques en eau souterraine, les municipalités ou les communautés locales peuvent fournir les informations sur le nombre de ménages ayant une unité de traitement à petite échelle (UNESCO, 2007). Selon l'ampleur du traitement des eaux souterraines, l'indicateur est divisé en trois catégories :

- Sans traitement (qualité appropriée) ;
- Traitement simple nécessaire ;
- Traitement technologiquement exigeant nécessaire.

L'indicateur, exprimé en pourcentage, se calcule grâce au volume d'eau souterraine prélevé divisé dans les catégories citées ci-dessus. Il s'applique mieux à l'échelle nationale plutôt qu'à l'échelle locale. L'application de cet indicateur à l'échelle régionale est difficile puisque selon les conditions du pays, la méthode employée peut être simple ou exigeante. Au Québec, dans les régions couvertes par un projet du PACES, il serait pertinent de vérifier si les différents projets ont systématiquement compilé l'information sur la présence ou non de systèmes de traitement pour les puits résidentiels ou municipaux. Si l'information est généralement disponible, elle pourrait servir de base à la production d'un indicateur.

Les paramètres de qualité les plus pertinents, définissant les eaux souterraines comme étant potables ou utilisables pour d'autres usages, doivent être déterminés. Différentes qualités et concentrations sont utilisées pour les eaux potables et sont comparées aux normes fixées par l'OMS ou les normes nationales. Il en est de même pour les eaux utilisées pour d'autres usages qui sont comparées à d'autres normes. Cependant, les systèmes de traitement mis en place donnent une indication indirecte de la qualité de l'eau (UNESCO, 2007).

2.3.11 Dépendance des populations agricoles sur l'eau souterraine

La dépendance des populations agricoles sur l'eau souterraine (*dependence of agricultural population on groundwater*) est un indicateur produit dans le but d'indiquer l'importance des eaux souterraines par rapport aux moyens du milieu rural et des revenus des ménages. Cet indicateur détermine le pourcentage de la population d'un pays dépendant des eaux souterraines pour leurs activités rurales et pour les ménages. D'après l'UNESCO (2007), cet indicateur se calcule de la manière suivante :

$$\text{Nombre d'agriculteurs dépendant de l'eau souterraine pour l'agriculture} / \text{Population totale du pays} \times 100$$

D'autres indicateurs pourraient aussi être produits, par exemple pour connaître le nombre d'agriculteurs qui utilisent les eaux souterraines pour leurs activités ou le nombre de personnes qui ont des professions liées à l'agriculture ou à l'élevage par rapport à la population du pays. L'accès aux données pour les pays à l'échelle d'États comme l'Australie ou les États-Unis rend la production de cet indicateur plus intéressante à l'échelle mondiale (UNESCO, 2007). L'agriculture dans ces deux pays est cependant très industrialisée, ce qui fait que peu de travailleurs et d'agriculteurs sont employés.

2.3.12 Densité de puits résidentiels dans les zones vulnérables

Martin et al. (2013) ont suggéré d'évaluer la densité des puits résidentiels dans les zones vulnérables afin de mettre en évidence la vulnérabilité de la ressource en eau souterraine par rapport à la consommation de l'eau à usage résidentiel. La densité de puits résidentiels (nb/km²) était obtenue de la base de données du Système d'information hydrogéologique (SIH) tandis que les zones vulnérables avaient été définies à partir des cartes de vulnérabilité DRASTIC produites dans le cadre du projet PACES en Montérégie Est (détails dans M'Couezou, 2018). Cet indicateur permet d'identifier les zones où l'usage de l'eau souterraine est important et qui doit faire l'objet d'une protection particulière à cause de la vulnérabilité de l'aquifère.

2.3.13 Lien entre milieux humides et eaux souterraines

Martin et al. (2013) avaient recommandé de produire un indicateur sur les liens entre les milieux humides et les eaux souterraines afin d'identifier les zones de conservation, mais un tel indicateur ne pourrait pas servir à indiquer où les prélèvements d'eau souterraine sont influencés par l'eau de surface, ce qui relève de conditions locales spécifiques. M'Couezou (2018) a produit un tel indicateur dans le bassin versant de la rivière Richelieu en classant les cours d'eau et les milieux humides par rapport 1) à leur position dans le système d'écoulement des eaux souterraines (zone de recharge, zone de transition ou zone d'émergence) et selon 2) la relation entre l'aquifère rocheux régional et le milieu humide, telle qu'indiquée par les conditions de confinement (nappe libre, nappe semi-captive ou nappe captive). La production de cet indicateur se base sur les conditions de confinement qui sont définies par les projets PACES, mais elle exige aussi une classification du territoire en termes de zones de recharge, zones intermédiaires et zones d'émergence de l'eau souterraine. Dans le cadre du PACES Montérégie Est, le lien entre les cours d'eau et l'aquifère rocheux régional avait aussi été évalué à partir de la nature et de l'épaisseur des dépôts meubles séparant le lit des cours d'eau de l'aquifère rocheux (Carrier et al., 2013a). Ce sont les mêmes données qui ont servi à définir les conditions de confinement de l'aquifère rocheux.

2.3.14 Détermination du débit de base assurant la viabilité des écosystèmes

L'indicateur sur le débit de base (ou débit d'étiage) permettant d'assurer la viabilité des écosystèmes n'est pas le plus simple à produire. En effet, le changement de débit de base et les débits requis pour la santé des écosystèmes sont difficiles à évaluer. La Direction de l'expertise hydrique (DEH) du MELCC donne des lignes directrices pour l'estimation des débits d'étiage au Québec (<https://www.cephq.gouv.qc.ca/debit-etiage/cartes/debits-etiage.htm>). Cette estimation peut toutefois s'avérer complexe. M'Couezou (2018) a utilisé une définition du débit de base lui permettant d'exploiter les données disponibles à partir de l'estimation de la recharge avec le modèle d'infiltration HELP en Montérégie Est (Carrier et al., 2013a) sur la base des travaux de Croteau et al. (2010). Ces travaux ont montré que les débits d'étiage obtenus de la séparation des hydrogrammes de cours d'eau avec un filtre correspondaient à la somme de la recharge au roc et du ruissellement hypodermique dans les dépôts meubles obtenus de HELP. M'Couezou (2018) a ainsi calculé le débit de base de la manière suivante pour chaque sous bassin versant hydrogéologique :

$$\text{Débit de base} \approx \text{moyenne de la recharge} + \text{ruissellement hypodermique sur le sous bassin versant}$$

La recharge (mm/an), le ruissellement hypodermique (mm/an) et le débit total sont les données à utiliser pour la production de cet indicateur. Toutefois, la proportion du débit de base qui doit être préservée pour assurer la viabilité des écosystèmes n'est pas simple à définir. Des travaux de l'équipe d'André St-Hilaire de l'INRS pour le MELCC sont présentement en voie de réalisation sur ce sujet. Ces travaux permettraient de préciser ou remplacer le critère actuel basé sur le débit d'étiage des cours d'eau qui est utilisé pour définir le seuil du prélèvement maximum permis en cours d'eau.

2.3.15 Usages de l'eau souterraine

Afin de rencontrer l'objectif de préservation des usages de l'eau souterraine, il est nécessaire d'avoir d'abord des indicateurs montrant la dépendance à l'eau souterraine des différents types d'usage de l'eau : résidentiel, agricole et ICI (industriel, commercial et institutionnel). L'estimation de l'usage de l'eau souterraine a pu être fait à l'échelle municipale dans le cadre des projets PACES (Carrier et al., 2013a ; Lefebvre et al., 2015). Les indicateurs de l'importance de l'eau souterraine pour les différents types d'usage de l'eau doivent donc être produits à l'échelle municipale, mais ils peuvent être intégrés à l'échelle des MRC et des régions. Ces indicateurs, exprimés en pourcentage, sont calculés de la manière suivante pour chaque municipalité (M'Couezou, 2018) :

$$\text{Eau souterraine utilisée} = \text{Usage (résidentiel, agricole ou industriel)} / \text{Usage total} \times 100$$

Le protocole utilisé pour l'estimation de l'usage de l'eau dans le cadre des projets PACES est documenté dans les annexes du rapport du projet PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013a).

2.3.16 Efficacité de l'utilisation de l'eau souterraine

Les pertes d'eau dues aux fuites sur les réseaux d'approvisionnement doivent être évaluées pour connaître l'efficacité de l'utilisation de l'eau souterraine (M'Couezou, 2018). La proportion de pertes d'eau sur le réseau est utilisée pour la production de cet indicateur. Dans une perspective d'exploitation de la ressource, ce n'est peut-être pas un indicateur utile à l'échelle régionale.

2.3.17 Indicateurs de bonne gouvernance

L'indicateur de sensibilisation des différents acteurs de l'eau souterraine permet de montrer l'importance accordée à la gestion la ressource ainsi qu'à ses différents enjeux (M'Couezou, 2018). Le nombre d'événements de sensibilisation organisés, le nombre de personnes présentes lors d'événements publics, le nombre d'acteurs sensibilisés et formés, le nombre d'outils d'information développés et le nombre de villes et d'écoles impliquées peuvent être utilisés pour produire cet indicateur.

L'indicateur sur la mise en place de programmes dédiés à la ressource en eau souterraine aide à l'amélioration de la caractérisation hydrogéologique locale et aussi à l'amélioration de la gestion des eaux souterraines du territoire (M'Couezou, 2018). Le nombre de stations permanentes dédiées au suivi de l'état de l'eau souterraine, le nombre d'études réalisées de mises à jour des données, le nombre de conseils et d'accompagnements des municipalités dans la gestion des eaux souterraines et le nombre de partenariats développés sont des données prises en compte dans la production de cet indicateur.

L'indicateur sur la libre circulation de l'information sert à garantir une libre circulation de l'information entre les différents acteurs de l'eau. Il permet le partage de connaissances et d'expériences (M'Couezou, 2018) sur les ressources en eau souterraine. Le nombre de bases de données en ligne concernant les ressources en eau souterraine (informations sur les écosystèmes, les usages, les conflits d'usages...) sont à utiliser pour la production de cet indicateur.

Bien que d'intérêt, un obstacle important à l'élaboration de cet indicateur est l'absence de données acquises de façon uniforme pour l'ensemble du territoire. Sans des données uniformes, il ne sera pas possible de comparer la qualité de la gouvernance entre les régions. Une réflexion doit donc être faite au niveau de l'acquisition des informations si un tel indicateur est jugé souhaitable.

3 INDICATEURS DE STRESS HYDRIQUE

3.1 Inventaire des indicateurs de stress hydrique

De nombreux indicateurs de stress hydrique ont été suggérés dans la littérature pour gérer les ressources en eau (eaux de surface et souterraine) dans différentes juridictions. Le tableau 3.1 fait l'inventaire des indicateurs répertoriés. Ces indicateurs vont faire l'objet d'une sélection à la section suivante.

3.2 Sélection des indicateurs de stress hydrique à tester

La sélection et l'élaboration d'indicateurs de stress hydrique se font selon des critères scientifiquement fiables, sensibles, mesurables et représentatifs (CCME, 2017). Ces indicateurs vont pouvoir être produits grâce aux informations déjà existantes ou faciles à obtenir. Il faut que ces indicateurs soient pertinents à différentes échelles et comparables entre les différents régimes hydrogéologiques (Li, 2013 ; CCME, 2017).

Certains des indicateurs répertoriés sont d'intérêt pour les eaux de surface, or ce sont les eaux souterraines qui sont visées dans cette production d'indicateurs. D'autres indicateurs sont complexes à produire au Québec à cause des méthodes de calcul ou des données non disponibles. La grille de critères suivante (tableau 3.2) a donc été établie pour faire la sélection d'indicateurs qui pourraient être produits au Québec. La sélection a permis de retenir les indicateurs qui sont décrits dans les sections suivantes.

3.2.1 *Baseline Water Stress (prélèvements / débit total)*

Les débits des principaux cours d'eau étant disponibles, cet indicateur serait facile à produire si les estimations des prélèvements étaient aussi disponibles. D'ailleurs, les prélèvements étant essentiels pour évaluer la gestion durable des ressources en eau souterraine, il sera nécessaire qu'une procédure soit mise en place pour assurer la production régulière d'estimés des prélèvements. Une complication pour la production de cet indicateur est que le débit total est connu à l'échelle des bassins jaugés, mais que les estimations d'usage de l'eau se font à l'échelle des municipalités. Il faudra donc appliquer les valeurs moyennes de débit total normalisé par la surface du bassin à l'échelle municipale. Une autre complication est reliée au fait que le débit des cours d'eau reflète déjà l'effet des prélèvements nets (consommation) dans les cours d'eau et d'eau souterraine dans le bassin. Le débit total mesuré doit donc être augmenté de la valeur des prélèvements totaux avant de calculer cet indicateur.

3.2.2 *Interannual variability (écart-type/moyenne approvisionnements)*

C'est un indicateur intéressant, cependant les estimations de la quantité de l'eau prélevée par l'approvisionnement en eau ne sont pas disponibles annuellement. En revanche, si l'on considère les usages municipaux, il pourrait être produit pour ce type d'usage. Il pourrait être plus intéressant de suivre les tendances à long terme de l'usage de l'eau que les variations d'une année à l'autre.

3.2.3 *Drought Severity (précipitations – ETP)*

C'est un indicateur qui peut être simple à calculer car il ne repose que sur des données météorologiques qui sont disponibles. Cet indicateur serait intéressant à mettre en relation avec les hydrogrammes de puits pour déceler l'effet de la météo sur les variations de niveau d'eau. La sécheresse peut être calculée en reprenant les données des précipitations journalières et les données de l'ETP disponibles sur le ftp de la *National Oceanic & Atmospheric Administration* (NOAA) (<ftp://ftp.cdc.noaa.gov/Datasets/NARR/monolevel/>).

Tableau 3.1 : Inventaire des indicateurs de stress hydrique suggérés dans la littérature

N°	Nom de l'indicateur	Description de l'indicateur	Paramètres d'estimation de l'indicateur	Échelle d'application	Référence
1	<i>Baseline Water Stress</i>	Prélèvement d'eau total sur une année par rapport au débit annuel total disponible (en %).	<i>Prélèvement / Débit disponible</i> Plus les valeurs sont fortes, plus il y a de concurrence entre les utilisateurs.	Bassin versant	Gassert et al. (2013a)
2	<i>Interannual Variability</i>	Mesure de la variation de l'approvisionnement en eau entre chaque année.	<i>Écart-type / Moyenne de l'approvisionnement annuel</i>	Bassin versant	Gassert et al. (2013a)
3	<i>Seasonal Variability</i>	Mesure de la variation de l'approvisionnement en eau entre chaque mois de l'année.	Rapport entre l'écart-type et la moyenne de l'approvisionnement total calculée grâce à la moyenne mensuelle.	Bassin versant	Gassert et al. (2013a)
4	<i>Flood Occurrence</i>	Nombre d'inondations durant une période de plusieurs années.	Compilation des données d'inondations.	Bassin versant	Gassert et al. (2013a)
5	<i>Drought Severity</i>	Mesure de la durée moyenne des sécheresses durant une période de plusieurs années.	La sécheresse est indiquée par une valeur nulle (ou négative) de D_c : $D_c = P - ETP$ P : précipitations ETP : évapotranspiration potentielle	Bassin versant	Gassert et al. (2013a)
6	<i>Upstream Storage</i>	Mesure de la capacité de stockage de l'eau disponible en amont d'un site par rapport à l'approvisionnement total en eau de ce site.	Rapport entre l'approvisionnement total et la capacité de stockage en amont. Plus les valeurs sont importantes et plus la zone est capable de compenser les variations de l'approvisionnement en eau puisqu'elle a une capacité de stockage en amont plus grande.	À l'échelle d'un site	Gassert et al. (2013a)
7	<i>Groundwater Stress</i>	Mesure de l'importance des prélèvements d'eau souterraine par rapport à son taux de recharge sur un aquifère donné.	<i>Prélèvement eau souterraine / Recharge durable</i> Les valeurs supérieures à 1 indiquent la consommation non durable d'eau souterraine qui pourrait affecter la disponibilité en eau souterraine et les écosystèmes.	Municipalités ou bassins versants	Gassert et al. (2013a)
8	<i>Return Flow Ratio</i>	Proportion d'eau disponible précédemment utilisée et rejetée en aval sous forme d'eaux usées.	Rapport (%) entre l'utilisation de l'eau non consommée en amont sur le débit disponible. Les fortes valeurs indiquent une plus grande dépendance des usines de traitement et une moindre qualité de l'eau dans les zones où les politiques de traitement sont insuffisantes.	Bassin versant	Gassert et al. (2013a)

N°	Nom de l'indicateur	Description de l'indicateur	Paramètres d'estimation de l'indicateur	Échelle d'application	Référence
9	<i>Upstream Protected Land</i>	Proportion d'approvisionnement en eau total provenant d'écosystèmes protégés.	L'utilisation des terres peut affecter la santé des écosystèmes d'eau douce et avoir de graves répercussions en aval sur la qualité et la quantité d'eau.	Bassin versant	Gassert et al. (2013a)
10	<i>Threatened Amphibians</i>	Proportion d'espèces d'amphibiens d'eau douce classées comme menacées par l'IUCN (<i>International Union for Conservation of Nature</i>).	<i>Espèces menacées / Espèces totales eau douce</i>	Bassin versant	Gassert et al. (2013a)
11	<i>GRACE Groundwater Drought Index (GGDI)</i>	Cet indice correspond aux séries chronologiques normalisées pour l'anomalie des eaux souterraines obtenu du GRACE (<i>Gravity Recovery and Climate Experiment</i>). Il capture la réponse générale aux changements dans les bassins.	1 ^{ère} estimation par la climatologie mensuelle : $C_i = \frac{\sum GWSA_i}{ni}$ Où $i = 1 ; 2 ; \dots ; 12$ GWSAi = anomalie de stockage des eaux souterraines pour le mois. Ensuite, la climatologie mensuelle est supprimée pour estimer l'écart net de stockage des eaux souterraines noté GSD. GSD est normalisé en supprimant la moyenne ($\bar{x}GSD$) et le tout divisé par l'écart-type sGSD : $GGDI \text{ ou } GDI = \frac{GSD - \bar{x}GSD}{sGSD}$	Faible résolution spatiale de GRACE = Application limitée	Thomas (2019) et Thomas et al. (2017)
12	<i>Groundwater Deficit Index (GDI)</i>	Cet indice correspond aux séries chronologiques pour l'anomalie de stockage des eaux souterraines. Ces deux indices GGDI et GDI capturent la saisonnalité des enregistrements des stocks d'eau souterraine.	-	-	Thomas (2019) et Thomas et al. (2017)
13	<i>Reliability (REL)</i>	Représente la probabilité que le stockage des aquifères tombe en dessous d'un certain seuil.	REL est le rapport entre le nombre de conditions satisfaisantes par rapport au nombre de conditions totales.	Bassin versant	Thomas (2019) et Thomas et al. (2017)
14	<i>Resilience (RES)</i>	Probabilité d'un retour à des conditions supérieures à la normale après une utilisation excessive des eaux souterraines ou d'une sécheresse prolongée des eaux souterraines, ou la combinaison des deux. Indique la rapidité avec laquelle un aquifère revient à un état satisfaisant après un état non satisfaisant.	RES est le rapport entre le nombre de fois où une condition satisfaisante suit une condition non satisfaisante sur le nombre total de conditions non satisfaisantes. Reflète les changements dans le stockage qui peuvent être influencés par les relations entre la recharge et les précipitations	Bassin versant	Thomas (2019) et Thomas et al. (2017)

N°	Nom de l'indicateur	Description de l'indicateur	Paramètres d'estimation de l'indicateur	Échelle d'application	Référence
15	<i>Vulnerability (VUL)</i>	Mesure probabiliste qui tient compte de l'ampleur et de l'extension de l'échec.	$VUL = \sum_j \in F s_j e_j$ sj = ampleur d'un événement (GGDIj ou GDIj) ej = probabilité de la gravité de l'ampleur F = Période d'étude	Bassin versant	Thomas (2019) et Thomas et al. (2017)
16	<i>Sustainability Index (SI)</i>	Représente le produit des autres indicateurs de performance.	$SI = REL * RES * (1-VUL)$	Bassin versant	Thomas (2019) et Thomas et al. (2017)
17	<i>Aquatic Fragmentation</i>	Représente l'altération hydrologique potentielle causée par différents types de structures tels que les barrages et les routes. Représente l'impact du développement et de l'utilisation des terres sur un bassin versant.	Deux méthodes permettent l'estimation de cet indice : - % du bassin versant qui est non fragmenté c'est-à-dire au-dessus d'un site de perturbation ; - Densité des routes et des intersections des cours d'eau dans chaque bassin hydrographique. => Combinaison de ces deux méthodes pour avoir un système de classement des bassins hydrographiques.	Bassin versant	Shilling (2013)
18	<i>Geomorphic Condition Indicator (GC)</i>	Mesure de l'état de la géomorphologie d'un bassin versant en fonction de la forme du chenal et de la géométrie de la plaine d'inondation, du substrat du lit, de l'érosion des berges, de la végétation des berges et de la végétation tampon.	Indicateur élaboré à l'aide de 4 processus d'ajustement : - Dégradation des canaux ; - Aggradation des canaux ; - Élargissement des canaux ; - Modification des berges. 20 points max. chacun est associé à ces processus, ces points sont additionnés puis normalisés afin d'obtenir une note de 0 à 100. Score attribué associé au pourcentage total de surfaces imperméabilisées. Analyse utilise le modèle représenté par la ligne à gradient élevé : $GC = 0,197 - 0,15 \ln TIA$ TIA = zone moyenne imperméable totale de chaque bassin versant	Bassin versant	Shilling (2013)
19	<i>Groundwater Quality (Nitrate–Other contaminants–Threats) Indicators</i>	Trois indicateurs ont été choisis : 1) concentration de nitrates comme mesure directe de la qualité ; 2) une région ou collectivité dispose ou non d'une eau potable salubre ; 3) une région soit menacée par les eaux souterraines ce qui jouerait sur la santé.	1) Mesure de la concentration de nitrates idéale : égale ou inférieure aux concentrations naturelles. 2) Pourcentage de la population ayant accès à l'eau potable. 3) Menaces des eaux souterraines fondées sur les fuites des réservoirs souterrains de stockage des produits chimiques.	Bassin versant	Shilling (2013)

N°	Nom de l'indicateur	Description de l'indicateur	Paramètres d'estimation de l'indicateur	Échelle d'application	Référence
20	<i>Native Fish Species (4 Fish Indicators)</i>	Les poissons permettent d'évaluer la santé des bassins versants et des cours d'eau. Plus des espèces de poissons y sont retrouvées, plus les bassins ou cours d'eau sont en bonne santé. Évaluation complète de l'état des poissons autochtones dans les bassins hydrographiques : combinaison de l'état de conservation des poissons (utilisation des deux premiers indicateurs) avec la composition des communautés de poissons (utilisation des deux derniers indicateurs).	4 indicateurs : 1) État de conservation des poissons d'eau douce → évaluation des poissons menacés : superficie occupée, abondance des adultes, risque génétique, changements climatiques et causes anthropiques. Évaluation séparée de chaque espèce puis rapport produit en termes d'espèces totales par catégorie de menaces. Évaluation sur une période de 5 ans. 2) État des principales espèces de poissons → déclin rapide de certaines espèces de poissons autochtones. Utilisation d'une à deux espèces clés pour chaque principal bassin versant. Même protocole que l'état de conservation mais analyse de l'aire de répartition par espèce en supplémentaire. 3) Pourcentage de la richesse spécifique attendue → comparaison de la richesse des espèces autochtones avec le nombre prévu d'espèces de poissons par principal bassin versant. Évaluation sur une période de 5 ans. 4) Proportion d'espèces allochtones → pourcentage de diversité de poissons allochtones par rapport à la diversité totale de poissons pour chaque bassin versant.	À l'échelle du bassin versant A l'échelle régionale par regroupement des résultats pour chaque bassin versant	Shilling (2013)
21	<i>Public Perceptions of Water</i>	Deux types d'indicateurs : 1) Niveau d'appui aux mesures environnementales → Lorsque les électeurs approuvent une mesure environnementale, ils modifient l'orientation publique consciemment et peuvent se faire payer au moyen de taxes ou de frais. 2) Sensibilisation du public à la protection des sources d'eau → Mesurer la sensibilisation du public et le soutien à la protection de l'environnement. Cela se mesure de plusieurs façons : - Connaissance des questions environnementales ; - Dépenses pour soutenir l'environnement ; - Votes pour des mesures favorables à l'environnement.	Enquêtes réalisées où le public a dû répondre aux questions relatives à l'eau. Les personnes ayant répondu aux questions doivent faire part de leurs préférences sur des échelles allant d'une préoccupation importante à l'absence de préoccupation quant aux risques potentiels liés à l'eau.	À l'échelle de la région	Shilling (2013)

N°	Nom de l'indicateur	Description de l'indicateur	Paramètres d'estimation de l'indicateur	Échelle d'application	Référence
22	<i>Water Footprint</i>	Somme de l'eau utilisée directement (cuisine, lavage, nettoyage, loisirs...) ou indirectement (eau touchée par les polluants, produits chimiques ou températures) pour produire des biens et services consommés par une population ou région donnée. C'est un ensemble d'indicateurs de l'utilisation de l'eau (eau bleue, eau verte et eau grise) et c'est un indice de la durabilité de l'eau.	Norme mondiale de <i>Water Footprint</i> : modes d'évaluation différents selon l'échelle spatiale. L'évaluation comporte 4 étapes : établissement des objectifs et de la portée, comptabilité du <i>Water Footprint</i> , évaluation de la durabilité du <i>Water Footprint</i> et élaboration du <i>Water Footprint</i> . Le niveau de détails requis pour les données ainsi que la fréquence des mesures dépendent de l'échelle.	À l'échelle régionale	Shilling (2013)
23	<i>Water Quality Index</i>	L'indicateur est basé sur le principe que plus les surfaces sont imperméables, plus il y a de chances que la qualité de l'eau se dégrade.	Analyse d'images satellitaires afin de révéler la couverture terrestre du bassin. Attribution d'une valeur pour chaque classe de couverture terrestre. Le pourcentage de mesure de surface imperméable est une estimation de l'imperméabilité et non une mesure directe.	A l'échelle du bassin	Shilling (2013)
24	<i>Water Use and Availability</i>	Sert de mesure potentielle de l'impact sur les processus naturels, l'activité économique et le bien-être social. Pour une gestion durable, l'utilisation et l'approvisionnement en eau sont liés à sa productivité par unité de volume d'eau, à son recyclage, aux effets sur les écosystèmes d'où l'eau est prélevée et aux avantages socio-économiques que les collectivités tirent de l'utilisation et de la conservation de cette eau.	Plusieurs aspects de l'utilisation de l'eau sont considérés : - La source de l'eau ; - Le type d'utilisation ; - Le devenir de l'eau utilisée (eau recyclée ou usée). => Suivi complet de l'utilisation d'eau	A l'échelle du bassin	Shilling (2013)
25	<i>California Stream Condition Index</i>	Cet indice mesure l'état des cours d'eau et des bassins hydrographiques selon la composition des communautés de macro-invertébrés benthiques observée par rapport à la composition prévue. La présence et l'abondance de ces communautés permettent d'indiquer la perturbation des cours d'eau, la disponibilité de l'eau ainsi que sa qualité. Cet indice permet de décrire les conditions et de les suivre ou bien de répondre à des mesures réglementaires ou à la restauration.	Il suffit de compter le nombre d'individus par groupe taxonomique fonctionnel sur des sites dits d'essais. Et ces indices sont ensuite comparés avec les indices des sites témoins en tenant compte des variations naturelles. Cet indice comporte deux composantes : - Le rapport entre les groupes taxonomiques observés et prévus ; - La proportion de l'ensemble de différents groupes fonctionnels qui représentent la diversité des espèces, le fonctionnement de l'écosystème et la sensibilité au stress.	À l'échelle d'un cours d'eau ou d'un bassin hydrographique	Shilling (2013)

N°	Nom de l'indicateur	Description de l'indicateur	Paramètres d'estimation de l'indicateur	Échelle d'application	Référence
26	Indice de persistance et de développement des réseaux (IDPR) (Créé initialement pour la vulnérabilité des nappes libres)	Approche indirecte du partage entre ruissellement et infiltration ; ce qui est un problème récurrent dans l'estimation de la recharge des nappes. Il permet de rendre compte de la capacité intrinsèque du sol à laisser infiltrer ou à ruisseler les eaux de surface en comparant un réseau hydrographique théorique (hypothèse milieu homogène) avec un réseau hydrographique mis en place en contexte géologique hétérogène.	Calcul en comparant un réseau théorique indépendant, calculé à partir d'un MNT, à un réseau naturel. <i>Distance du point au plus proche cours d'eau réel / Distance du point au plus proche cours d'eau théorique.</i> Indice << 1 → infiltration majoritaire (réseau réel moins développé que théorique). Indice >> 1 → Ruissellement prédominant (réseau réel plus développé que théorique).	A l'échelle du bassin	Seguin et Willeumier (2006)
27	Indice de résistance à la sécheresse (IRIS)	3 critères de résistance : - Temps de demi-décroissance ; - Taille des systèmes aquifères ; - Indice de persistance et de développement des réseaux.	Note allant de 1 à 5 selon le critère. Plus la note est élevée et plus la résistance à la sécheresse est forte. Calcul par une somme pondérée des notes attribuées (N) avec un poids appliqué aux trois critères : Temps de demi-décroissance → 5 ; taille du système aquifère → 1 ; IDPR → 3. <i>IRIS = 5. N_T DEMI + 2. N_{IDPR} + N_{SUPERFICIE}</i>	A l'échelle de l'aquifère	Seguin et Willeumier (2006)
28	Épuisement de l'eau souterraine total dû au climat et aux prélèvements	Il correspond au changement annuel moyen dans le stockage des eaux souterraines basé sur un modèle. Plusieurs modèles sont utilisés pour cet indicateur : le modèle transWU*, le modèle NAT** Le changement annuel est établi en soustrayant le stockage eau souterraine moyen de l'année i + 1 du stockage de l'eau souterraine moyen de l'année i.	<i>Stockage eau souterraine = (stockage eau souterraine moyen de l'année i) - (stockage eau souterraine moyen de l'année i+1)</i> Lorsque l'indicateur est positif, il y a une diminution de stockage d'eau souterraine donc un épuisement	-	Herbert et Döll (2019)
29	Épuisement de l'eau souterraine dû aux activités anthropiques	Cet indicateur sert à calculer l'épuisement de l'eau souterraine induit par l'Homme afin d'isoler l'impact de l'utilisation de l'eau par l'Homme sur le stockage de l'eau souterraine des impacts du changement climatique.	<i>(L'épuisement eau souterraine du modèle transWU*) - (l'épuisement eau souterraine du modèle NAT**)</i>	-	Herbert et Döll (2019)
30	Recharge de l'eau souterraine par habitant	Cet indicateur indique la disponibilité potentielle d'eau souterraine pour les humains.	<i>Recharge naturelle annuelle moyenne / Population annuelle</i>	Municipal et MRC	Herbert et Döll (2019)

N°	Nom de l'indicateur	Description de l'indicateur	Paramètres d'estimation de l'indicateur	Échelle d'application	Référence
31	Prélèvements d'eau souterraine / recharge eau souterraine	C'est un indicateur largement utilisé pour évaluer le stress des eaux souterraines, il relie les prélèvements d'eau souterraine dans tous les secteurs aux ressources en eaux souterraines renouvelables.	<i>Prélèvements annuels moyens du modèle constWU*** / Recharge annuelle moyenne</i>	Municipal, MRC et bassins	Herbert et Döll (2019)
32	Prélèvements nets eau souterraine / recharge eau souterraine	Il est défini comme le rapport entre le prélèvement d'eau souterraine annuel moyen du modèle constWU*** et la recharge annuelle moyenne.	<i>Prélèvements nets annuels moyens / Recharge annuelle moyenne</i> <i>Prélèvements nets = Prélèvements totaux - Flux de retour des SW dans GW et de l'irrigation des GW</i> Seuls les prélèvements nets > 0 sont interprétés comme stress hydrique.	Municipal, MRC et bassins	Herbert et Döll (2019)
33	Réduction du rejet naturel d'eau souterraine dans l'eau de surface dû à l'utilisation des eaux par l'Homme	Cet indicateur correspond au changement relatif du débit des eaux souterraines dans les masses d'eau de surface en raison de l'utilisation de l'eau par les humains.	<i>Modification altérée du rejet eau souterraine du modèle transWU* - Rejet naturel eau souterraine du modèle NAT** / Rejet naturel eau souterraine du modèle NAT</i> Le rejet naturel minimal étant de 0, cet indicateur est alors compris entre -1 (ou -100%) à +∞. Les données utilisées se font sur une période comprise entre 2001 et 2010 puisque c'est à cette période que la diminution des eaux souterraines est la plus élevée. Indice basé sur les valeurs annuelles moyennes du rejet naturel et de la modification altérée sur 2001 à 2010.	-	Herbert et Döll (2019)
34	Prélèvement eau souterraine / recharge eau souterraine + flux de retour de l'irrigation	Cet indicateur est calculé afin d'évaluer l'influence des flux de retour de l'irrigation sur les niveaux des indicateurs.	<i>Prélèvements annuels moyens / (Recharge annuelle moyenne + Flux de retour de l'irrigation)</i> <i>Le flux de retour de l'irrigation = Prélèvements - Prélèvements nets</i>	-	Herbert et Döll (2019)

* : Ce sont des indicateurs de performance. Ils servent à évaluer l'utilisation durable des eaux souterraines.

Le modèle transWU * et le modèle NAT ** ont été utilisés pour les indicateurs sensibles à la dynamique de stockage des eaux souterraines. Les deux exécutions du modèle couvrent la période de 1901-2010 de sorte que les conditions de stockage du début de la période de référence soient représentées de manière optimale. Dans le parcours transWU, l'utilisation de l'eau de tous les secteurs varie dans le temps.

Le modèle constWU*** a été mis au point pour les indicateurs comparant l'utilisation des eaux souterraines et la recharge des eaux souterraines pour les années 2010 et 2050. Pour les deux années, il suffisait de simuler une période de 30 ans seulement (1981-2010 et 2041-2071) depuis que l'utilisation de l'eau souterraine ainsi que la recharge des eaux souterraines ne sont pas sensibles au stockage initial du WaterGAP. De plus, les secteurs indépendants du climat, à savoir la production domestique, la fabrication et la production d'énergie thermique, ont été maintenus constants pendant les exécutions du modèle constWU en utilisant la valeur annuelle des années 2010 et 2050, respectivement. Cette approche s'explique par le fait que la moyenne des prélèvements d'eaux souterraines sur la période de trente ans allant de 1981 à 2010 sous-estimerait la pression actuelle sur les ressources en eaux souterraines, qui s'est accrue au cours des deux dernières décennies.

En comparant les prélèvements annuels moyens d'eaux souterraines de 1981 à 2010 des modèles constWU et transWU, ce dernier produit une réduction de 8% de retraits d'eaux souterraines de moins dans le monde. Pour le secteur de l'irrigation dépendant du climat, toutefois, des séries temporelles transitoires d'utilisation de l'eau ont été calculées pour tenir compte de la nature stochastique des conditions météorologiques.

Tableau 3.2 : Grille de critères pour sélectionner les indicateurs à produire au Québec

Critères	Description
Échelle d'application	Les indicateurs applicables à une échelle régionale ou d'un bassin sont conservés, mais l'application des indicateurs doit se faire à l'échelle locale, c'est-à-dire à l'échelle des municipalités ou de petites unités de gestion.
Données disponibles	Est-ce que les données disponibles permettent de produire les indicateurs ?
Mise à jour des données	Est-ce que les données utilisées pour la production des indicateurs peuvent-être ou pourront-être mises à jour annuellement ou tous les 5 ans ?

Les périodes de sécheresse pourront donc être observées par année et mises en graphiques. Une carte de tendance pourra également être produite. De plus, les différentes intensités de sécheresse pourront être ajoutées. Un outil de surveillance des sécheresses au Canada (OSSC) est mis en place par le Ministère de l'Agriculture et de l'Agroalimentaire du Canada (AAC) (<http://www.agr.gc.ca/fra/programmes-et-services/guetter-la-secheresse/outil-de-surveillance-des-secheresses-au-canada/a-propos-de-l-outil-de-surveillance-des-secheresses-au-canada/?id=1463576995558>) pour signaler une sécheresse dans le pays et différentes intensités y sont appliquées :

- Sécheresse anormale ;
- Sécheresse modérée ;
- Sécheresse grave ;
- Sécheresse extrême ;
- Sécheresse exceptionnelle.

Il existe aussi le *North American Drought Monitor* (NADM) correspondant à une base de données de la sécheresse pour les États-Unis, le Canada et le Mexique.

3.2.4 Groundwater stress (prélèvements / recharge)

C'est un indicateur qui a déjà été produit au Québec (Carrier et al., 2013a ; Martin et al., 2013 ; Lefebvre et al., 2015 ; M'Couezou, 2018). Cet indicateur pourrait être produit à l'échelle du bassin versant ou du bassin hydrogéologique (ou d'autres unités de gestion), mais aussi à l'échelle municipale. Cette dernière échelle est intéressante pour l'étude car elle permet d'observer les usages de l'eau de la municipalité. C'est un indicateur « fondamental » à produire, mais il faudra mieux définir le seuil indiquant un usage « important » de la recharge.

3.2.5 Résilience

La résilience est un indicateur intéressant qui peut être estimé par les hydrogrammes de puits. Toutefois, pour que cet indicateur puisse être calculé, il faut qu'il y ait eu une baisse significative des niveaux d'eau, ce qui est une condition rarement observée au Québec.

3.2.6 *Groundwater Quality*

L'indicateur de qualité de l'eau souterraine possède deux indices. C'est un indicateur intéressant mais il faudrait distinguer les causes naturelles de la présence d'un contaminant des causes anthropiques. Les données issues des projets PACES permettraient de produire cet indicateur, mais seulement à une échelle régionale. La synthèse des données géochimiques issues des projets du PACES réalisée par Bondu et al. (2019) pourrait servir de base à la production d'indicateurs de qualité à l'échelle régionale. Ces travaux ont fourni une base de données géochimique uniforme et cohérente qui facilite grandement l'exploitation des données. La faible densité de l'échantillonnage des puits réalisé dans le cadre des projets du PACES ne peut toutefois que donner des indications des problématiques de qualité d'eau présente dans une région. Il faudrait mettre en place un suivi à l'échelle municipale et impliquer la Santé publique lorsque des problèmes de qualité d'eau sont indiqués dans une région.

3.2.7 *Public Perceptions of Water*

Cet indicateur sur la perception du public par rapport à l'eau est très intéressant mais il faudrait enquêter auprès des populations et cela prendrait du temps avant que cet indicateur puisse être produit. Pour cet indicateur, mais aussi pour les autres indicateurs nécessitant des informations à l'échelle régionale, il pourrait être pertinent de mandater les OBV afin qu'ils rassemblent les informations de façon uniforme et les intègrent à leur portrait de l'eau, tout en tenant un répertoire à jour des informations requises pour la production d'indicateurs reliés aux « événements » (perception du public, problèmes de qualité d'eau, problèmes de quantité d'eau, conflits d'usage de l'eau, gestion active des aires d'alimentation des puits municipaux, etc.).

3.2.8 *Indice de résistance à la sécheresse (IRIS)*

Cet indicateur est intéressant mais il est trop complexe en termes de calcul. Toutefois, il serait important de disposer d'un indicateur permettant d'évaluer l'impact du climat par rapport à l'impact des prélèvements sur les niveaux d'eau souterraine. Un indicateur couramment utilisé est l'écart des précipitations annuelles par rapport aux précipitations moyennes annuelles sur une grande période (20 ou 25 ans). Cet indicateur ne nécessite que des données météorologiques pour être produit. Cet indicateur peut être mis en relation avec un hydrogramme de puits afin d'évaluer l'impact des périodes sèches ou humides sur les niveaux d'eau. Une tendance à la baisse des niveaux d'eau qui ne serait pas reliée à une période de faibles précipitations pourrait ainsi indiquer une autre cause, notamment l'exploitation excessive ou un changement de l'utilisation du territoire. Cet indicateur n'est pas défini spatialement, mais plutôt en fonction du temps. Pour bien l'exploiter, il faudrait bénéficier aussi d'hydrogrammes de puits mesurés dans les secteurs sensibles aux changements de la recharge induits par des variations des conditions météorologiques. Le projet PACC a produit une classification des puits du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ) qui pourrait servir à la sélection des hydrogrammes d'intérêt (Gosselin et al., 2021). Nastev et al. (2006) ainsi que Lavigne et al. (2010) avaient montré que les niveaux d'eau dans les hauts topographiques correspondant aux zones de recharge étaient les plus sensibles à des variations de la recharge induites par des conditions climatiques différentes.

3.2.9 *Tableaux synthèse des indicateurs de stress hydrique*

Les tableaux suivants (tableaux 3.3 et 3.4) résument respectivement les informations de base qui sont pertinentes pour évaluer le stress hydrique et les indicateurs de stress dont la production devrait être testée afin de mieux évaluer leur intérêt.

Tableau 3.3 : Informations d'intérêt pour évaluer le stress hydrique d'après Martin et al. (2013) et le PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013a)

Information	Pertinence	Disponibilité
Paramètres météorologiques (précipitations, température, etc.)	- Données de base pour l'établissement des bilans hydrologiques - Disponible localement - La variabilité des conditions, surtout des précipitations, peut être mise en relation avec le changement des conditions hydrologiques et hydrogéologiques	- Généralement disponibles aux stations météorologiques ou sous forme de grilles - Les conditions historiques et présentes sont disponibles, de même que les prédictions des modèles climatiques (Ouranos)
Paramètres hydrologiques (débit total moyen, débit d'étiage, débit de base par séparation d'hydrogramme, etc.)	- Données de base pour l'établissement des bilans hydrologiques - Disponible régionalement à l'échelle des bassins jaugés - Indication à la fois de la disponibilité totale de l'eau (débit total) et de l'eau souterraine (débit de base)	- Généralement disponibles aux stations hydrométriques ou certaines informations peuvent être extraites de l'atlas hydroclimatique du Québec - Les conditions historiques et présentes sont disponibles, de même que les prédictions des modèles climatiques
Propriétés hydrauliques (transmissivité et emmagasinement)	- Peuvent permettre d'estimer la réponse d'un aquifère au pompage et le potentiel aquifère - Disponible régionalement ainsi que pour des puits spécifiques, mais les valeurs locales sont difficiles à prédire	- Estimations faites par les projets PACES, mais grande variabilité des valeurs possibles pour un même aquifère - Les estimations n'ont pas été faites de la même façon pour tous les projets PACES
Recharge	- Les estimés de la recharge sont essentiels pour évaluer l'exploitation durable de l'eau souterraine - Si la recharge est évaluée avec un modèle physique (ex. : HELP), il est possible de faire des prédictions de l'évolution future de la recharge en plus d'estimer la recharge historique - Les estimés régionaux de recharge pourraient potentiellement être mis en relation avec les débits d'étiage des cours d'eau	- Généralement disponible à partir des projets PACES, mais les méthodes d'estimation ne sont pas les mêmes pour tous les projets - La proportion de la recharge qui peut être exploitée n'est pas facile à évaluer et elle devrait être définie en considérant le débit d'étiage à maintenir ; il faut donc mettre en relation les débits écologiques et la proportion de recharge exploitable
Niveaux d'eau	- Les niveaux d'eau souterraine sont une information de base sur l'état de la ressource - Les indications données par les niveaux d'eau peuvent être contrôlées par les conditions locales et peuvent être difficiles à interpréter, notamment les effets de l'exploitation vs la météo	- Le RSESQ a été complété dans le cadre du PACES, mais la durée de suivi n'est pas toujours suffisante - Les travaux en voie de réalisation par l'INRS dans le projet Plan d'action sur les changements climatiques (PACC) vont donner des outils pour aider à exploiter ces données
Usages de l'eau	- Les estimés de l'usage de l'eau sont essentiels pour évaluer le stress sur les ressources en eau - Les prélèvements d'eau souterraine sont généralement « nets » alors qu'il y a consommation partielle des prélèvements d'eau de surface (retour d'une partie de l'eau) - Besoin d'un processus en place pour intégrer les données des divers ministères et garder les estimés de l'usage de l'eau à jour - En plus des usages actuels, il faudrait être en mesure de prédire l'évolution future des usages (voir le projet RADEAU pour l'évolution de l'usage agricole)	- Données de base disponibles sur la population, les approvisionnements municipaux, les activités agricoles, les grands préleveurs et les puits résidentiels (le SIH ne compile pas tous les puits) - Estimations des usages réalisées dans le cadre du PACES, mais pas toujours avec les mêmes méthodes
Problématiques d'approvisionnement	La compilation systématique et le suivi des problèmes d'approvisionnement municipaux pourraient donner une indication d'un usage non durable (quantité, qualité, conflits, restrictions d'usage, etc.)	Ces problèmes ne sont pas présentement répertoriés, mais on pourrait envisager d'impliquer les OBV pour effectuer cette tâche

Tableau 3.4 : Indicateurs de stress hydrique recommandés (voir tableau 3.1 et les sections précédentes pour la définition des indicateurs)

Indicateur	Pertinence et limites	Données requises
Indicateurs climatiques (No. 5 au tableau 3.1, section 3.2.3)	- Indicateurs pouvant être produits aux échelles locales et régionale - Peut aider à interpréter les tendances des niveaux d'eau et les problèmes saisonniers d'approvisionnement en eau (souterraine ou de surface) et à déceler l'effet de l'augmentation des prélèvements ou du changement dans l'utilisation du territoire - Pourrait représenter les conditions actuelles ou futures à l'aide des modèles climatiques	- Données météo disponibles aux stations et sur grille - Modèles climatiques fournissent des prédictions des conditions futures - Sécheresse : Précipitations – ETP (basé sur les données météo) - Niveau des précipitations : écart annuel des précipitations par rapport à la moyenne à long terme (20 ou 25 ans)
Stress hydrique de base (No. 1 au tableau 3.1, section 3.2.1)	- Stress à l'échelle régionale - Indicateur à l'échelle d'un bassin qui doit être jaugé - Tient compte ou non du débit écologique à réserver - Pourrait représenter les conditions actuelles ou futures	- Débits d'un cours d'eau - Prélèvements totaux en eau de surface et souterraine dans le bassin - Pourrait aussi être basé sur les prédictions de l'atlas hydroclimatique et des projections d'usages de l'eau
Stress sur l'eau souterraine (No. 7 au tableau 3.1, section 3.2.4)	- Le rapport entre les prélèvements et la recharge est un indicateur fondamental - Le seuil d'exploitation par rapport à la recharge qui serait jugé durable doit être mieux défini, de même que le seuil « d'alerte »	- Des estimations de l'usage et de la recharge ont été faites pour tous les projets PACES - Les méthodes d'estimation varient entre les projets - Les deux estimations doivent être mises à jour et suivies
Qualité de l'eau souterraine (section 3.2.6)	- Bien que ce soit un indicateur de qualité plutôt que de quantité, cet indicateur pourrait aider à définir la proportion des ressources en eau souterraine qui est exploitable par rapport à sa qualité naturelle - Les critères de classement de la qualité de l'eau souterraine restent à définir - Cet indicateur pourrait être produit régionalement mais pas localement à cause de la faible densité des points de contrôle	- Des projets PACES ont classé la qualité d'eau ou ont produit des statistiques par rapport aux dépassements de critères de potabilité - Bondu et al. (2019) ont fait une synthèse des données géochimiques produites par les projets PACES qui facilite l'interprétation de la qualité d'eau
Problèmes d'approvisionnement	- Le suivi du nombre et des types de problèmes d'approvisionnement pourrait indiquer des conditions non durables ou difficiles d'approvisionnement des municipalités dans une région - La compilation pourrait aussi être d'intérêt à l'échelle du Québec - Le diagnostic et les mesures de mitigation de tels problèmes exigeraient des études régionales ou locales en collaboration avec les municipalités	Les problèmes d'approvisionnement ne sont pas présentement suivis systématiquement ; cette compilation resterait à faire

3.3 Combinaison d'indicateurs et classement des régions

Suite à la production des indicateurs de stress, il faudra aussi élaborer des « seuils d'alerte » permettant d'identifier les secteurs ou les périodes avec des niveaux de stress jugés important ou même qui nécessiteraient des mesures de mitigation ou l'amorce d'une gestion active. En plus de l'utilisation de seuils pour chaque indicateur, il serait aussi envisageable de considérer l'ensemble des indicateurs de stress, possiblement combiné à des indicateurs de gestion durable, afin d'identifier des secteurs « à risque » et qui méritent d'abord une investigation plus poussée. Un schéma décisionnel à destination des analystes, inspiré de travaux engagés en Californie (CDWR, 2017), est d'ailleurs à l'étude au ministère (Stapinsky, 2021).

Le *World Resources Institute* (WRI) représente un exemple d'institution ayant fait la production et l'utilisation d'un ensemble d'indicateurs (Gassert et al., 2014) afin d'évaluer un risque global relié à l'eau (*Global Water Risk*) (Hofste et al., 2019) pour chaque pays du monde afin d'établir un classement des pays par niveau de risque (Gassert et al., 2013b). Le risque global de l'eau évalué par le WRI va toutefois bien au-delà d'une évaluation du stress hydrique en combinant des indicateurs des conditions reliées à la quantité et à la qualité de l'eau en plus d'indicateurs des risques réglementaires. L'idée d'établir un classement serait tout de même intéressante afin de prioriser les secteurs où poser des actions nécessaires à la gestion durable des ressources en eau souterraine.

La Californie (CDWR, 2019) fournit aussi un exemple intéressant d'un processus de classement des bassins. Ce processus considère 8 conditions présentes dans le bassin afin de classer dans l'un de quatre niveaux de priorité. Certaines actions de gestion, incluant la restriction des usages, doivent être prises lorsque les bassins sont classés dans l'un des deux niveaux de priorité les plus élevés. Au Québec, un processus de ce genre pourrait considérer certains des indicateurs de gestion durable ainsi que des indicateurs de stress hydrique afin d'identifier les secteurs nécessitant une attention particulière. Ce classement serait envisageable à différentes échelles et selon des limites administratives (municipalité, MRC, région administrative) ou naturelles (sous-bassins, grands bassins versants ou régions couvertes par un OBV).

3.4 Indicateurs locaux

Les indicateurs identifiés dans la section 3.2 peuvent être produits à l'échelle régionale ou municipale. Ces échelles sont d'intérêt pour identifier les secteurs qui seraient sous un fort stress hydrique. Les indicateurs de stress hydrique qui seront éventuellement retenus pourront ainsi faire l'objet d'une production systématique dans les régions ayant été couvertes par un projet du PACES qui donne une grande partie des informations requises pour la production des indicateurs. Toutefois, il sera aussi nécessaire de répertorier des indicateurs « locaux » de stress hydrique qui pourraient aider les analystes du MELCC à prendre leurs décisions d'allocation d'eau (permis d'exploitation). Cet inventaire reste à faire, mais il est a priori possible de penser que les informations suivantes pourraient être d'intérêts pour la production d'indicateurs locaux : approvisionnements municipaux et leurs aires de protection, grands préleveurs et leurs débits d'exploitation, densité des puits résidentiels (sur la base du SIH), rayon d'influence du prélèvement faisant l'objet d'une demande de permis (sur la base du débit prévu et des propriétés hydrauliques de l'aquifère exploité), milieux sensibles (cours d'eau ou milieux humides), etc. Contrairement aux indicateurs de stress hydrique décrits précédemment, les indicateurs locaux ne seraient produits que dans les secteurs où une demande de permis de prélèvement d'eau souterraine devrait faire l'objet d'une évaluation, bien que certains indicateurs se prêtent aussi à une cartographie systématique (ex. : densité des puits résidentiels). En utilisant les informations disponibles à l'intérieur des municipalités, il serait envisageable de définir la répartition spatiale des différents types d'usage de l'eau souterraine dans une municipalité : usage agricole réparti dans les secteurs agricoles à partir de la carte d'occupation des sols ; usage résidentiel réparti à partir de la densité de puits du SIH ou en fonction du nombre de résidences hors des secteurs desservis par un aqueduc ; usage industriel, commercial ou institutionnel réparti à l'intérieur des secteurs résidentiels où aux localisations des puits municipaux ; grands préleveurs identifiés individuellement.

4 APPLICATION DES INDICATEURS DE STRESS HYDRIQUE

La base de données du projet PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013a) a été utilisée pour produire des exemples de certains indicateurs considérés comme ayant le plus d'intérêt dans le contexte québécois (tableau 3.4).

Dans un premier temps, l'élaboration d'une grille d'extraction des données spatialisées a été nécessaire pour faciliter les changements d'échelles entre les cartes produites (municipalités, MRC et bassins versants). Les étapes de réalisation de cette grille et sa structure sont détaillées à l'annexe 1. De même, afin de visualiser efficacement les indicateurs spatialisés, le format des cartes a également été adapté (section 4.2). Trois indicateurs ont pu être appliqués dans le cadre de l'étape 1 du projet, soit l'indicateur hydrologique (section 5), de stress sur l'eau souterraine (section 6) ainsi que des indicateurs climatique et piézométrique (section 7). Suite à ces travaux préliminaires (Domaine et al., 2020), des secteurs hydroclimatiques ont été définis (section 8) afin de produire un indicateur climatique fiable et représentatif qui sera testé dans le cadre du projet connexe de production d'un *Bulletin de l'état des nappes* au Québec. Suite à ce travail, il est apparu nécessaire de produire un indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine afin de préciser les usages à l'intérieur des municipalités et de cibler de potentiels conflits entre les acteurs de l'eau (section 9). Ce dernier a alors permis d'appliquer l'indicateur de stress sur l'eau souterraine (ratio « usage/recharge ») en considérant les limites naturelles (bassins versants hydrogéologiques) et donc plus représentatives (section 10). Il sera alors possible de produire les indicateurs développés dans le cadre du présent rapport sur l'ensemble du Québec municipalisé sous certaines conditions évoquées dans la section 11.

4.1 Élaboration d'une base de données spatialisée sur grille

Cette étape est nécessaire afin de faciliter le travail de production des indicateurs spatialisés comme l'indicateur de stress sur l'eau souterraine (section 6) ou encore l'indicateur de stress hydrique de base (section 5).

En effet, les données issues de projets régionaux, tels que les PACES, peuvent avoir été produites à diverses échelles. C'est notamment le cas lors de la production de l'indicateur de stress sur l'eau souterraine (section 6) où les données d'entrée sont disponibles à deux échelles différentes : l'usage de l'eau est déterminé à l'échelle des municipalités tandis que la recharge est toujours établie sur la base d'un maillage (ici de 250 x 250 m). Il est donc souvent difficile, voire hasardeux, de les concilier correctement de façon rapide et efficace. De plus, cela est sujet à de nombreuses sources d'erreurs lors des manipulations des couches d'informations.

Il a donc été décidé de créer une grille d'extraction régionale sur toute la Montérégie Est en se basant sur le maillage déjà utilisé pour l'élaboration de la grille de recharge. Ceci permet d'obtenir une valeur d'« usage synthétique » de l'eau sur une maille de 250 x 250 m associée à une valeur de recharge « réelle ».

L'intérêt de cette grille réside principalement dans le fait que les données peuvent alors être extraites sur le territoire voulu afin d'établir un indicateur représentatif. Puis, en associant chaque maille, il est alors possible de générer des indicateurs sur une large gamme d'échelle et de surfaces : municipalités, MRC ou bassins versants de divers niveaux. Les mailles peuvent également être combinées afin de produire un indicateur sur un secteur spécifique.

De même, le format simplifié de la grille (shapefile de points aux 250 m) permet d'extraire simplement les données si une carte venait à être modifiée ou mise à jour. Cela pourrait être le cas avec les projections des modèles climatiques : modifications des apports en eau (recharge) dans le futur dans le cadre des changements climatiques ou encore des changements des usages de l'eau dans les prochaines années.

Cette grille permet non seulement de produire l'indicateur de stress sur la ressource en eau souterraine (section 6) mais elle est également utile dans l'élaboration de l'indicateur de stress hydrique de base (section 5). Elle est ainsi facilement transposable d'un indicateur à un autre.

Finalement, la mise en œuvre rapide de cette grille sur le territoire du PACES Montérégie Est suggère que ce travail pourrait être assez facilement reproduit sur d'autres territoires dans le cadre de ce projet tant que les données y sont disponibles.

En somme, cette grille présente plusieurs avantages :

1. Réduction des manipulations et des erreurs avec des jeux de données variés ;
2. Uniformisation des données sur chaque maille ;
3. Extraction simplifiée vers la mise à l'échelle souhaitée (municipalités, MRC ou bassins versants) et possibilité d'application sur des secteurs spécifiques ;
4. Procédure de modification facilitée pour une éventuelle mise-à-jour des données dans le futur ou dans le cadre des projections des modèles climatiques ;
5. Possibilité d'utilisation pour plusieurs indicateurs spatialisés ;
6. Procédure et grille reproductibles à plus large échelle sur les secteurs disposant de données distribuées (Sud du Québec, territoire couvert par les PACES et Québec municipalisé).

Les détails de production de la grille ainsi que sa structure sont décrits à l'annexe 1.

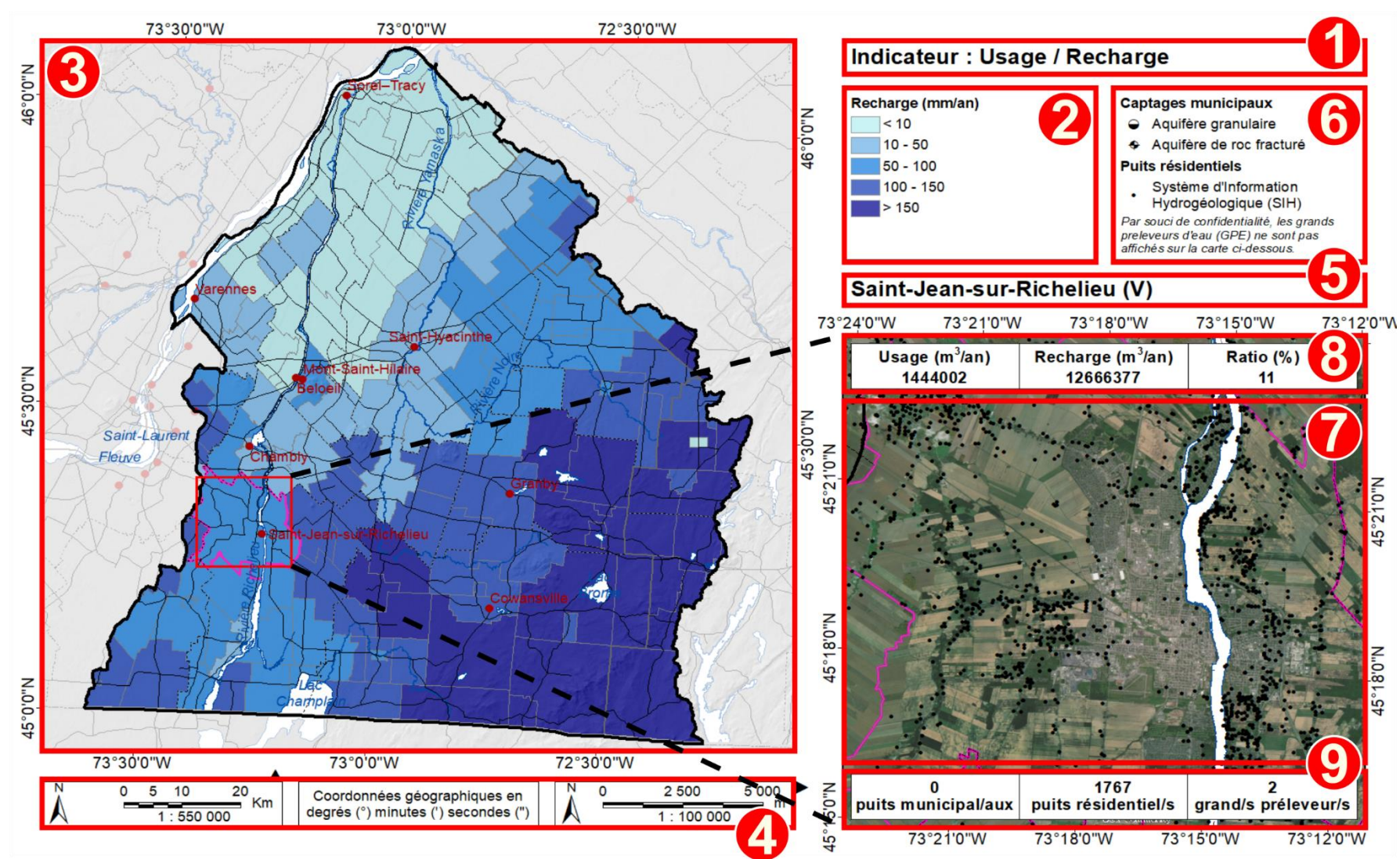
4.2 Mise en forme des cartes d'indicateurs

Certains des indicateurs de stress hydrique produits dans le cadre de ce projet, se prêtent bien à une analyse cartographique. C'est le cas de l'indicateur de stress sur l'eau souterraine (section 6) ou encore celui du stress hydrique de base (section 5). Afin de faciliter la tâche des analystes, le formatage des cartes correspond à une adaptation des planches cartographiques mises en œuvre dans le projet PACC (Plan d'action sur les changements climatiques) de l'INRS (Gosselin et al., 2019) pour définir des indicateurs à l'échelle des puits du RSESQ (Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec).

Il est alors possible de produire une planche cartographique pour chaque indicateur en se basant sur les données extraites de la grille d'extraction et le tableau de compilation des données sur le territoire souhaité (encart 3 de la figure A.3.1 de l'annexe 3). La structure de la planche cartographique pour l'indicateur de stress sur l'eau souterraine, et plus particulièrement pour la recharge, est détaillée sur la figure 4.1 avec pour exemple le cas de la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu. Cette planche cartographique est organisée en plusieurs encarts permettant à l'analyste d'avoir le niveau de détails suffisant : 1) indicateur concerné, 2) légende détaillée de l'indicateur, 3) carte de l'indicateur sur l'ensemble du territoire (au 1/550 000 pour le PACES Montérégie Est), 4) échelles des deux cartes et coordonnées géographiques, 5) nom du territoire concerné soit le nom de la municipalité dans le cas présent (cela pourrait être également une MRC, un bassin versant ou tout autre type de territoire délimité), 6) légende de la carte détaillée, 7) carte détaillée permettant l'ajout d'informations, 8) statistiques relatives à l'usage et à la recharge sur le territoire concerné (ici, la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu) et 9) nombre de puits implantés sur le territoire visé (ici, celui de la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu) selon leur type : municipaux, résidentiels et grands préleveurs.

Sur la carte générale, la municipalité (ou le territoire) sélectionnée est indiquée automatiquement par un polygone rose afin de directement visualiser la zone ciblée sur la carte détaillée (figure 4.1). De même, les informations affichées dans les encarts « 8 » et « 9 » sont mises à jour de façon automatique pour chaque territoire visé. Selon l'indicateur choisi, ces informations pourront être rapidement adaptées en fonction des données nécessaires à l'analyste.

Ce format présente plusieurs avantages. En effet, il permet une certaine uniformisation entre les projets du MELCC définissant des indicateurs puisque basé sur une mise en forme similaire au PACC. De plus, le travail des analystes est grandement facilité puisque la planche cartographique regroupe une bonne partie des informations pertinentes utiles à l'analyse des données. La visualisation à deux échelles permet à l'utilisateur d'avoir une vue d'ensemble de l'indicateur (carte générale) puis de venir préciser localement les « sources ou facteurs » de stress sur la ressource à l'échelle souhaitée (carte détaillée), soit l'échelle municipale dans le cas présent. En concentrant l'information sur une seule planche cartographique, la lecture de l'information est facilitée et le temps de travail de l'analyste très largement réduit puisque cela évite le traitement de données potentiellement inadaptées voire inutiles et cela prévient également la multiplication de fichiers aux formats variés. Finalement, la carte détaillée apporte d'autres informations pertinentes pouvant être utiles à l'analyse (statistiques reliées à l'indicateur et nombre de puits). Dans le cas de l'indicateur de stress sur les eaux souterraines, la localisation des puits et l'affichage des orthophotographies permettent respectivement de se rendre compte de la pression sur la ressource en eau et du contexte local (occupation du sol et aménagement locaux).



5 STRESS HYDRIQUE DE BASE (USAGE/DÉBIT)

Cet indicateur estime le rapport entre la somme de l'utilisation totale des ressources en eau (de surface et souterraine) avec le débit de base ou débit total du cours d'eau du bassin. Cet indicateur peut donc être produit à l'échelle des grands bassins ou de sous-bassins versants en fonction des données de débit total disponibles. L'annexe 2 présente les détails de production de cet indicateur.

5.1 Produits préliminaires pour l'indicateur de stress hydrique de base

Les données d'utilisation totale de l'eau (souterraine et surface) proviennent du projet PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013b). La base de données spatialisée sur grille présentée à la section 4.1 a été utilisée afin de calculer l'utilisation totale de l'eau pour chaque bassin versant ou portion de bassin versant à partir des données PACES disponibles. L'utilisation d'une version simplifiée de cette grille a permis de produire la somme des usages pour chaque maille à l'intérieur des bassins versant pour lesquels l'indicateur doit être calculé. L'annexe 2 décrit en détail la méthodologie utilisée pour obtenir ce paramètre. Puisque les données d'usage de l'eau correspondent à 2010, le stress hydrique de base représente aussi l'année 2010.

Les données de débit total des cours d'eau proviennent de deux sources, soit les mesures aux stations hydrométriques et les données historiques de débit total simulé pour les tronçons de l'Atlas hydroclimatique 2018 (MDDELCC, 2018) (tableau 5.1 et figure 5.1). La sélection des stations hydrométriques utilisables a été faite afin que tout le bassin drainé par la station ou le tronçon soit complètement compris à l'intérieur des limites du projet PACES Montérégie Est puisque les données d'usage de l'eau ne sont pas disponibles à l'extérieur de cette limite. Ainsi, trois stations de jaugeage ont été sélectionnées. Pour la sélection des tronçons de l'Atlas hydroclimatique, la même approche a été appliquée. De plus, nous avons considéré que les projections de l'Atlas hydroclimatique se limitent aux bassins versants dont la superficie est supérieure à 250 km² (MDDELCC, 2018). Au final, seuls les tronçons dont l'aire de drainage était supérieure à 500 km² ont été retenus pour le calcul de l'indicateur hydrologique (annexe 2).

Le tableau 5.1 présente l'identifiant des stations et des tronçons sélectionnés ainsi que leur aire drainée. Lorsque possible, un tronçon de l'Atlas hydroclimatique a été associé à une station de jaugeage pour les fins de comparaison. La colonne qui présente le pourcentage de l'écart entre les bassins des stations hydrométriques et des tronçons indique qu'en fait seul les bassins de la station de jaugeage 030345 et du tronçon MON0016 peuvent être comparés puisque la différence en superficie est négligeable (3 %). La figure 5.1 présente la position des stations de jaugeage (cercle rouge) à gauche et celle des tronçons (ligne bleue) à droite. Les bassins associés y sont également représentés.

Tableau 5.1 : Stations hydrométriques et tronçons de l'Atlas hydroclimatique sélectionnés pour le calcul de l'indicateur hydrologique

Stations hydrométriques		Tronçons de l'Atlas hydroclimatique 2018		Pourcentage d'écart de superficie entre les 2 bassins
Numéro de la station de jaugeage	Aire du bassin versant correspondant au débit mesuré à la station (km ²)	Numéro du tronçon	Aire du bassin drainée par le tronçon (km ²)	
-	-	MON0003	4599	-
030345	3330	MON0016	3245	3 %
030302	1230	MON0057*	1653	26 %
-	-	MON0072*	777	-
030421	367	MON0120	542	32 %

* : influence potentielle de barrage. En gras : seul bassin pouvant être utilisé à des fins de comparaisons.

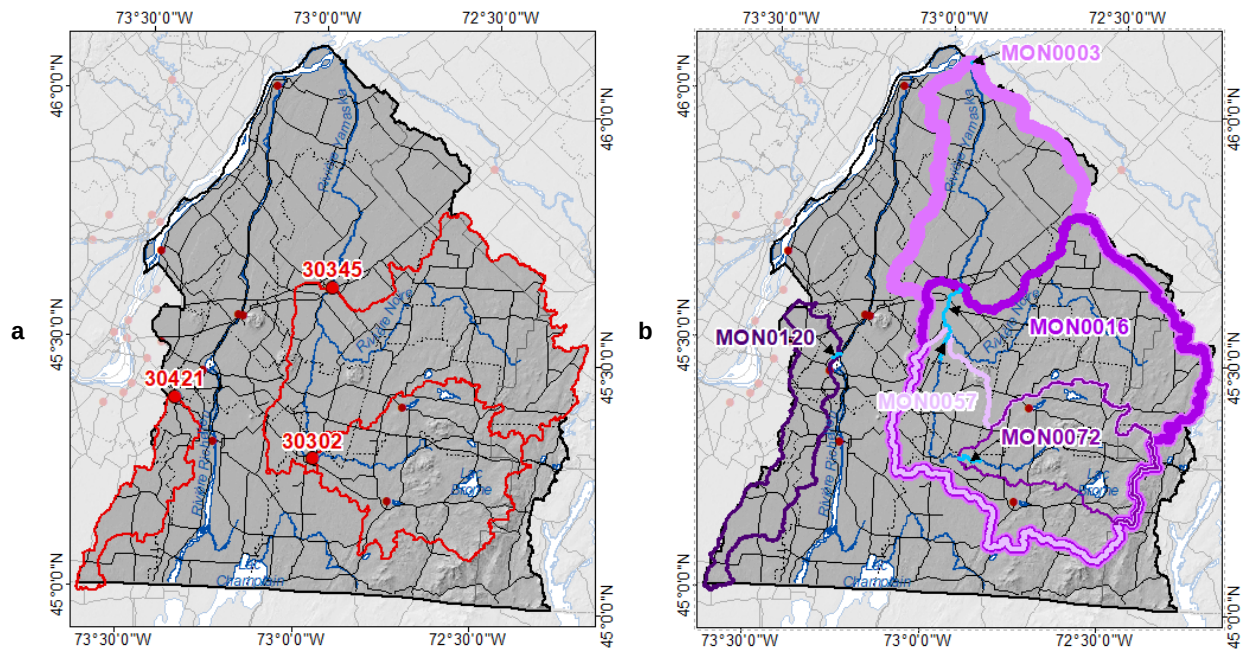


Figure 5.1 : Position des sources de données de débit sélectionnées et des bassins drainés : (a) stations de jaugeage (cercle rouge) et bassins drainés (polygone rouge) et (b) tronçons de l'Atlas hydroclimatique 2018 (ligne bleue) et bassins drainés (polygone violet)

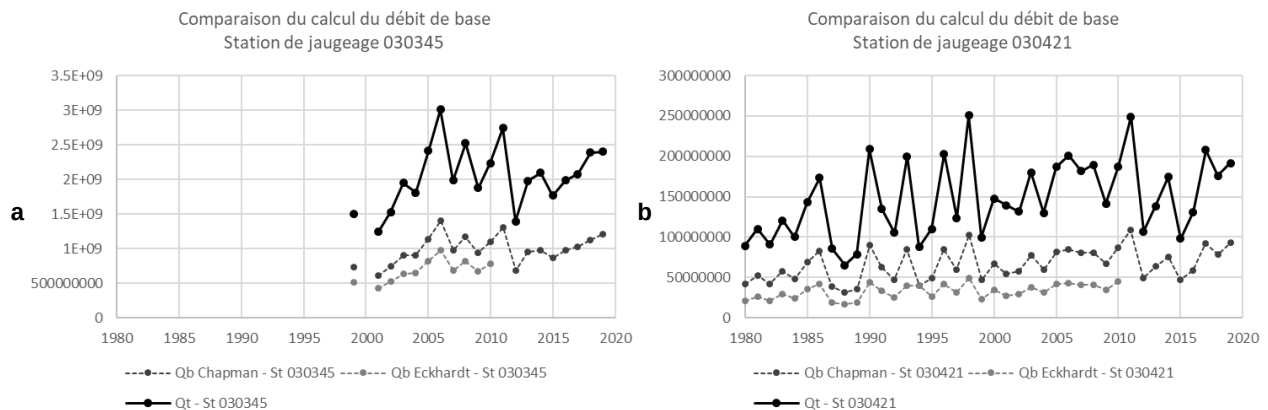


Figure 5.2 : Comparaison du calcul du débit de base avec les filtres de Chapman et d'Eckhardt pour deux stations de jaugeage : (a) station 030345 et (b) station 030421

Les données de débit total sont traitées dans un fichier Excel (**Traitement_Qtotal.xlsx**) décrit à l'annexe 2. Le traitement consiste à transformer les données de débit total quotidien en débit total annuel et en débit de base annuel. Le débit de base a été calculé à l'aide du filtre de Chapman (1999). Pour les stations de jaugeage 030345 et 030421, le débit de base obtenu à l'aide du filtre Chapman a été comparé au débit de base obtenu avec le filtre d'Eckhardt (2008). C'est ce filtre qui a été utilisé par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) pour le calcul des débits de base sur les tronçons modélisés (Poirier, 2012). Les graphiques de la figure 5.2 comparent les débits de base obtenus pour ces deux stations de jaugeage. Le débit de base obtenu à l'aide du filtre de Chapman représente en moyenne de 45 à 48% du débit total, tandis qu'il varie en moyenne de 24 à 34% du débit total avec le filtre d'Eckhardt. L'indicateur de stress hydrique de base réalisé à partir du débit de base calculé selon Eckhardt n'a pas été calculé, ni représenté. Cette comparaison démontre que l'utilisation du débit de base induit une incertitude, quel que soit le choix du filtre, et l'utilisation du débit total est plus simple puisque basé directement sur la donnée brute.

Les résultats sont d'abord présentés par bassin versant : usage total de l'eau (figure 5.3), débits total (figure 5.4), débit de base (figure 5.5), stress hydrique de base par rapport au débit total (figure 5.6) et stress hydrique de base par rapport au débit de base (figure 5.7). Sur les cartes, les résultats sont montrés pour les stations de jaugeage en haut des figures et pour les tronçons de l'Atlas hydroclimatique en bas des figures. La taille des bassins considérés étant très grande, les mêmes résultats ont aussi été représentés sur des portions de bassin pour vérifier si des superficies plus réduites montreraient d'autres tendances (figure 5.8).

La taille des bassins étant très variable (tableau 5.1 et figure 5.1), il est difficile de présenter des gammes d'utilisation de l'eau qui peuvent être comparable d'un bassin à l'autre pour toutes les cartes. En général, l'usage de l'eau est proportionnel à la superficie du bassin versant, soit plus le bassin est grand, plus l'usage de l'eau est important. Toutefois, l'utilisation totale de l'eau pour le bassin du tronçon MON0120 (42,9 Mm³/an) est du même ordre que pour le bassin du tronçon MON0016 (44,6 Mm³/an) qui a une superficie six fois plus grande (tableau 5.1). Ceci indique un usage de l'eau très important dans la portion nord du bassin du tronçon MON0120 par rapport au bassin de la station 030421. On dénote la présence de prélèvements municipaux et de quelques grands préleveurs dans ce secteur.

Les figures 5.4 et 5.5 présentent respectivement le débit total et le débit de base pour chaque bassin versant considéré. Ces figures montrent que le débit est fonction de la taille du bassin versant, soit plus la superficie du bassin est grande, plus le débit total et le débit de base sont importants. Choisir une gamme de valeurs adaptée pour représenter les données de façon est primordiale. Ainsi, le débit de base calculé du bassin MON0120 (132 Mm³/an) est inférieur à celui du bassin du tronçon MON0072 (294 Mm³/an) bien que ceux-ci soient représentés sur la figure 5.5 comme étant dans la même gamme de valeur. Bien que les tronçons MON0057 et MON0072 soient des bassins enregistrés comme ayant une influence potentielle de barrage (tableau 5.1), il est possible d'y représenter les données de débit annuellement en considérant que la présence de barrages est négligeable sur les transferts d'eau sur une base annuelle.

5.2 Analyse de l'indicateur de stress hydrique de base

Pour le présent exercice, le stress hydrique de base a été calculé à partir des données de débit total mesuré à des stations de jaugeage ainsi qu'à partir de données de débit total historiques simulées pour les tronçons de l'Atlas hydroclimatique 2018. La comparaison de ces deux sources de données est d'intérêt parce que si les résultats s'avèrent être similaires, il serait plus pratique de produire l'indicateur à partir de données de l'Atlas hydroclimatique qui sont disponibles pour plus de tronçons que pour les stations de jaugeage. Par contre, les données de l'Atlas hydroclimatique ne sont fiables qu'à partir d'une superficie de 250 km², ce qui fait qu'il implique une faible résolution spatiale. Les données de stations de jaugeage n'offrent pas non plus d'informations à une meilleure résolution spatiale. Les débits totaux ont aussi été utilisés pour estimer des débits de base à l'aide du filtre de Chapman (1999). Le stress hydrique de base a donc été produit en deux versions afin de déterminer si l'utilisation du débit de base ou du débit total aurait plus d'intérêt. Dans un premier temps le calcul de l'indicateur a été réalisé pour chaque bassin versant jaugeé ou modélisé. Le calcul a aussi été réalisé par portion de bassin versant pour les fins de comparaison. Nous n'avons toutefois pas tenté de préciser un seuil à partir duquel le stress hydrique de base serait considéré problématique.

5.2.1 Calcul par bassin versant

La figure 5.6 présente le stress hydrique de base pour l'année 2010 calculé par rapport au débit total des cours d'eau. La comparaison entre le calcul réalisé pour la station 030345 (figure 5.6.a) et le tronçon MON0016 (figure 5.6.e) donne le même résultat. Il est difficile de comparer les résultats des autres bassins jaugeés par rapport aux tronçons de l'Atlas hydroclimatique étant donné que la superficie drainée est assez différente (tableau 5.1). En somme, le portrait global est tout de même comparable. L'indicateur de stress hydrique de base calculé avec le débit total est inférieur à 5 % pour la plupart des bassins, sauf pour le bassin du tronçon MON0120 qui a une valeur de 14,5 % (figure 5.6.h).

Cette réponse est cohérente avec la valeur élevée d'utilisation de l'eau pour ce bassin. Il reste à vérifier si les prélèvements importants se trouvent à l'intérieur du bassin versant ou si c'est un biais lié à l'utilisation d'une grille où l'usage de l'eau est distribué uniformément au sein d'une même municipalité. Ce type de question montre à nouveau l'intérêt de préciser la distribution spatiale des types d'usage de l'eau à l'intérieur des municipalités (section 3.4 ; voir aussi les travaux documentés à la section 9).

La figure 5.7 présente le stress hydrique de base pour l'année 2010 calculé par rapport au débit de base des cours d'eau. La comparaison des figures 5.6 et 5.7 montre que l'utilisation du débit de base par rapport au débit total double la valeur de l'indicateur de stress hydrique de base. Ceci s'explique par le fait que les débits de base calculés avec le filtre de Chapman ont généralement un *Base Flow Index* (BFI ; rapport du débit de base annuel sur le débit total annuel du cours d'eau) près de 0.5. Seulement deux bassins ont un stress hydrique de base supérieur à 5 %, soit la station 030421 (10,6 %) et le tronçon MON0120 (32,3 %).

5.2.2 Calcul par portion de bassin versant

Étant donné que les bassins versants s'imbriquent l'un dans l'autre, plusieurs cartes sont nécessaires pour présenter les résultats pour chaque bassin. Ainsi, l'indicateur de stress hydrique de base a été calculé par portion de bassin. Pour ce faire, le débit (total ou de base selon les cas) du bassin amont (ex. station 030302) a été soustrait au débit du bassin aval (ex. station 030345) pour obtenir le débit associé à la portion du bassin versant (annexe 2). Cette manipulation permet de représenter l'indicateur de stress hydrique de base sur une même figure pour plusieurs bassins. La figure 5.8 présente les paramètres de calcul (usage total, débit total et débit de base) et le stress hydrique de base, par rapport au débit total ou au débit de base, pour les portions de bassins versants. Deux schémas sont présentés : les portions de bassins calculées d'après les bassins des stations hydrométriques (figures 5.8.a à 5.8.e) et les portions de bassin calculées d'après les bassins des tronçons de l'Atlas hydroclimatique (figures 5.8.f à 5.8.j). Cette option de calcul de l'indicateur de stress hydrique n'est pas très concluante puisqu'il n'y a pas de sens logique à la valeur de l'indicateur par portion de bassin versant. En effet, l'eau disponible dans le cours d'eau pour la portion amont du bassin demeure aussi disponible pour l'aval, alors que l'usage de l'eau de la portion amont peut logiquement être soustrait de l'usage de l'eau dans la portion aval. Cet exercice montre que l'indicateur de stress hydrique, tel que défini, n'est pas « aditif » entre les portions amont et aval d'un bassin.

5.3 Apports et limitations de l'indicateur de stress hydrique de base

Conceptuellement, l'indicateur de stress hydrique de base peut sembler a priori intéressant afin de caractériser globalement les pressions exercées par l'usage de l'eau à l'échelle d'un bassin. Toutefois, des difficultés considérables sont liées à la fois aux données sur les débits et à celles sur l'exploitation d'eau. De plus, les seuils des intervalles pour la présentation de l'indicateur ont été fixés à 5, 10 et 20 % de façon arbitraire. Il serait donc nécessaire de définir des seuils qui apportent une réelle information sur le niveau de stress hydrique qui peut avoir un impact sur un cours d'eau.

Au niveau des données sur les débits, l'échelle spatiale de l'indicateur de stress hydrique de base est limitée par la disponibilité des données de débit total des cours d'eau. L'Atlas hydroclimatique permet le calcul de cet indicateur sur un plus grand nombre de bassins que ceux qui sont jaugés. De plus, l'utilisation de l'Atlas hydroclimatique facilite la production de cet indicateur puisqu'il n'y a pas de lacunes dans les données. La comparaison de l'utilisation des débits simulés de l'Atlas hydroclimatique pour le tronçon MON0016 par rapport aux débits mesurés à la station de jaugeage 030345 donne des résultats très comparables. Toutefois, la résolution spatiale qui peut être atteinte est très faible. Tel que montré à la section 6 sur l'indicateur de stress sur l'eau souterraine, les forts stress sont clairement visibles à l'échelle municipale (figure 6.1), mais ils ne sont plus aussi apparents lorsqu'on passe à l'échelle des MRC (figure 6.2) ou des bassins versants (figures 6.3 et 6.4). Ainsi, l'indicateur de stress hydrique de base, produit à partir des données disponibles, ne semble pas avoir la résolution spatiale requise pour faire ressortir les secteurs problématiques.

Au niveau des données sur l'usage de l'eau, le calcul qui se fait à partir de la grille peut entraîner une erreur car la valeur de l'usage est répartie de façon uniforme sur les municipalités. Toutefois, une amélioration, discutée dans la section 3.4, pourrait apporter des précisions sur la distribution des usages au sein des municipalités. Actuellement, si le bassin étudié traverse une municipalité qui a une grande utilisation de l'eau, l'usage de l'eau pour le bassin en sera affecté même si les prélèvements ne se trouvent pas directement dans le bassin. Tel que recommandé pour l'indicateur de stress sur l'eau souterraine, le portrait de l'usage de l'eau a été raffiné pour augmenter la validité de cet indicateur (voir section 9).

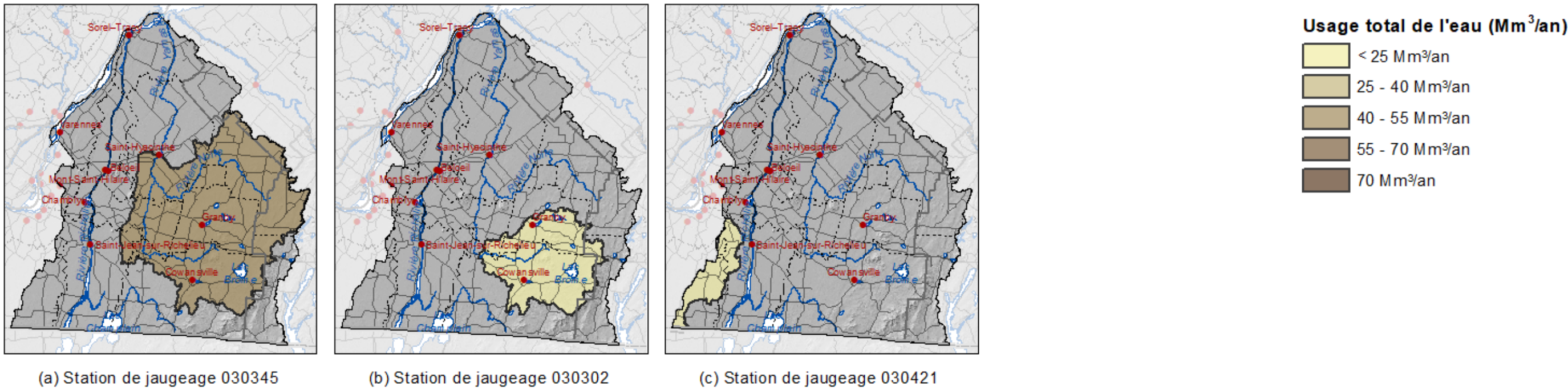
Les travaux montrent aussi que l'utilisation des prélèvements (ou usage) n'est peut-être pas appropriée en relation avec les eaux de surface. En utilisant comme valeur d'usage de l'eau la somme des prélèvements d'eau de surface et souterraine, la portion de l'eau non consommée qui retourne dans les cours d'eau ou dans l'aquifère et qui peut être réutilisée n'est pas considérée. Les prélèvements (ou usages) n'impliquant pas une consommation de toute l'eau prélevée, et il y a donc en fait plus d'eau disponible que ce qu'indiquent les usages. Ainsi, si l'eau non consommée était prise en compte dans le calcul de l'indicateur, le stress hydrique de base serait moindre. Il y aurait tout de même une complication avec l'usage de la consommation parce que le débit provenant d'un sous-bassin en amont reflète déjà l'effet de la consommation d'eau qui a été faite en amont. Il faudrait donc une source de données de débits qui représente les conditions naturelles, sans consommation anthropique d'eau. Tant les stations de jaugeage que les débits simulés calés sur ces mesures ne reflètent pas les conditions naturelles sans l'effet des prélèvements.

Comme pour l'indicateur de stress sur l'eau souterraine, la mise à jour de l'indicateur de stress hydrique de base nécessite le maintien des données d'utilisation de l'eau. De plus, seuls quelques bassins jaugeés peuvent être utilisés pour calculer l'indicateur puisqu'il est nécessaire de connaître l'usage de l'eau sur l'ensemble du bassin jaugeé. Pour remédier à cette limitation, les données de débit historique simulées par l'Atlas hydroclimatique offrent une alternative intéressante.

L'utilisation du débit total semble avantageuse par rapport au débit de base puisque que le débit total représente directement la donnée brute et ne dépend pas du choix de la méthode de calcul comme pour le débit de base. Toutefois, l'impact des prélèvements étant surtout important en période d'étiage, il faut pouvoir comparer la magnitude des prélèvements par rapport aux étiages. Il semble donc que la comparaison directe du débit d'un prélèvement spécifique au débit d'étiage au point de prélèvement représente une indication plus pertinente de l'impact potentiel d'un prélèvement. De telles vérifications ponctuelles ne peuvent cependant pas constituer un indicateur à l'échelle régionale.

La production de l'indicateur de stress hydrique de base sur les portions de bassins semble intéressante à première vue. En effet, elle permet de comparer les portions de bassins entre elles et de calculer le stress hydrique de base pour des portions de bassins. Toutefois, cette approche est plus sévère puisque qu'elle ne considère pas le débit de la portion amont du bassin comme étant disponible. Donc, dans le cas de prélèvements d'eau de surface en aval, l'indicateur calculé par portions de bassins pourrait indiquer un rapport « Usage / Débit » important alors qu'en réalité le débit total disponible au cours d'eau peut être suffisant. Pour que cet indicateur soit plus réaliste et afin d'éviter l'erreur liée à l'utilisation de l'eau en surface, il pourrait être préférable d'employer le rapport de l'usage de l'eau souterraine sur le débit de base du bassin partiel. Autrement, cette façon de calculer l'indicateur hydrique n'a pas de sens physique et n'est donc pas souhaitable.

Usage total en 2010 pour les bassins des stations de jaugeage



Usage total en 2010 pour les bassins des tronçons extraits de l'Atlas hydroclimatique 2018

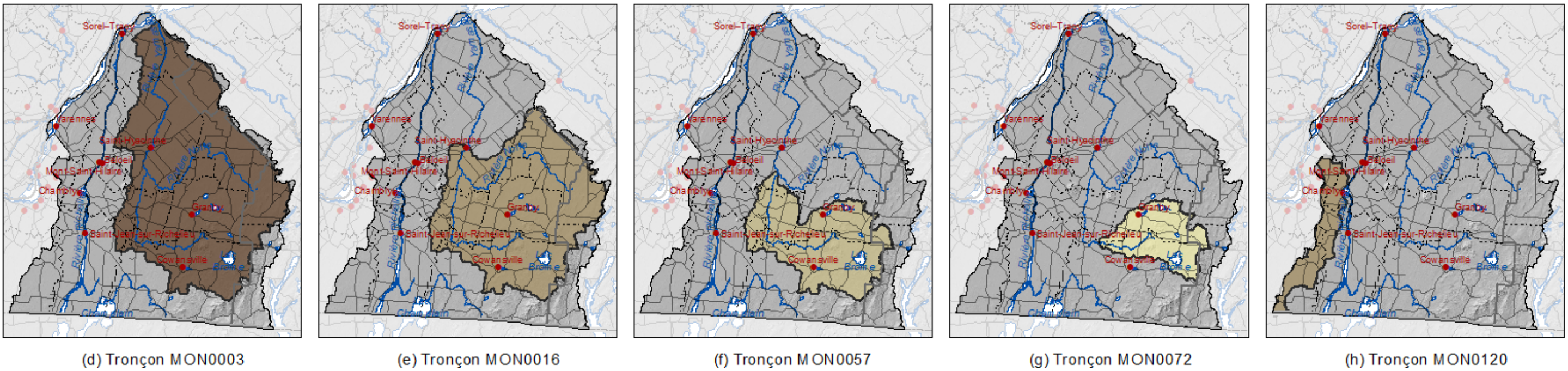
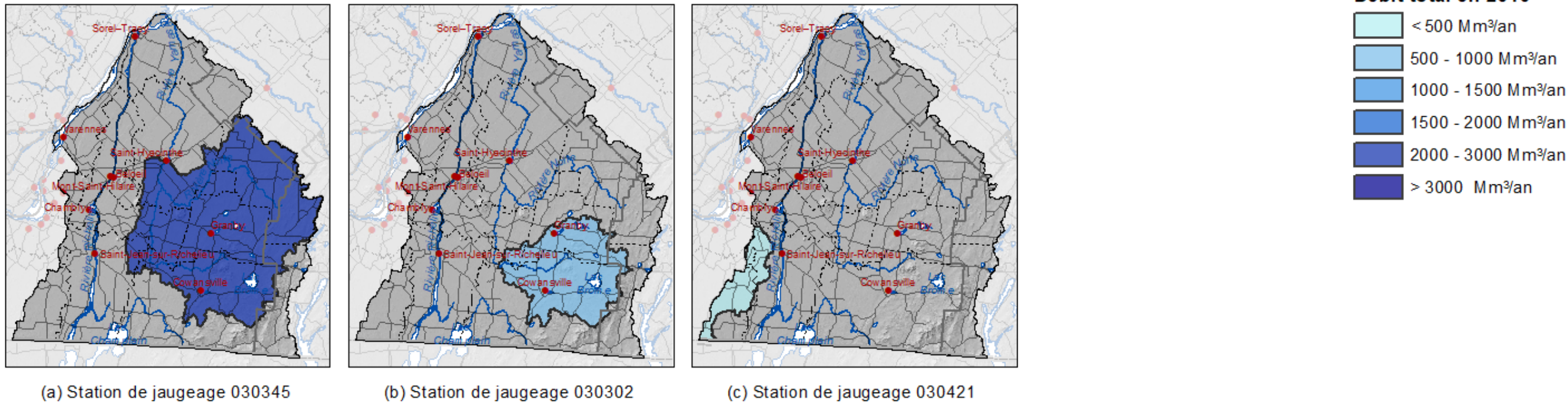


Figure 5.3 : Usage totale de l’eau pour chaque bassin versant

Débit total en 2010 pour les bassins des stations de jaugeage



Débit total en 2010 pour les bassins des tronçons extraits de l'Atlas hydroclimatique 2018

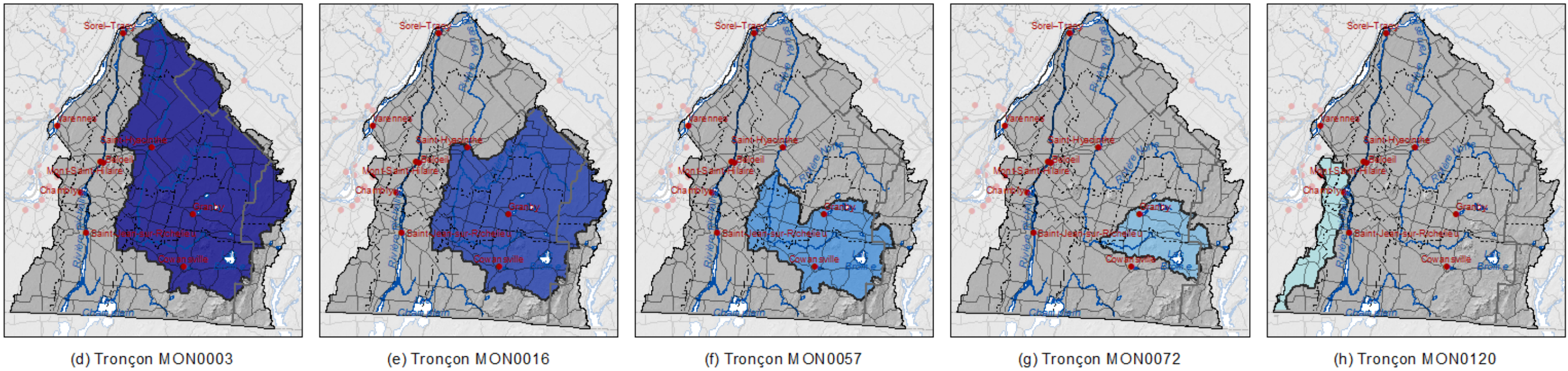
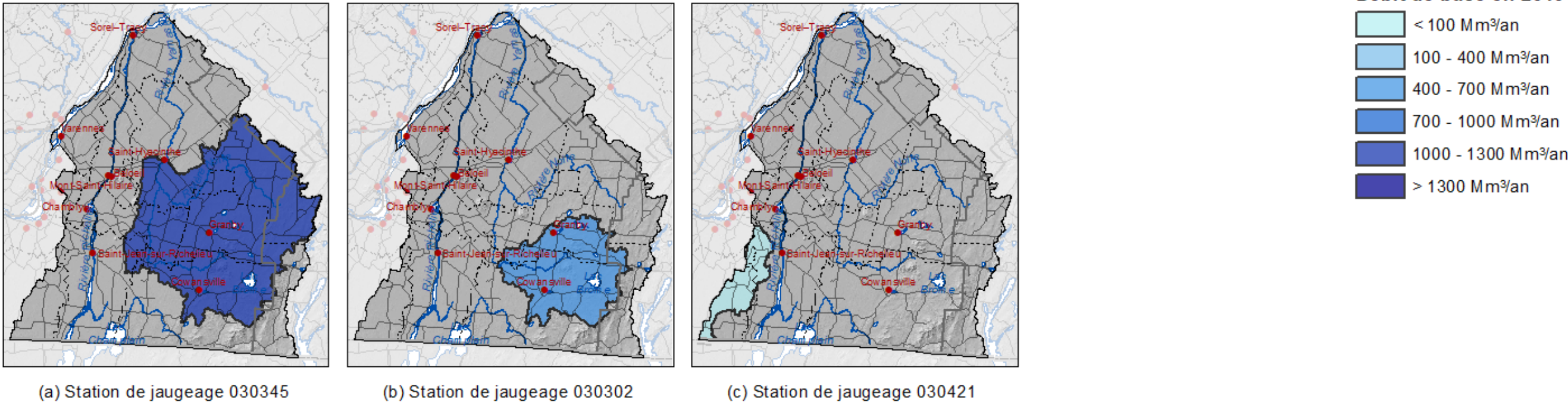


Figure 5.4 : Débit total pour chaque bassin versant

Débit de base en 2010 pour les bassins des stations de jaugeage



Débit de base en 2010 pour les bassins des tronçons extraits de l'Atlas hydroclimatique 2018

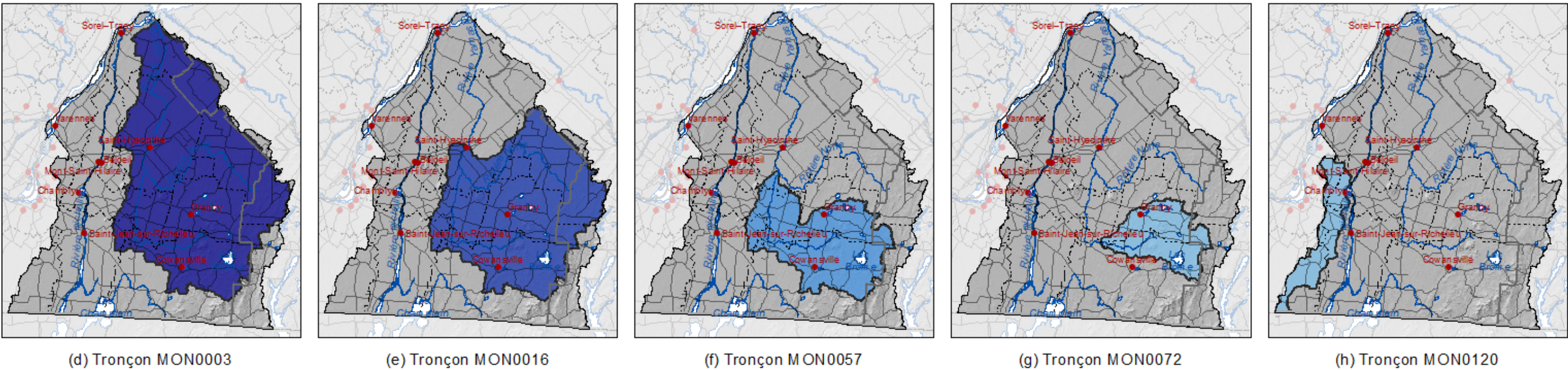
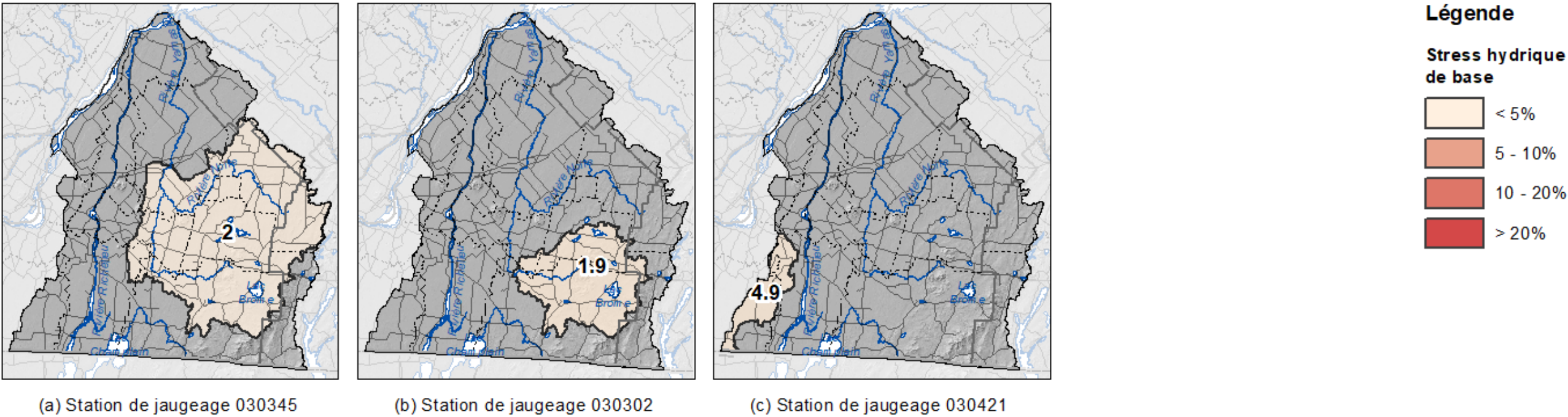


Figure 5.5 : Débit de base calculé à l'aide du filtre de Chapman pour chaque bassin versant

Stress hydrique de base en 2010 calculé d'après les données de débits des stations de jaugeage



Stress hydrique de base en 2010 calculé d'après les données de débits extraits de l'Atlas hydroclimatique 2018

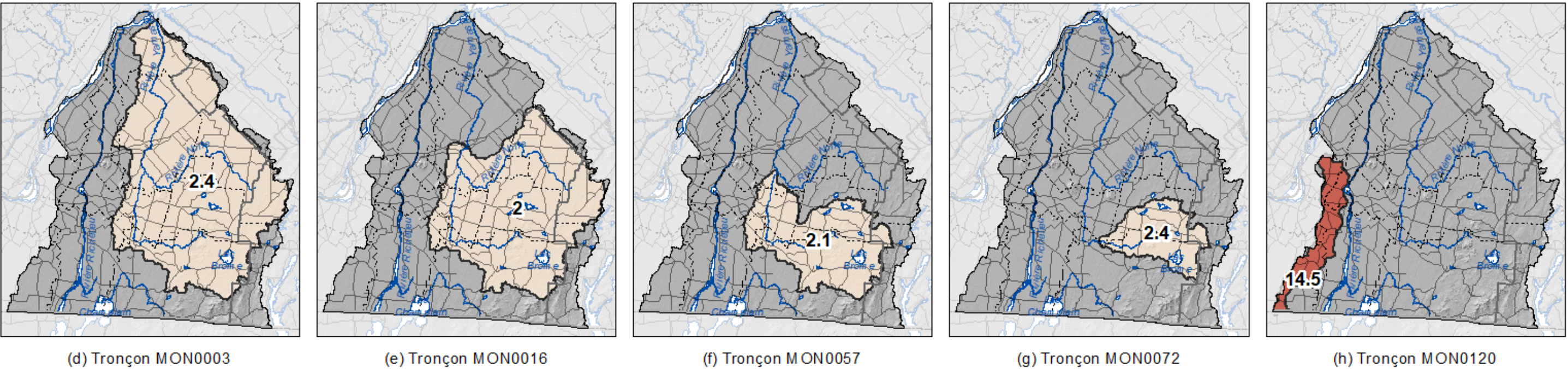
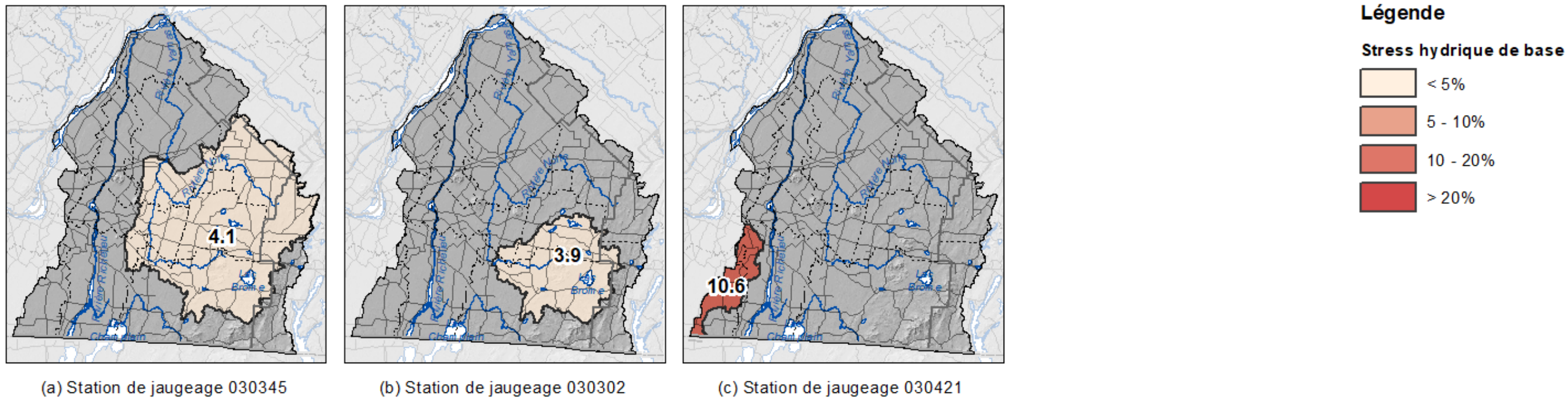


Figure 5.6 : Stress hydrique de base en 2010 calculé par rapport au débit total des cours d'eau

Stress hydrique de base en 2010 calculé d'après les données de débits des stations de jaugeage



Stress hydrique de base en 2010 calculé d'après les données de débits extraits de l'Atlas hydroclimatique 2018

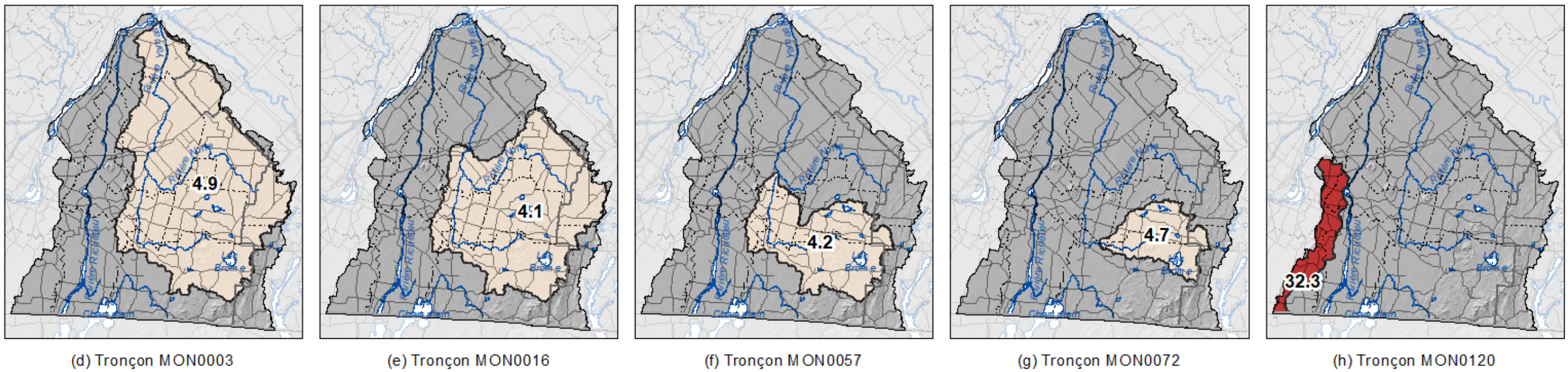
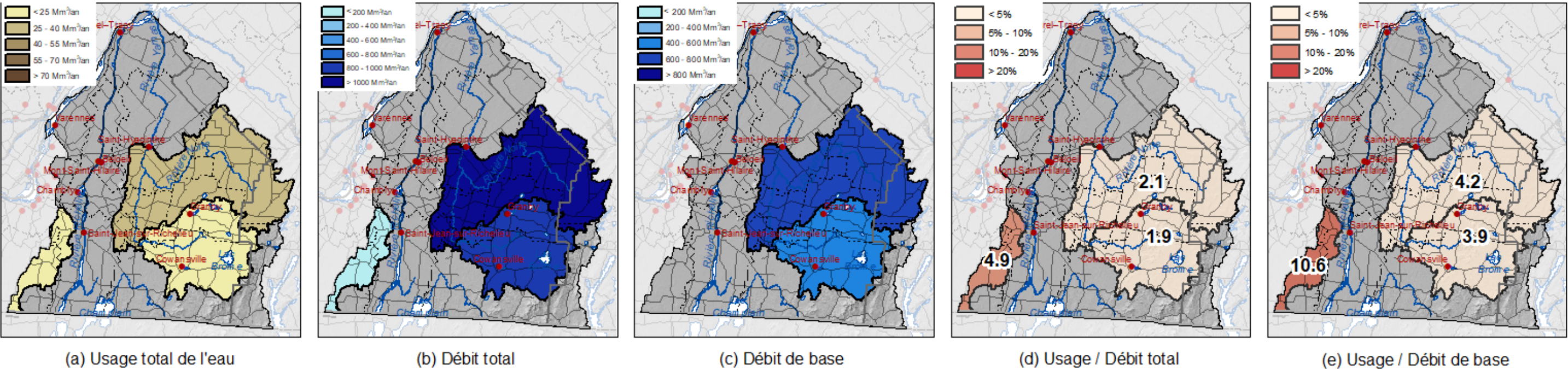


Figure 5.7 : Stress hydrique de base en 2010 calculé par rapport au débit de base des cours d'eau

Calcul du stress hydrique de base d'après les données de débits des stations de jaugeage



Calcul du stress hydrique de base d'après les données de débits extraits de l'Atlas hydroclimatique 2018

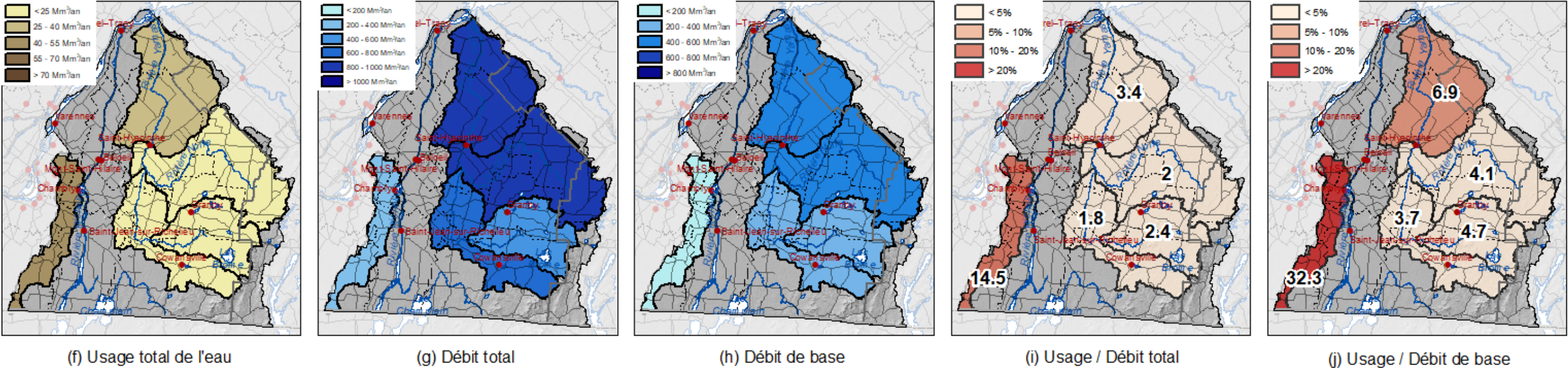


Figure 5.8 : Stress hydrique de base en 2010 calculé pour les bassins partiels

6 STRESS SUR L'EAU SOUTERRAINE (USAGE/RECHARGE)

L'indicateur de stress sur l'eau souterraine (*Groundwater Stress*) représente le rapport entre les prélèvements totaux d'eau souterraine et la recharge. Pour l'exemple produit, la valeur de recharge utilisée est celle pour l'aquifère rocheux régional qui avait été estimée à l'aide du modèle d'infiltration HELP (Carrier et al., 2013a). L'annexe 3 donne les détails des étapes de production de l'indicateur avec ArcGIS.

6.1 Produits préliminaires pour l'indicateur de stress sur l'eau souterraine

Afin d'offrir un aperçu des diverses échelles de visualisation possibles de ce livrable, cet indicateur a été produit à quatre échelles différentes, soient : (1) les municipalités (figure 6.1), (2) les MRC (figure 6.2), (3) les bassins versants de niveau 1 (figure 6.3) et, (4) les bassins versants de niveau 2 (figure 6.4). Pour chacune de ces figures, les trois cartes nécessaires à l'analyse de l'indicateur sont affichées : (a) l'utilisation totale de l'eau souterraine, (b) la recharge de l'aquifère rocheux et (c) le rapport « usage/recharge ».

Dans le cadre du présent rapport, à titre d'exemple sont présentées les données relatives à la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu (figure 6.1.c) et à la MRC associée, soit celle du Haut-Richelieu (figure 6.2.c), ainsi que les bassins versants des rivières Richelieu (figure 6.3.c) et de la Barbotte (figure 6.4.c).

En amont de la production de ces cartes, des tableurs complets incluant l'ensemble des données d'usage de la ressource en eau souterraine et de recharge de l'aquifère au roc ont été établis. Les quatre tableurs produits, un par échelle de couverture souhaitée (municipalités, MRC, bassins versants de niveau 1 et 2), assurent une visualisation globale des données par l'analyste. Ceux-ci offrent également des informations complémentaires à celles affichées sur les cartes, notamment la superficie de la municipalité incluse dans le projet, un paramètre important qui assure une certaine représentativité des données de cette municipalité. La ville de Boucherville a, par exemple, seulement 17 % de son territoire compris dans les limites du PACES Montérégie Est ; les données d'usage et de recharge de cette municipalité sont donc à traiter avec un certain recul. Ainsi, dans les paragraphes suivants ne seront considérés que les territoires couverts à plus de 90 % par le PACES de Montérégie Est, sauf précision contraire.

6.2 Analyse de l'indicateur de stress sur la ressource en eau souterraine

L'utilisation totale de l'eau souterraine (non différenciée par secteur d'activité) est présentée sur la figure 6.1.a pour les municipalités de Montérégie Est selon cinq gammes de prélèvements en m³/an. Premier constat, les quantités d'eau souterraine prélevées dans l'aquifère rocheux dans le nord-ouest de la Montérégie Est sont généralement moindres (< 50 000 m³/an) que sur le reste du territoire. Ceci est dû à la présence d'un secteur d'eau saumâtre d'origine marine de près de 2 200 km² (livrable PACES no. 24A – Carrier et al., 2013b) rendant donc impropre à la consommation l'eau souterraine dans le nord de la Plate-forme du Saint-Laurent (Beaudry et al., 2018). Les municipalités localisées sur ce secteur particulier s'alimentent par l'intermédiaire de prélèvements dans les eaux de surface (Carrier et al., 2013a) puisque les dépassements des critères de qualité des eaux souterraines y sont fréquents. Dans cette région, l'eau souterraine est essentiellement utilisée à des fins agricoles (Carrier et al., 2013a). Pour les municipalités localisées le long de la rivière Richelieu, soit dans la partie sud de la Plate-forme du Saint-Laurent, l'utilisation de l'eau de surface est également importante par rapport à l'eau de l'eau souterraine. C'est notamment le cas pour la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu où l'eau souterraine représente seulement 9 % (1.4 Mm³/an) du total des usages en eau. Toutefois, pour cette municipalité ainsi que celles de Granby, Saint-Césaire, Lac-Brome, Waterloo, Napierville, Rougemont, Shefford, Pike River, Roxton Pond, Saint-Alphonse-de-Granby, Saint-Paul-d'Abbotsford et Saint-Valérien-de-Milton, les prélèvements d'eau souterraine sont importants (> 500 000 m³/an). Bien que moyenne en Montérégie Est, la qualité de l'eau souterraine est passable à acceptable entre le Piedmont et les Hautes-terres des Appalaches ce qui explique en partie l'utilisation plus importante de cette ressource dans le sud-est de la Montérégie Est.

Indicateur de stress sur l'eau souterraine par municipalité
Application en Montérégie Est
Municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu

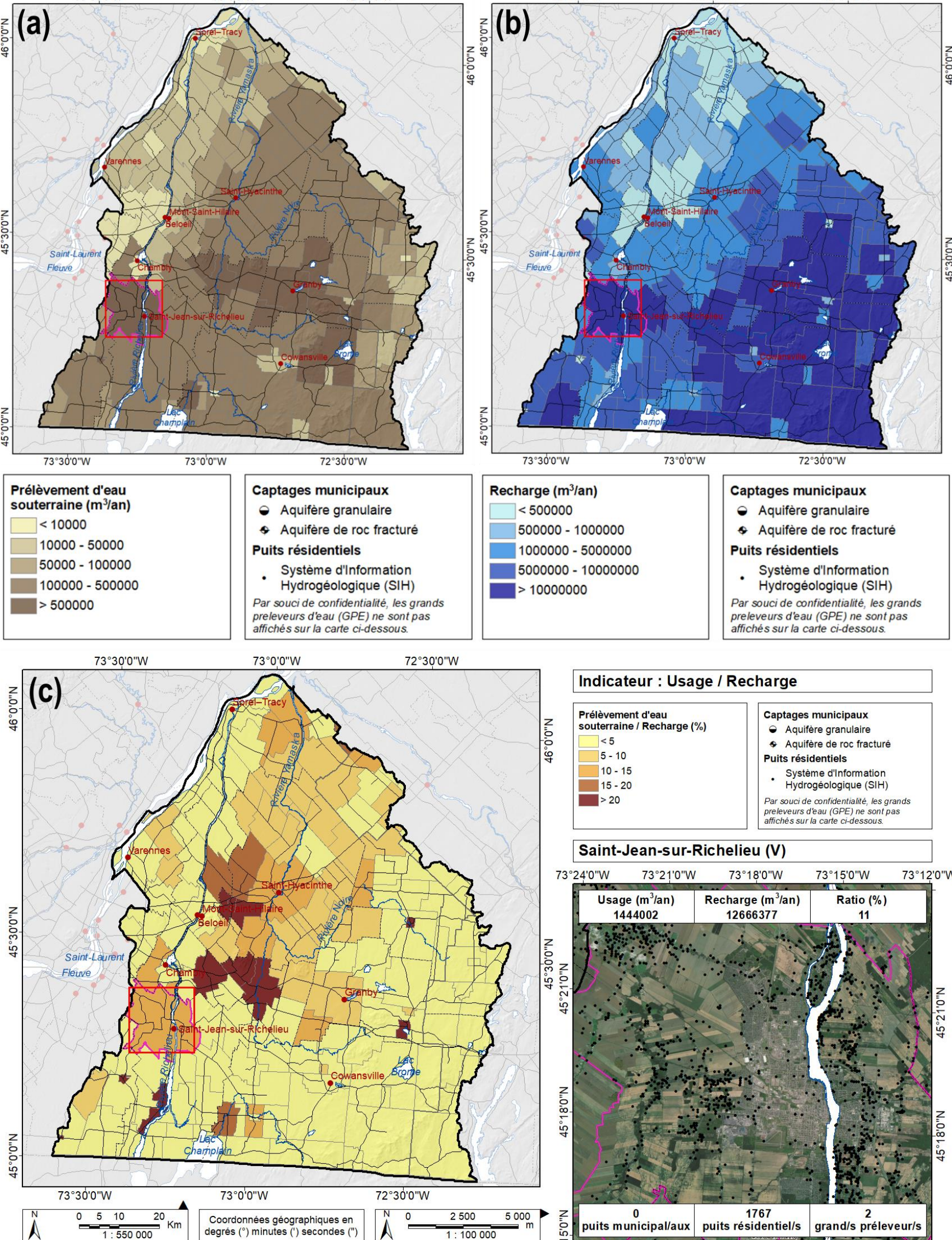


Figure 6.1 : Indicateur de stress sur l'eau souterraine par municipalité : (a) Exploitation de l'eau souterraine (m^3/an) ; (b) Recharge de l'aquifère rocheux régional (m^3/an) ; (c) Indicateur de la proportion de recharge utilisée (%) – Cas particulier de la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu

Indicateur de stress sur l'eau souterraine par MRC
Application en Montérégie Est
MRC du Haut-Richelieu

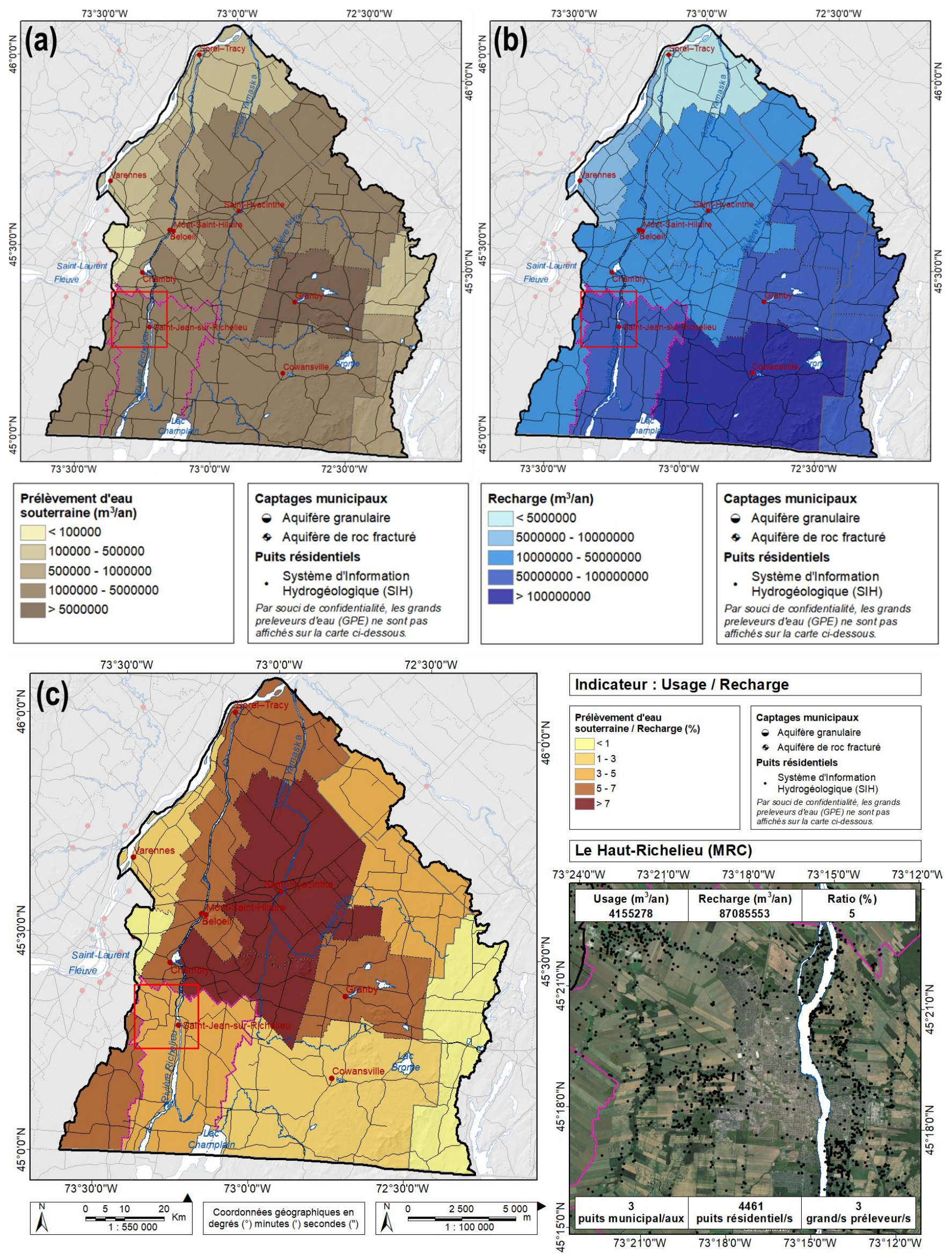


Figure 6.2 : Indicateur de stress sur l’eau souterraine par MRC : (a) Exploitation de l’eau souterraine (m³/an) ; (b) Recharge de l’aquifère rocheux régional (m³/an) ; (c) Indicateur de la proportion de recharge utilisée (%) – Cas particulier de la MRC du Haut-Richelieu

ss sur l'eau souterraine par bassin versant de niveau 1

Application en Montérégie Est

Bassin versant de la rivière Richelieu

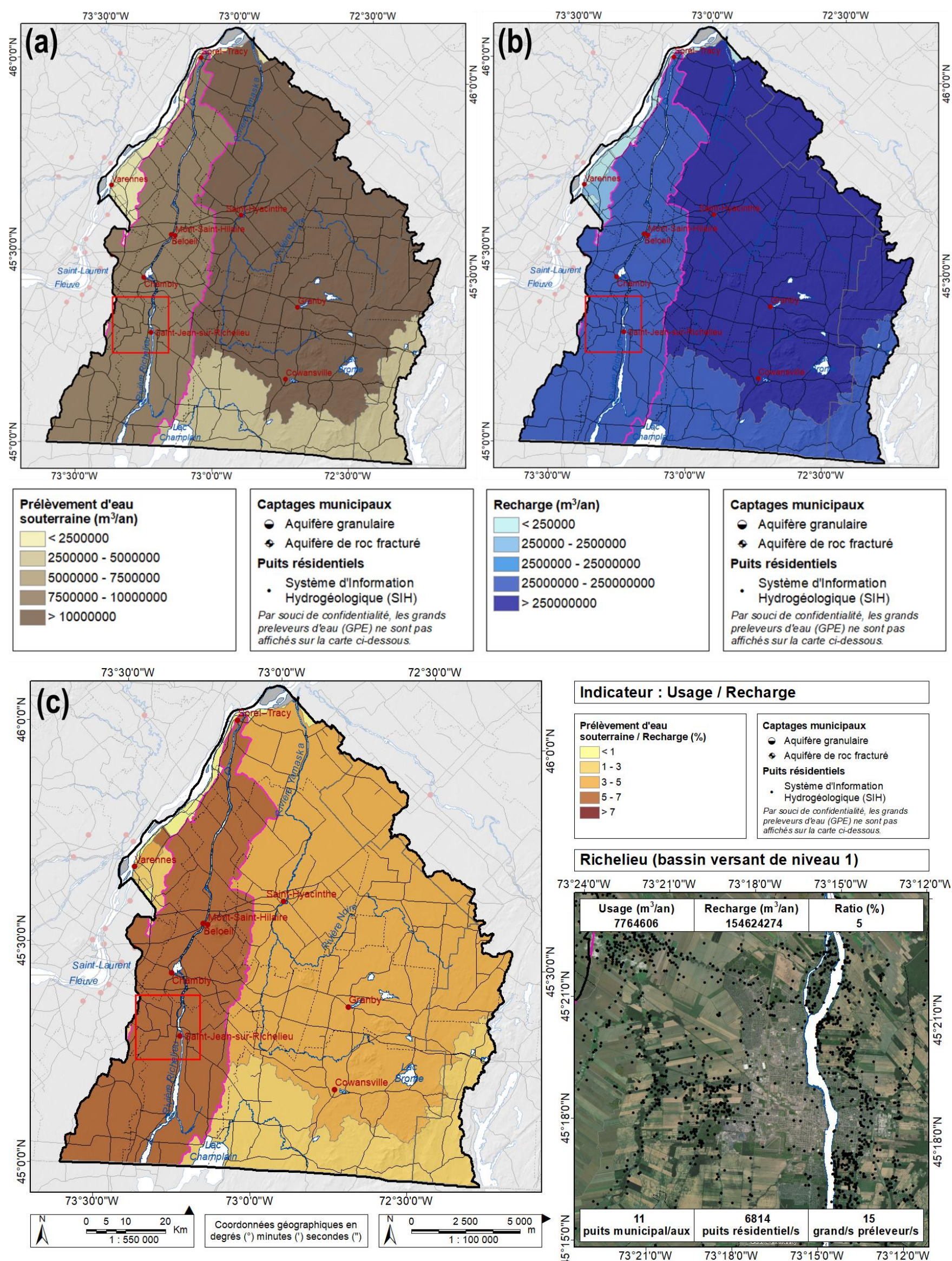


Figure 6.3 : Indicateur de stress sur l'eau souterraine par bassin versant de niveau 1 : (a) Exploitation de l'eau souterraine (m^3/an) ; (b) Recharge de l'aquifère rocheux régional (m^3/an) ; (c) Indicateur de la proportion de recharge utilisée (%) – Cas particulier du bassin versant de la rivière Richelieu (niveau 1)

Indicateur de stress sur l'eau souterraine par bassin versant de niveau 2
Application en Montérégie Est
Bassin versant de la rivière de la Barbotte

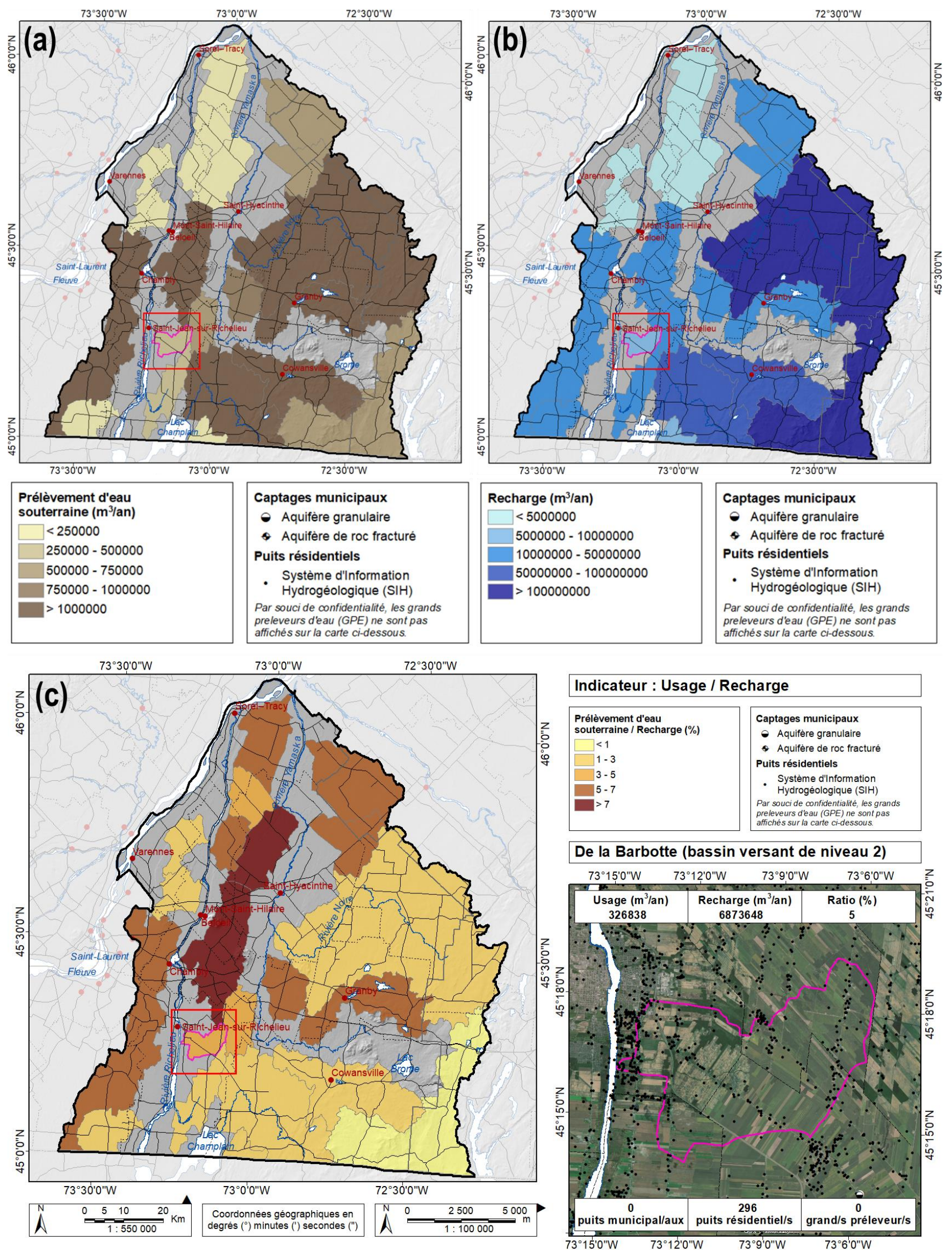


Figure 6.4 : Indicateur de stress sur l'eau souterraine par bassin versant de niveau 2 : (a) Exploitation de l'eau souterraine (m^3/an) ; (b) Recharge de l'aquifère rocheux régional (m^3/an) ; (c) Indicateur de la proportion de recharge utilisée (%) – Cas particulier du bassin versant de la rivière de la Barbotte (niveau 2)

Le même constat peut être fait à l'échelle des MRC (figure 6.2.a) où les MRC du nord-ouest du territoire couvert par le PACES Montérégie Est s'alimentent à plus de 96 % via les eaux de surface (Pierre-de-Saurel, Marguerite-d'Youville et La Vallée-du-Richelieu). Dans une moindre mesure, c'est aussi le cas des MRC des Maskoutains et du Haut-Richelieu où l'usage de l'eau de surface représente plus de 80 % de l'usage total de l'eau. Au contraire, les MRC de Rouville, d'Acton, de Brome-Missisquoi et de la Haute-Yamaska affichent les proportions d'usage d'eau souterraine les plus élevées (entre 29 et 52 % de l'usage total). Tandis que le volume d'eau souterraine prélevée est le plus important ($> 1 \text{ Mm}^3/\text{an}$) pour les MRC suivantes : Acton, Les Maskoutains, Rouville, Le Haut-Richelieu, Brome-Missisquoi et La Haute-Yamaska, où il atteint $5.2 \text{ Mm}^3/\text{an}$, mais également celles de Drummond et des Jardins-de-Napierville qui sont comprises seulement en partie sur le territoire du PACES Montérégie Est. Dans la MRC du Haut-Richelieu, les prélèvements d'eau souterraine ($4.2 \text{ Mm}^3/\text{an}$) participent majoritairement à l'usage résidentiel (69 %), puis agricole (24 %) et enfin industriel (7 %) (livrable PACES no. 26C – Carrier et al., 2013b).

Les figures 6.3.a et 6.4.a rendent compte de l'usage de l'eau souterraine en Montérégie Est pour chaque bassin versant. C'est le bassin de la Yamaska qui enregistre les plus grandes quantités d'eau souterraine prélevée ; ceci est principalement dû au contexte hydrogéologique plus favorable pour le prélèvement et la distribution des eaux souterraines (qualité de l'eau passable à acceptable) et la présence de centres de population plus importants. Le bassin de la Baie Missisquoi affiche un volume de prélèvement d'eau souterraine moindre, vraisemblablement relié à l'absence de municipalités importantes sur ce bassin versant. Toutefois, sur ce bassin, les prélèvements dans l'aquifère sont plutôt importants puisqu'ils représentent près de 51 % de l'usage total de l'eau. La situation intermédiaire du bassin de la Richelieu ($7.7 \text{ Mm}^3/\text{an}$) reflète la qualité médiocre des eaux souterraines, favorisant les prélèvements d'eau de surface, combinée à un fort usage agricole et la présence de centres de population importants entraînant la présence de quelques prélèvements d'eau souterraine (6 % de l'usage total de l'eau sur ce bassin versant). En regardant plus précisément ces bassins par l'intermédiaire des bassins versants de niveau 2 (figure 6.4.a), il est alors possible d'apporter plus d'informations sur cet indicateur. Les conclusions sont néanmoins similaires avec celles émises pour les bassins versants de niveau 1 (figure 6.3.a) à savoir que les bassins versants localisés au nord-ouest de la Montérégie Est sont ceux avec la consommation d'eau souterraine la plus faible (Coderre, Beloeil, Amyot, Laplante, Pot au Beurre) tandis que les bassins versants avec le plus usage d'eau souterraine ($> 1 \text{ Mm}^3/\text{an}$) correspondent à ceux de Yamaska Sud-Est, des Hurons, aux Brochets, Yamaska Nord, L'Acadie et Noire. Celui de la rivière aux Brochets présente d'ailleurs un important usage d'eau souterraine par rapport à l'usage total (54 %). Dans l'exemple choisi, le volume d'eau souterraine utilisé ($326\,838 \text{ m}^3/\text{an}$) dans le bassin de la Barbotte représente 21 % du volume total d'eau prélevé.

La figure 6.1.b représente la recharge de l'aquifère rocheux régional distribuée à l'échelle municipale en Montérégie Est. Habituellement traduite en mm/an , elle a ici été retranscrite en m^3/an afin de pouvoir être aisément comparée à l'usage de l'eau souterraine. La carte de la recharge moyenne estimée avec le modèle d'infiltration HELP (*Hydrologic Evaluation of Landfill Performance*) entre 1970 et 2010 est consultable dans l'atlas du PACES Montérégie Est (livrable PACES no. 28B – Carrier et al., 2013b). Globalement, la Montérégie Est présente un bon renouvellement de la ressource puisque la recharge moyenne de l'aquifère fracturé est de l'ordre de $100 \text{ mm}/\text{an}$ (Carrier et al., 2013a), représentant un volume total proche des $847 \text{ Mm}^3/\text{an}$. Néanmoins, elle présente une très grande disparité spatiale traduite notamment par une recharge très faible dans la partie nord de la Plate-forme du Saint-Laurent causée par une épaisse couverture de sédiments argileux peu perméables (Carrier et al., 2013a). Ceci est bien visible sur la figure 6.1.b où les municipalités du nord de la Montérégie Est présentent une quantité de recharge généralement inférieure à $1 \text{ Mm}^3/\text{an}$ et un taux de recharge proche de la moyenne mesurée sur ce secteur : $14 \text{ mm}/\text{an}$ soit environ 1 % des précipitations totales (Carrier et al., 2013b). En exceptant les deux territoires non organisés, un total de 23 municipalités présente un volume de recharge au roc inférieur à $0.5 \text{ Mm}^3/\text{an}$ dont 10 moitié moins : Yamaska, Saint-Mathieu-de-Beloeil, Saint-Charles-sur-Richelieu, Sainte-Anne-de-Sorel, Otterburn Park, Beloeil, Hemmingford, Sainte-Madeleine, McMasterville et Massueville. Les zones de recharge préférentielle sont surtout localisées là où les dépôts meubles sont peu épais et perméables, soit dans la zone interne des Appalaches et les collines Montérégiennes, où la recharge atteint respectivement 198 et

181 mm/an soit 10 et 16 % des précipitations totales (Carrier et al., 2013b). C'est notamment le cas pour 24 municipalités où le renouvellement de la ressource en eau souterraine est important ($> 10 \text{ Mm}^3/\text{an}$) dont huit affichant plus de $20 \text{ Mm}^3/\text{an}$ de recharge sur leur territoire, à savoir : Roxton, Bolton-Ouest, Granby, Shefford, Saint-Joachim-de-Shefford, Dunham, Lac-Brome et Sutton. La recharge est moindre mais tout de même non négligeable dans les municipalités situées dans la zone externe des Appalaches (122 mm/an) et le sud de la Plate-forme du Saint-Laurent (106 mm/an) (Carrier et al., 2013b), soit par exemple, Saint-Jean-sur-Richelieu où la recharge atteint quasiment les $13 \text{ Mm}^3/\text{an}$.

En regardant ces mêmes données à l'échelle des MRC (figure 6.2.b), le constat est similaire, bien que moins précis, avec une hausse globale de la recharge du nord-ouest vers le sud-est de la Montérégie Est traduisant les divers contextes hydrogéologiques identifiés dans l'atlas du PACES (Carte générale – Carrier et al., 2013b). Les MRC avec les recharges les plus faibles ($< 50 \text{ Mm}^3/\text{an}$) sont d'ailleurs essentiellement localisées dans le nord de la Plate-forme du Saint-Laurent : Pierre-de-Saurel, Marguerite-d'Youville, la Vallée-du-Richelieu, Rouville et les Maskoutains. À l'inverse, la MRC de Brome-Missisquoi affiche un taux de renouvellement très important de l'ordre de $275 \text{ Mm}^3/\text{an}$. Le reste des MRC, dont celle du Haut-Richelieu ($87 \text{ Mm}^3/\text{an}$), présente une recharge non négligeable.

Les cartes de recharge établies par type de bassin versant (figures 6.3.b et 6.4.b) permettent de visualiser de façon plus adéquate ce paramètre puisque les limites des bassins de surface retranscrivent bien souvent les limites des bassins souterrains. Toutefois, l'échelle des bassins versants de niveau 1 ne permet pas d'établir de différences entre les divers taux de recharge renouvelant l'aquifère au roc. En toute logique, la recharge totale est assez faible pour les bassins de petite taille de Jarret et de Notre-Dame ($< 250\,000 \text{ m}^3/\text{an}$), tandis qu'il est très largement supérieur pour les trois autres bassins majeurs : Richelieu, Baie Missisquoi et Yamaska ($> 150 \text{ Mm}^3/\text{an}$). En se fiant aux bassins versants de niveau 2, le contexte hydrogéologique semble mieux retranscrit avec toujours une recharge plus faible ($< 5 \text{ Mm}^3/\text{an}$) dans les quelques bassins versants situés dans la partie nord-ouest de la Plate-forme du Saint-Laurent : Beloeil, Pot au Beurre, Coderre, Salvail, Laplante et Amyot. À l'inverse, elle est plutôt importante ($> 50 \text{ Mm}^3/\text{an}$) dans les bassins versants se trouvant en contexte appalachien au sud-est de la Montérégie Est : Yamaska sud-est, aux Brochets, Missisquoi et Noire. D'autres bassins versants, notamment le long de la vallée de la rivière Richelieu, présentent des valeurs intermédiaires de recharge, dont celui de la Barbotte avec $7 \text{ Mm}^3/\text{an}$.

Finalement, la combinaison de ces premières cartes (usage et recharge) permet d'établir la carte finale de l'indicateur « usage/recharge » toujours à plusieurs échelles (figures 6.1.c, 6.2.c, 6.3.c et 6.4.c). Selon plusieurs auteurs, dont Raskin (1997), lorsque le ratio « usage/recharge » est inférieur à 10 %, il n'y a aucun stress avéré sur la ressource tandis qu'à partir de 20 %, le stress peut commencer à devenir limitant pour le développement économique local. Toujours selon Raskin (1997), au-delà de 40 %, le stress sur la ressource en eau souterraine est considéré comme élevé. Sur la figure 6.1.c, l'indicateur a été divisé en 5 classes : < 5 , 5-10, 10-15, 15-20 et > 20 %. Ces intervalles ont été adaptés ici puisque la majorité des municipalités (114 sur 124 soit 92 %) utilisent moins de 20 % de la recharge (figure 6.1.c). De plus, à l'échelle municipale, l'indicateur suggère que le niveau d'exploitation de la ressource en eau souterraine semble soutenable en Montérégie Est puisque généralement inférieur à 10 % (100 municipalités sur 124 soit 81 %). Les municipalités souffrant le plus de stress sur l'eau souterraine sont au nombre de 10 : Rougemont, Marieville, Sainte-Marie-Madeleine, Sainte-Madeleine, Saint-Paul-de-l'île-aux-Noix, Saint-Césaire, Roxton Falls, Waterloo, Hemmingford et Napierville. Pour plusieurs municipalités, en l'occurrence Roxton Falls, Waterloo, Hemmingford et Napierville, le fort ratio observé (> 40 %) s'explique notamment par un usage local important de l'eau souterraine combiné à une alimentation de la nappe (recharge) se faisant vraisemblablement sur un plus large territoire à l'extérieur des limites de ces municipalités. C'est le cas plus particulièrement pour Napierville où le ratio atteint 390 %, ce qui s'explique par la présence d'un piège hydraulique opéré par l'industrie contrôlant un site contaminé qui extrait une importante quantité d'eau souterraine (Carrier et al., 2013a). Cette petite municipalité comptabilise notamment 3 captages municipaux, 1 grand préleveur et 16 puits résidentiels. Quant aux municipalités de Sainte-Madeleine et de Sainte-Marie-Madeleine, elles sont toutes les deux situées sur la zone d'eau souterraine saumâtre et donc impropre à la consommation. Pour les petites municipalités, il est donc nécessaire d'utiliser l'indicateur

« usage/recharge » avec précaution. Pour les municipalités de taille plus importante (Rougemont, Marieville et Saint-Césaire), la recharge plutôt élevée ne permet pas de compenser la quantité d'eau souterraine prélevée sur leur territoire d'où des ratios supérieurs à 20 %. À l'inverse, pour les municipalités de Sainte-Marie-Madeleine et de Saint-Paul-de-l'île-aux-Noix, la recharge semble être le facteur limitant malgré un usage modéré. La situation géographique de cette dernière municipalité, proche de la rivière Richelieu (à l'aval donc du système d'écoulement), suggère toutefois que l'alimentation de la nappe pourrait possiblement être issue de zones situées en amont hydraulique à l'extérieur de son territoire. Pour l'exemple considéré de Saint-Jean-sur-Richelieu, l'usage en eau souterraine représente 11 % de la recharge, un ratio indiquant un début de stress sur la ressource. Pour les municipalités situées au nord de la Plate-forme du Saint-Laurent où l'eau souterraine est non potable, le ratio peut devenir supérieur à 10 % dans certains cas, ce qui est toutefois trompeur puisque l'eau souterraine est essentiellement prélevée via des puits de surface dans un aquifère granulaire et dédiée principalement à un usage agricole (Carrier et al., 2013a).

Pour les MRC et les bassins versants (figures 6.2.c, 6.3.c et 6.4.c), le volume de recharge devient tellement important vis-à-vis des volumes d'eau souterraine prélevés, que le ratio « usage/recharge » est toujours inférieur à 10 % (exception faite du bassin versant de Salvail où il atteint 15 %). Ainsi, les classes suggérées par Raskin (1997) ont dû être ajustées afin de pouvoir visualiser divers aplats de couleurs : < 1, 1-3, 3-5, 5-7 et > 7 %. Ceci indique que les niveaux d'échelle ne permettent pas de comparer efficacement les MRC et les bassins versants entre eux. En se fiant aux valeurs calculées de l'indicateur, seule une MRC présente un ratio proche des 10 %, celle de Rouville (9 %) (figure 6.2.c). Le reste des MRC affiche un ratio inférieur ou égal à 7 % dont celle du Haut-Richelieu (5 %). Quant aux bassins versants de niveau 1 (figure 6.3.c), le ratio est inférieur ou égal à 5 % comme, par exemple, le bassin de la Richelieu (5 %). Des différences peuvent toutefois être définies entre les bassins versants de niveau 2 (figure 6.4.c), où ceux de Salvail et des Hurons présentent un ratio supérieur à 7 % puisque localisés au nord de la Montérégie Est, là où la recharge est la plus faible. La majorité des bassins versants ayant les ratios les plus importants sont d'ailleurs situés au nord de la Plate-forme du Saint-Laurent, là où la recharge est faible, tandis que dans les Appalaches, au sud-est de la Montérégie Est, sont identifiés les bassins versants avec le moins de stress sur l'eau souterraine.

6.3 Municipalités avec un important stress sur l'eau souterraine

Pour la Montérégie Est, le niveau d'exploitation de l'eau souterraine est soutenable pour la majorité des municipalités où l'usage représente moins de 10 % de la recharge de l'aquifère rocheux. À partir de l'indicateur de stress sur l'eau souterraine, il a néanmoins été possible d'identifier celles pour lesquelles la mise en place d'une gestion active de l'eau souterraine serait souhaitable pour assurer la pérennité de l'exploitation. L'indicateur a ainsi permis de cibler 13 municipalités où l'usage commence à entraîner un stress sur la ressource (indicateur > 10 %) : Saint-Amable (10 %), Saint-Alphonse-de-Granby (11 %), Saint-Jean-sur-Richelieu (11 %), Bedford (12 %), Yamaska (12 %), Upton (13 %), Saint-Hyacinthe (13 %), Saint-Damase (14 %), Saint-Robert (14 %), Carignan (14 %), Saint-Charles-sur-Richelieu (18 %), la Présentation (18 %) et Saint-Pierre-de-Vérone-à-Pike-River (19 %). Toutefois, six d'entre-elles sont situées au droit d'une zone d'eau souterraine saumâtre impropre à la consommation : Yamaska, Saint-Hyacinthe, Saint-Damase, Saint-Robert, Saint-Charles-sur-Richelieu et La Présentation. De même, cet indicateur a mis en évidence six municipalités où ce stress pourrait être une limite au développement économique (indicateur > 20 %) : Rougemont (21 %), Marieville (22 %), Sainte-Marie-Madeleine (24 %), Sainte-Madeleine (25 %), Saint-Paul-de-l'île-aux-Noix (30 %) et Saint-Césaire (33 %). Les municipalités de Sainte-Madeleine et de Sainte-Marie-Madeleine sont toutes les deux situées sur la zone d'eau souterraine non potable. Bien qu'en bordure de ce secteur non potable, un regard tout particulier devrait être apporté sur les municipalités de Rougemont, Marieville et Saint-Césaire et aussi pour Saint-Paul-de-l'île-aux-Noix. Finalement, 4 municipalités présentent un stress important (indicateur > 40 %), qualifié d'élevé par Raskin (1997) : Roxton Falls (41 %), Waterloo (45 %), Hemmingford (97 %) et Napierville (390 %). Une attention toute particulière est suggérée pour Waterloo alors que les trois autres municipalités citées ont des superficies inférieures à 10 km², ce qui peut expliquer les forts ratios calculés puisque l'eau utilisée localement provient vraisemblablement de zones de recharge localisées à l'extérieur de ces petites municipalités.

6.4 Apports et limitations de l'indicateur de stress sur l'eau souterraine

Cet indicateur de stress sur l'eau souterraine présente plusieurs avantages, notamment la rapidité de sa production. En effet, la mise en forme de l'indicateur suit un protocole plutôt simple (annexe 3) et permet, à l'aide de cartes et de tableurs, de cibler rapidement des secteurs de stress (figures 6.1, 6.2, 6.3 et 6.4). L'outil cartographique offre un aperçu rapide des secteurs de stress à une échelle régionale (figure 4.1 – encart 3) tandis que les informations complémentaires affichées sur la carte détaillée (figure 4.1 – encart 7) permettent de cibler plus localement les zones de pression au sein même d'une municipalité.

De plus, grâce à la mise en place d'une base de données sur grille (section 4.1), il serait possible de mettre à jour assez facilement (par exemple tous les 5 ans), les données d'usage de la ressource en eau. Toutefois, l'une des difficultés souvent rencontrée lors de cette étape concerne l'accès aux données d'usage. Il est ainsi nécessaire de mettre en place une base de données des estimés d'usage de l'eau coordonnée entre les ministères et régulièrement mise à jour. Des recommandations ont été émises lors du PACES Montérégie Est afin de faciliter l'estimation de l'utilisation de l'eau souterraine à plus long terme (Carrier et al., 2013a). L'indicateur présente également l'avantage de pouvoir être utilisé en relation avec les changements climatiques puisque des projections de recharge pourraient être intégrées à cette grille. Ceci pourrait également concerner des projections des besoins en eau à plus long terme comme ce fut le cas dans le projet RADEAU 1 pour l'usage agricole (Delmotte, 2017).

Comme constaté dans la section 6.2, cet indicateur assure un premier survol des secteurs de stress mais il apparaît nécessaire, pour l'analyste, d'avoir une connaissance du contexte hydrogéologique de la région afin de pouvoir ensuite définir les facteurs de stress sur les quelques municipalités ciblées. Il serait intéressant d'avoir les différents types d'usage pour pouvoir identifier la nature de l'usage exerçant le plus de stress sur la ressource en eau souterraine (agricole, résidentiel ou ICI). Cette information complémentaire pourrait être intégrée sur la grille puis combinée à l'échelle municipale dans un tableur afin d'apporter des informations complémentaires à l'analyste. De même, comme suggéré dans la section 3.4, il serait possible d'atteindre un niveau de détails plus fin que l'échelle municipale en délimitant les divers usages selon la carte d'occupation des sols disponible dans les projets PACES (Carrier et al., 2013b – livrable PACES no. 7) (voir les travaux documentés à la section 9).

D'après le travail d'analyse préliminaire effectué dans ce rapport (section 6.2), il ne semble pas nécessaire de conserver et donc de calculer cet indicateur à toutes les échelles de visualisation testées (municipale, MRC, bassins versants de niveau 1 et 2). L'analyse de la carte des bassins versants de niveau 2 (figure 6.4) a ciblé des secteurs similaires à la carte des municipalités (figure 6.1) tout en ayant une précision moindre. De même, il y a une perte d'information, que ce soit de l'usage ou de la recharge, lorsque l'indicateur est calculé sur des territoires importants comme à l'échelle des MRC (figure 6.2) ou des bassins versants de niveau 1 (figure 6.3). Il est en effet impossible d'identifier le piège hydraulique de la municipalité de Napierville à l'échelle des MRC ou des bassins versants ; seule la carte à l'échelle municipale permet de cibler la municipalité en question. Dans le projet pilote sur les indicateurs de gestion durable de l'eau souterraine de Martin et al. (2013), les acteurs locaux avaient d'ailleurs recommandé d'utiliser les limites municipales pour dériver les indicateurs plutôt que les limites hydrologiques ou hydrogéologiques. Pour un gain de temps non négligeable, il est donc suggéré de déterminer l'indicateur uniquement à l'échelle municipale (figure 6.1) afin d'éviter la redondance de cartes non pertinentes (figures 6.2, 6.3 et 6.4).

L'information sur la surface des municipalités incluse sur le territoire à l'étude (non indiquée sur la carte mais bel et bien présente dans le tableur mis à disposition de l'analyste) est également primordiale puisqu'elle permet d'écarter les municipalités recoupées seulement en partie par le PACES, ce qui évite les aberrations retrouvées lors du calcul de l'indicateur. Par exemple, la municipalité de Saint-Pie-de-Guire présente un ratio élevé de 18 % mais recoupe seulement le territoire sur 14 %. Par ailleurs, cette information a permis d'identifier deux municipalités qui ne recoupent pas le territoire du projet à savoir Lanoraie et Lavaltrie ainsi que deux territoires non organisés où l'indicateur n'a pas pu être calculé : les TNO de la MRC du Bas-Richelieu et de la MRC de Brome-Missisquoi.

Il est également suggéré de réfléchir à des intervalles pertinents pour les diverses cartes (usage, recharge et usage/recharge). Plus particulièrement pour la carte de l'indicateur final (figure 6.1.c), ces intervalles pourraient correspondre aux seuils identifiés par Raskin (1997) soient 10, 20 et 40 %. Toutefois, comme la majorité des municipalités de la Montérégie Est exploite moins de 10 % de la recharge de l'aquifère rocheux, cette échelle a dû être adaptée en retirant le seuil à 40 % puis en ajoutant des ratios intermédiaires à 5 et 15 %. Comme indiqué dans la section 2.3.2, il est actuellement difficile de définir un seuil « d'alerte » traduisant une « surexploitation » de la ressource en eau souterraine. Toutefois, par précaution, les ratios de 10 et 20 % pourraient être associés à deux seuils « d'alerte » à utiliser pour identifier les municipalités où le niveau d'exploitation de l'eau souterraine pourrait ne pas être durable ou causer un impact environnemental significatif.

Cet indicateur présente également quelques limitations. En premier lieu, il n'aborde pas les variations saisonnières d'utilisation d'eau faute de données suffisantes. En effet, il peut y avoir des problèmes saisonniers de disponibilité en eau souterraine, notamment sur des secteurs particuliers où l'usage est essentiellement estival (irrigation ou alimentation en eau à des fins récréotouristiques) (Carrier et al., 2013a). Les indicateurs climatique et piézométrique (section 7) ainsi que l'indicateur hydrologique (section 5) pourraient alors apporter une information complémentaire sur l'état de la nappe à l'étiage. Ensuite, l'indicateur ne différencie pas la part d'eau souterraine consommée puis exportée de celle consommée puis directement retournée au sol (Martin et al., 2013). De plus, cet indicateur ne retranscrit pas d'information sur « l'exploitabilité » de l'eau souterraine mais donne une idée de la « disponibilité » de l'eau souterraine (recharge) par rapport à son niveau d'exploitation (usage). Dans les trois projets PACES réalisés ou en cours de réalisation par l'INRS sur la rive sud du Saint-Laurent (Carrier et al., 2013a ; Lefebvre et al., 2015 ; Lefebvre et al., 2019), il s'est avéré que l'aquifère rocheux régional était peu productif à cause de la faible fracturation naturelle du roc dans les Appalaches. Ceci fait en sorte que l'exploitation de l'eau souterraine, notamment par les municipalités, peut s'avérer très difficile, même si la recharge de l'aquifère au roc est importante. Ainsi, certaines municipalités se tournent vers l'aquifère granulaire (27 puits municipaux captent les dépôts granulaires contre 48 forés dans le roc fracturé). Parmi les indicateurs de stress hydrique retenus, il n'y a pas d'indicateur relié à l'exploitabilité de l'eau souterraine. Les problématiques d'approvisionnement pourraient révéler des problèmes d'exploitabilité, mais une réflexion est requise pour déterminer si un autre indicateur relié à l'exploitabilité des ressources en eau souterraine devrait aussi être considéré.

La mise en œuvre de cet indicateur à large échelle inclut quelques approximations, dont il est nécessaire de connaître l'existence, mais qui ont toutefois un impact limité. Les estimations d'usage peuvent varier d'un projet PACES à l'autre puisque les méthodes employées pour les calculer ne sont pas toujours les mêmes, c'est aussi le cas pour l'estimation de la recharge. Il y a toutefois une certaine cohérence entre les projets de l'INRS (Montérégie Est, Chaudière-Appalaches et Estrie). Le calcul des usages dépend fortement de la précision des données collectées mais également des chartes utilisées pour le calcul des usages agricoles et résidentiels (Carrier et al., 2013a). C'est aussi le cas pour la recharge de l'aquifère au roc, l'un des paramètres hydrogéologiques les plus difficiles à évaluer (Carrier et al., 2013a). La mise en œuvre d'une grille pour simplifier la tâche des analystes et la mise en application de l'indicateur à l'échelle municipale induit également une dernière incertitude, certes mineure à l'échelle considérée. En effet, si le centre d'une maille se retrouve à l'intérieur d'une municipalité, la maille est alors considérée comme étant entièrement comprise dans la municipalité, entraînant alors une erreur si celle-ci chevauche plusieurs municipalités.

Dans l'interprétation des résultats, il faut réaliser que l'approche utilisée ne considère que la recharge qui se produit directement dans la municipalité, alors que dans certains cas l'écoulement de l'eau souterraine peut apporter des quantités importantes d'eau souterraine à partir de l'extérieur de la municipalité (Martin et al., 2013). Cet indicateur ne témoigne donc pas toujours de l'état de l'eau au sein d'une municipalité, ce qui est vraisemblablement le cas pour la municipalité de Napierville.

7 INDICATEURS CLIMATIQUE ET PIÉZOMÉTRIQUE

7.1 Conditions climatiques et niveaux d'eau souterraine

L'indicateur climatique a été considéré pour évaluer si les précipitations exercent un contrôle dominant sur la recharge et le niveau de l'eau souterraine. Si c'est le cas dans une région, l'indicateur climatique pourrait aider à distinguer un déclin du niveau d'eau souterraine relié à des facteurs climatiques par rapport à un déclin qui serait causé par l'augmentation de l'exploitation de l'eau souterraine.

Afin de définir le travail requis pour produire un indicateur climatique, tester les formats de présentation que pourraient prendre cet indicateur et évaluer l'intérêt d'un tel indicateur, le choix a été fait de produire cet indicateur d'abord à des localisations où des hydrogrammes de puits du RSESQ possèdent de longues séquences de mesure. Ainsi, les hydrogrammes des puits du RSESQ à Pont-Rouge (05080001) et Saint-Rémi (03097102) ont été sélectionnés. Ces puits représentent des contextes hydrogéologiques très contrastés : le puits de Pont-Rouge est installé dans un vaste aquifère deltaïque en condition libre, alors que le puits de Saint-Rémi est installé dans un aquifère rocheux fracturé en conditions captives sous 14 m de till argileux. De plus, le puits de Saint-Rémi est sous l'influence d'un intense pompage saisonnier relié à l'irrigation agricole. Au niveau des données météorologiques, la grille climatique quotidienne produite à partir du Réseau de surveillance du climat du Québec (RSCQ) du MELCC a été utilisée pour le puits de Pont-Rouge, alors que pour le puits de Saint-Rémi les données ont été prises à la station météorologique L'Acadie (702LED4) qui est à proximité.

L'indicateur climatique a été produit en faisant la somme des précipitations pour les années hydrologiques (octobre à septembre), en calculant la moyenne des précipitations totales pour la période considérée (similaire aux données des hydrogrammes de puits), puis finalement en calculant l'écart entre les précipitations totales d'une année par rapport à la moyenne à long terme. Les figures 7.1 et 7.2 montrent respectivement les résultats pour les puits de Pont-Rouge et de Saint-Rémi. Pour le puits de Pont-Rouge, il est clair que les niveaux d'eau souterraine (figure 7.1.b) évoluent de façon cohérente par rapport aux écarts des précipitations (figure 7.1.c). C'est particulièrement évident durant la période allant de 1997-1998 à 2001-2002 pendant laquelle les précipitations ont été inférieures à la moyenne et que les niveaux d'eau souterraine baissent systématiquement d'une année à l'autre. Dans le cas du puits de Saint-Rémi, la relation entre l'indicateur climatique et les niveaux d'eau souterraine n'est pas aussi claire (figure 7.2). Ceci peut être dû partiellement au fait que pour la période considérée il n'y a pas d'années successives avec des écarts positifs ou négatifs des précipitations annuelles par rapport à la moyenne. On remarque toutefois que les niveaux d'eau du puits de Saint-Rémi baissent progressivement au fil des années, possiblement en relation avec l'exploitation importante de l'eau souterraine pour l'irrigation des cultures. La figure 7.3 montre que les niveaux d'eau moyens du puits de Saint-Rémi montrent une tendance à la baisse pour la période de mesure considérée. À noter que des mesures dans la première moitié des années 1980 montraient des niveaux d'eau dont l'élévation variait entre 45 et 50 m et que la baisse du niveau piézométrique a débuté dès la deuxième moitié des années 1980 (pas illustré par une figure).

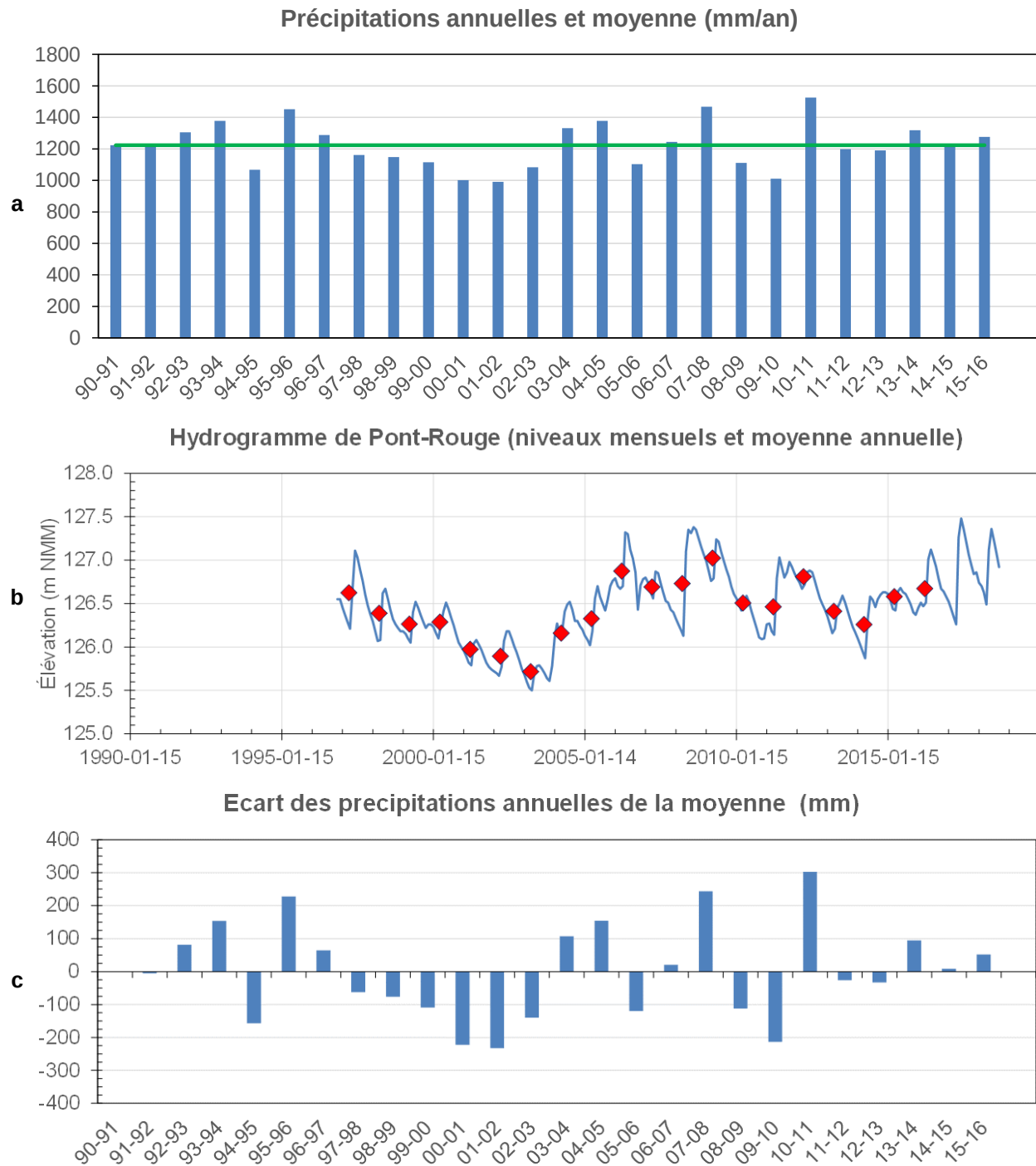


Figure 7.1 : Indicateur climatique et niveaux d'eau souterraine à Pont-Rouge : (a) Précipitations totales annuelles et leur moyenne (trait vert) ; (b) niveaux d'eau mensuels (trait bleu) et moyennes annuelles (losange rouge) ; (c) écart des précipitations totales par rapport à la moyenne

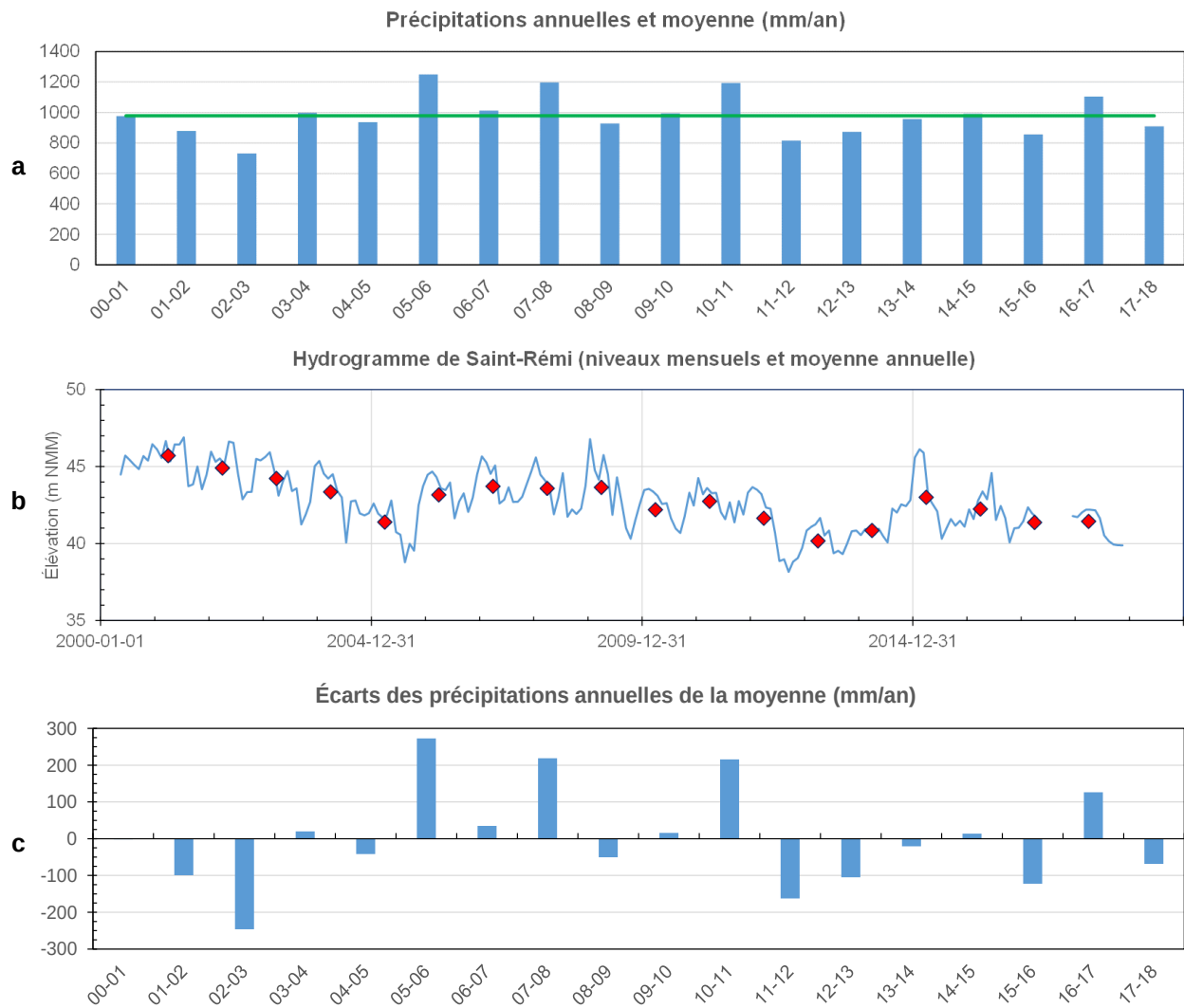


Figure 7.2 : Indicateur climatique et niveaux d'eau souterraine à Saint-Rémi : (a) Précipitations totales annuelles et leur moyenne (trait vert) ; (b) niveaux d'eau mensuels (trait bleu) et moyennes annuelles (losange rouge) ; (c) écart des précipitations totales par rapport à la moyenne

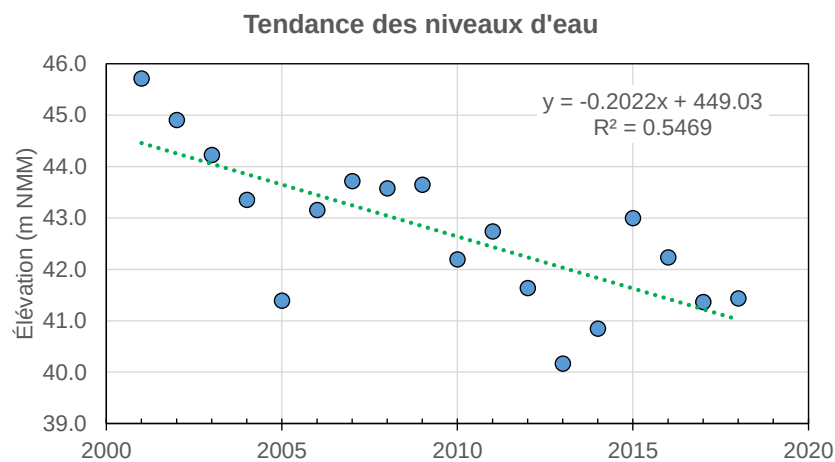


Figure 7.3 : Tendance temporelle des niveaux d'eau moyens annuels au puits de Saint-Rémi

7.2 Indicateurs climatique et piézométrique

Afin d'évaluer plus quantitativement la relation entre les variations des précipitations et les niveaux piézométriques, les écarts normalisés de ces deux mesures ont été calculés. Ces écarts normalisés (Δx_i^*) sont obtenus en divisant par l'écart-type des écarts annuels (σ_x) la différence des écarts de la mesure annuelle (Δx_i) par rapport à la moyenne des écarts de la mesure ($\overline{\Delta x}$) pour la période considérée :

$$\Delta x_i^* = \frac{\Delta x_i - \overline{\Delta x}}{\sigma_x}$$

Pour le puits de Pont-Rouge, l'amplitude des changements de niveau d'eau reliés à la recharge printanière est très variable (figure 7.1.a), ce qui influence fortement le niveau moyen annuel du niveau d'eau. Pour ce puits le choix a donc été fait d'utiliser le niveau d'eau minimum enregistré dans l'année plutôt que le niveau moyen annuel. Ce niveau minimum reflète l'effet combiné de la recharge (surtout au printemps) et de la récession subséquente du niveau d'eau. Dans le cas du puits de Saint-Rémi, c'est plutôt le pompage estival pour l'irrigation agricole qui impacte le niveau d'eau (figure 7.2 ; plus clairement visible sur l'hydrogramme avec des mesures quotidiennes de niveau d'eau). Pour ce puits, le niveau moyen annuel de l'eau apparaît plus représentatif. Toutefois, les niveaux d'eau de ce puits montrent une tendance claire à la baisse avec les années (figure 7.3). L'écart normalisé des niveaux d'eau pour ce puits ont donc été calculés par rapport à droite de tendance des niveaux d'eau afin de compenser l'effet anthropique et de faire mieux ressortir l'effet des variations des précipitations. Les résultats sont présentés à la figure 7.4.

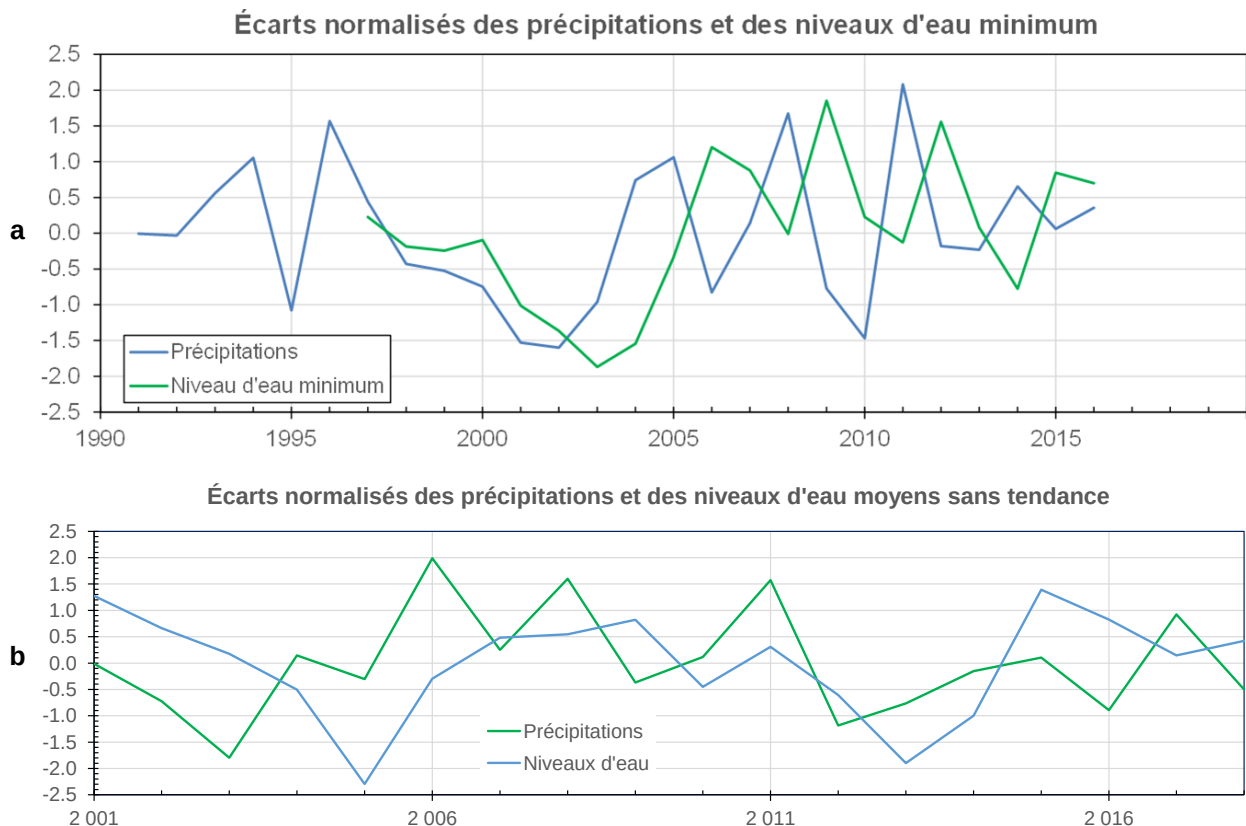


Figure 7.4 : Comparaison des écarts normalisés des précipitations et des niveaux d'eau pour les puits de Pont-Rouge (a) et de Saint-Rémi (b)

Pour le puits de Pont-Rouge, il y a une relation assez évidente entre les écarts des précipitations et les écarts des niveaux d'eau (figure 7.4.a), mais ce n'est pas aussi clair pour le puits de Saint-Rémi (figure 7.4.b). Dans les deux cas, il semble y avoir un déphasage entre les écarts de précipitation et ceux des niveaux d'eau. Ceci pourrait indiquer qu'il faut un certain temps avant que les niveaux d'eau soient en équilibre avec les variations de la recharge. Ce déphasage pourrait dépendre des conditions locales du système aquifère dans lequel se trouve le puits d'observation. Il n'est pas possible de généraliser cette observation avec le peu de puits d'observation considéré dans le cadre de la présente étude.

Smail et al. (2019) ont récemment montré qu'il est possible d'établir une relation entre les écarts cumulatifs des précipitations et les écarts cumulatifs des niveaux d'eau. Cette approche a été tentée pour les deux puits d'observation considérés, mais sans succès. Nous sommes d'avis en fait que les niveaux d'eau représentent déjà l'effet cumulatif des précipitations puisqu'ils découlent de l'effet combiné de la recharge, reliée aux précipitations, et de la récession des niveaux d'eau souterraine causée par la résurgence de l'eau souterraine hors des aquifères. Les hydrogrammes de puits représentent ainsi déjà la perte cumulative d'eau souterraine que le cumul de la recharge (reliée aux précipitations) vient compenser.

7.3 Relation avec les paramètres hydrologiques

En plus des niveaux d'eau souterraine, l'indicateur climatique peut aussi être mis en relation avec les données hydrologiques. La figure 7.5 montre la localisation des stations météorologique et de jaugeage ainsi que le tronçon de l'Atlas hydroclimatique utilisés pour cet exercice. La figure 7.6 montre l'écart normalisé des précipitations totales annuelles mesurées à la station météorologique de Farnham (7022320). Cette figure montre aussi les écarts normalisés de paramètres hydrologiques issus soit de la station de jaugeage 030345 (sous-bassin de la rivière Yamaska) et du tronçon MON0016 de l'Atlas hydroclimatique du Québec 2018 qui est représentatif du même bassin versant.

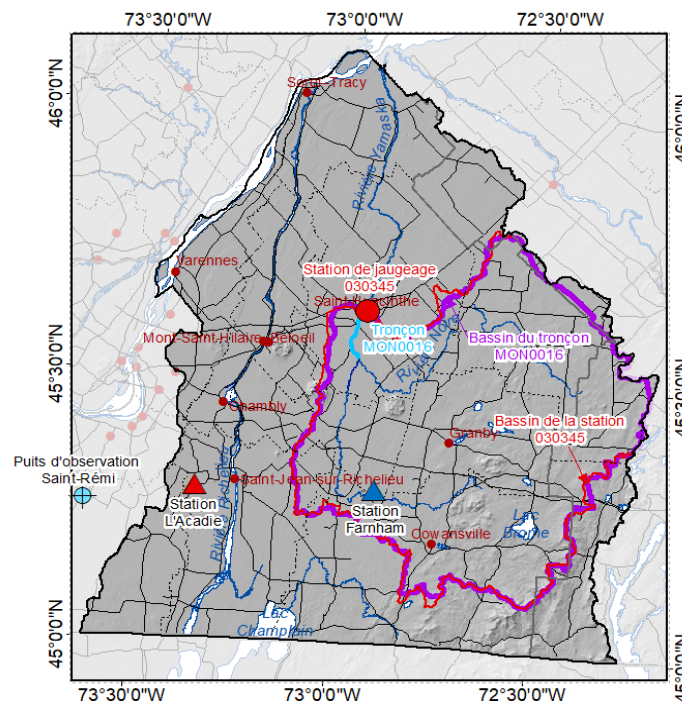


Figure 7.5 : Localisations de la station météorologique Farnham (7022320), de la station de jaugeage 030345 et du tronçon MON0016 de l'Atlas hydroclimatique du Québec. Les polygones montrent que les sous-bassins correspondant à la station de jaugeage et au tronçon sont très similaires

Les écarts normalisés ont été calculés de la même façon que pour la comparaison des précipitations avec les niveaux d'eau souterraine. Les paramètres hydrologiques comprennent le débit total annuel (Q_t) et le débit de base annuel (Q_b). Pour la station de jaugeage, le débit total Q_t correspond directement à la mesure alors que pour l'Atlas hydroclimatique, le paramètre Q_t pour le tronçon de cours d'eau MON0016 a été produit par une modélisation. Le débit de base (Q_b) à la station a été estimé à partir de deux filtres, soient le filtre d'Eckhardt (2008) (Q_b Eckhardt – Station 030345) calculé par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) (Poirier, 2012) et le filtre de Chapman (1999) (Q_b Chapman – Station 030345) (calcul décrit à l'annexe 2). Pour les données de l'Atlas hydroclimatique, le débit de base a aussi été calculé avec le filtre de Chapman (Q_b Chapman – Tronçon MON0016). La figure 7.6 montre que les écarts normalisés des paramètres hydrologiques sont fortement corrélés à l'écart normalisé des précipitations. Contrairement aux niveaux d'eau souterraine, il n'y a pas de déphasage apparent entre l'écart annuel des précipitations et les écarts des variables hydrologiques. Cette différence pourrait être causée par la réponse relativement rapide des cours d'eau suite aux précipitations par rapport à la réponse des aquifères qui peuvent avoir une inertie importante. Les travaux sur les paramètres hydrologiques sont décrits plus en détail à l'annexe 2.

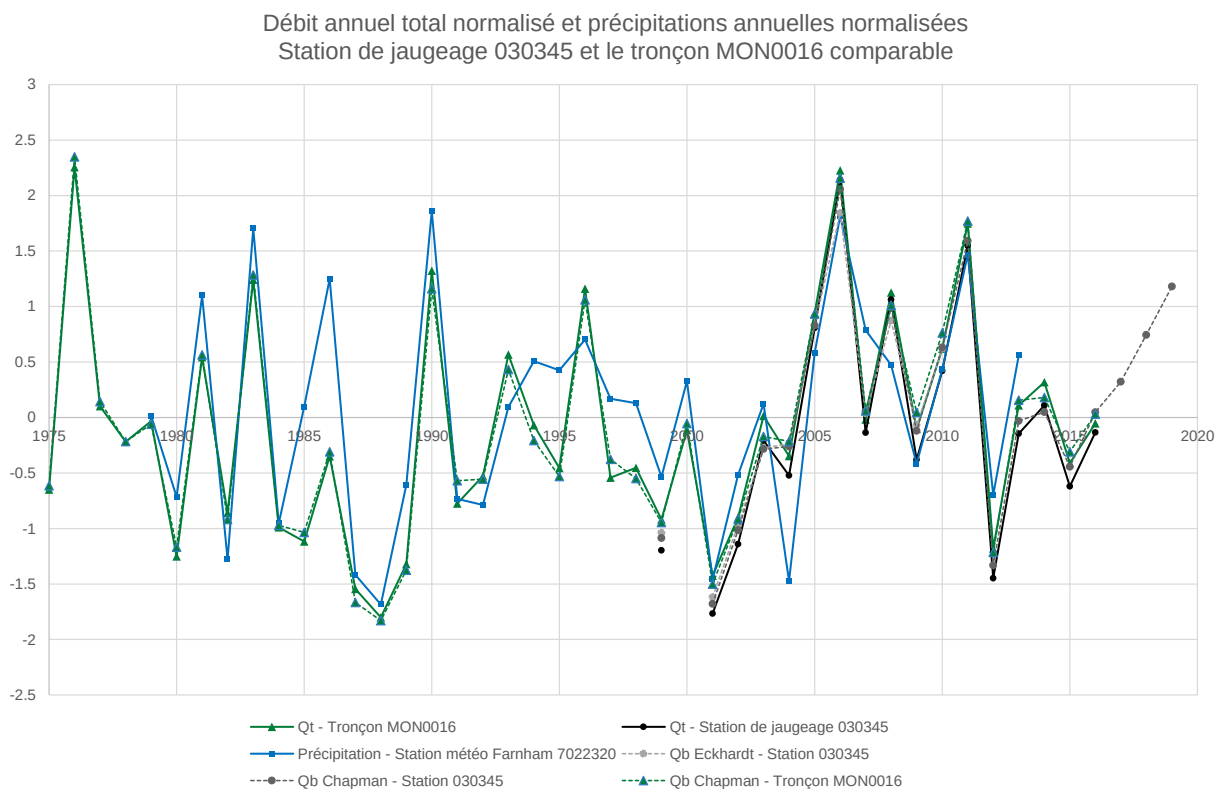


Figure 7.6 : Comparaison des écarts normalisés des précipitations à la station météorologique de Farnham (7022320) avec des variables hydrologiques pour la station de jaugeage 030345 et l'Atlas hydroclimatique pour le tronçon de cours d'eau MON0016 dans un sous-bassin de la rivière Yamaska

Ces travaux préliminaires sur la production d'un éventuel indicateur climatique montrent qu'un tel indicateur pourrait être mis en relation avec les variations des niveaux d'eau souterraine ainsi que des paramètres hydrologiques. Nous recommandons ainsi fortement la production d'un indicateur climatique. Même si d'autres formulations sont envisageables (ex. : Smail et al., 2019), nous suggérons la production de l'indicateur climatique sous la forme très simple montrée aux figures 7.1.c et 7.2.c. Cette représentation est très facile à comprendre et n'exige que très peu d'explications. Nous suggérons aussi de considérer la même période (1981 à 2010) pour les données de précipitations pour estimer la précipitation moyenne afin d'utiliser directement les normales climatiques produites par le MELCC dans le cadre de son programme de suivi du climat (<http://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/surveillance/index.asp>).

Il faudrait aussi utiliser une même source de données météorologiques pour la production de l'indicateur climatique (stations ou grille météorologiques). Il faudra déterminer la répartition spatiale des indicateurs climatiques afin qu'ils soient représentatifs des conditions typiques d'une grande région ou d'un contexte hydrogéologique.

Bien que les travaux préliminaires présentés dans le présent rapport montrent que les écarts normalisés des précipitations peuvent être mis en relation avec les écarts des niveaux d'eau souterraine ou de variables hydrologiques, nous ne recommandons pas la réalisation systématique de tels travaux. Toutefois, le travail de production des écarts normalisés des niveaux d'eau ou des paramètres hydrologiques pourrait être considéré pour des cas particuliers. Par exemple, si les travaux de l'INRS réalisés dans le cadre du projet PACC (Gosselin et al., 2021) montrent qu'un puits ou un groupe de puits sont représentatifs d'un contexte hydrogéologique régional, il pourrait alors être pertinent de comparer ces niveaux d'eau à l'indicateur climatique. Il pourrait aussi être intéressant de tenter de mettre en relation l'indicateur climatique avec les hydrogrammes statistiques produits dans le cadre du projet PACC de l'INRS (Gosselin et al., 2021).

7.4 Apports et limitations des indicateurs climatique et piézométrie

Les indicateurs climatique et piézométriques sont simples à la fois conceptuellement et au niveau de leur mise-en-œuvre. Ces indicateurs permettent de définir des tendances ou des périodes ayant des précipitations ou des niveaux piézométriques qui s'écartent des conditions « normales ». Ces indicateurs sont intéressants à mettre en relation car l'indicateur climatique permet de donner une explication aux variations de niveau d'eau souterraine, si elles sont naturelles, ou éventuellement de déceler l'effet de prélèvements importants sur les niveaux piézométriques si l'indicateur piézométrique s'écarte de l'indicateur climatique. Ces indicateurs sont d'ailleurs utilisés en France pour caractériser l'état des nappes (BRGM, 2020). Nos travaux préliminaires indiquent aussi le potentiel prédictif de l'indicateur climatique pour les variables hydrologiques de surface. Il pourrait ainsi être intéressant d'évaluer plus en détail la possibilité d'utiliser l'indicateur climatique pour la prédiction des étiages.

Les indicateurs climatique et piézométrique présentent toutefois certaines contraintes ou limitations. D'abord, leur application nécessite la mise en relation de données météorologiques et de niveau d'eau souterraine. Il est donc nécessaire d'associer une station météorologique ou une maille d'une grille météorologique à un puits du RSESQ pour être en mesure de produire conjointement ces indicateurs. Puisque ces indicateurs sont basés sur des mesures locales, ils pourraient ainsi représenter des conditions très spécifiques et ne pas être représentatives de conditions à une échelle régionale. D'ailleurs, le BRGM (2020) combine les indications fournies par plusieurs puits pour caractériser l'état des nappes. Enfin, pour appliquer ces indicateurs, il est nécessaire de les relier à des secteurs aux conditions climatiques relativement homogènes et distinctes ainsi qu'aux conditions aquifères spécifiques à ces secteurs. La prochaine section documente ainsi la définition de secteurs hydroclimatiques à l'intérieur desquels les indicateurs météorologiques et piézométriques pourraient être rattachés.

8 DÉFINITION DES SECTEURS HYDROCLIMATIQUES

Les travaux préliminaires (Domaine et al., 2020) ont montré la nécessité de produire un indicateur climatique permettant de caractériser la variabilité naturelle des conditions contrôlant les diverses composantes du bilan hydrologique. Cet indicateur a pour but d'évaluer si les paramètres météorologiques (précipitations et températures) jouent un rôle dominant sur le taux de recharge et donc le niveau des nappes, ce qui permettrait, par la suite, de distinguer si une baisse du niveau de la nappe peut être reliée à une variation d'ordre naturel (facteurs climatiques) ou anthropique (exploitation excessive de l'eau souterraine).

Dans le rapport de phase 1 (Domaine et al., 2020), l'indicateur climatique avait été produit en comparant les écarts normalisés des précipitations et des niveaux d'eau pour deux puits du RSESQ implantés dans des contextes hydrogéologiques contrastés : Saint-Rémi (03097102) et Pont-Rouge (05080001). Les données météorologiques utilisées pour produire cet indicateur provenaient de deux sources : (1) la grille climatique quotidienne produite à partir du Réseau de surveillance du climat du Québec (RSCQ) du MELCC pour le puits de Pont-Rouge et (2) la station météorologique L'Acadie (702LED4) gérée par Environnement et Changement Climatique Canada (ECCC) pour le puits de Saint-Rémi.

Ces travaux initiaux ont montré qu'il est possible de facilement relier précipitations et variations du niveau de nappe pour le puits de Pont-Rouge et qu'un déphasage de plus d'une année est observé entre une année pluvieuse et un enregistrement d'une hausse de la nappe. Pour ce puits, il est donc envisageable de connaître en avance l'impact d'une année avec peu de précipitations sur les niveaux d'eau. L'effet des pompages estivaux pour l'irrigation agricole a été observé sur le puits de Saint-Rémi puisque les niveaux d'eau montrent une tendance à la baisse avec les années. Sur ce puits, même en séparant la composante anthropique (pompage excessif) de la composante naturelle (quantité d'eau précipitée), il est plus difficile de relier précipitations et fluctuations naturelles de la nappe.

Ainsi, le contexte d'implantation des puits du RSESQ semble être un élément essentiel pour caractériser adéquatement les tendances observées sur les niveaux de nappe. Par conséquent, ces fluctuations devraient être représentatives des conditions climatiques et hydrogéologiques typiques d'une région donnée, lorsque les niveaux d'eau ne sont pas sous l'influence d'un pompage à proximité. Ce constat implique donc la définition de contextes hydroclimatiques dans le but de définir des secteurs pour lesquels des normales climatiques pourront être déterminées puis associées à chaque puits ou groupe de puits du RSESQ représentatifs des conditions hydrogéologiques de ce secteur.

La section 8.1 du présent rapport présente la procédure de définition des divers contextes hydroclimatiques, appelés « secteurs hydroclimatiques » puisque faisant référence à des zones géographiques distinctes et ce sur tout le sud du Québec. Cette section s'appuie également sur plusieurs cartes jointes à l'annexe 4. L'annexe 5 fournit plus de détails techniques sur les diverses étapes de délimitation de ces contextes hydroclimatiques. De plus, afin d'offrir à l'analyste l'accès à une information simple et concise, une fiche de synthèse a été élaborée pour chaque secteur hydroclimatique dont les divers encarts et cartes sont décrits dans la section 8.2. Puis, la section 8.3 présente les caractéristiques physiques et climatiques de chacun des secteurs hydroclimatiques identifiés sur le territoire d'étude. Finalement, la section 8.4 récapitule les principaux avantages et les diverses limitations du processus de définition de ces secteurs hydroclimatiques. Le lecteur pourra également trouver plus d'informations aux annexes 6 et 7 qui recensent respectivement l'ensemble des fiches informatives produites et des planches cartographiques associées.

8.1 Définition des contextes hydroclimatiques sur le sud du Québec

8.1.1 Objectifs

L'objectif est de définir des secteurs aux caractéristiques hydrogéologiques et climatiques distinctes et ce à une échelle adaptée. Par la suite, les différents secteurs définis seront mis en relation avec un ou plusieurs puits du RSESQ dans le cadre du projet PACC (Gosselin et al., 2021) qui vise à classer les puits de suivi en fonction de leur utilité. Il sera alors possible de relier les données climatiques (précipitations et températures) aux fluctuations de la nappe enregistrées dans les puits de suivi sélectionnés qui serviront alors de puits de référence ; puis de vérifier la présence d'éventuelles tendances des niveaux d'eau souterraine dans ces quelques puits (un déclin par exemple) reliées aux facteurs climatiques.

8.1.2 Territoire d'application

Tout d'abord, afin d'être en accord avec les autres projets ultra-régionaux en cours de réalisation dans le cadre du PACC, menés notamment en parallèle par l'INRS pour le MELCC, la zone d'étude considérée correspond aux limites définies dans le Projet synthèse du sud du Québec (PSyRESQ) et s'étend du fleuve Saint-Laurent à la frontière américaine sur une superficie de l'ordre de 36 000 km² (Lefebvre, 2018). Ce territoire recoupe plusieurs projets de caractérisation hydrogéologique régionaux, offrant ainsi les données nécessaires à la poursuite des projets menés actuellement par le MELCC (tableau 8.1 et carte A.4.1).

Tableau 8.1 : Caractéristiques du territoire concerné par la définition des contextes hydroclimatiques et anciens projets de caractérisation hydrogéologique régionaux recoupés

Nom du projet	Année de finalisation	Responsables	Territoire (km ²)	
			Total du projet	Recoupé par le PACC
Projet Châteauguay	2006	CGC et INRS	3 006	2 295 (76.3 %)
PACES Bécancour	2013	UQAM	2 855	2 855 (100 %)
PACES Montérégie Est	2013	INRS	9 055	8 934 (98.7 %)
PACES Communauté métropolitaine de Québec	2013	Université Laval	3 663	256 (7.0 %)
PACES Chaudière-Appalaches	2015	INRS	15 601	7 772 (49.8 %)
PACES Nicolet-Saint-François	2015	UQAM	4 601	4 601 (100 %)
PACES Estrie	2021 (en cours)	INRS	10 702	10 698 (100 %)
PACC	En cours	INRS, UQAM, CGC et Université Laval	35 875^{1,2}	

1 : 465 km² des 35 875 km² du PACC, soit 1.3 %, n'ont pas été couverts par les projets antérieurs ;

2 : 1 908 km² des 35 875 km² du PACC, soit 5.3 %, représentent des zones couvertes par plusieurs anciens projets.

8.1.3 Élaboration des cartes de base

Le but ultime des divers contextes hydroclimatiques étant de différencier des zones aux caractéristiques hydrogéologiques et climatiques distinctes, il est donc nécessaire de sélectionner adéquatement les bons critères de définition des contextes hydroclimatiques. En première approche, plusieurs éléments avaient donc été considérés pour la définition des différents secteurs hydroclimatiques : (1) les grands ensembles géologiques, (2) la physiographie, (3) les normales climatiques (précipitations totales et températures moyennes) et (4) les limites des Zones de gestion intégrée de l'eau par bassins versants (ZGIEBV). Ces données ont été produites sous la forme de cartes au 1 : 1 000 000 afin de sélectionner le(s) critère(s) le(s) mieux adapté(s) à la définition des secteurs hydroclimatiques pour le sud du Québec.

Deux cartes géologiques ont ainsi été produites sur l'ensemble du territoire d'étude ; une première présentant les provinces géologiques (carte A.4.2) et une deuxième délimitant les subdivisions géologiques (carte A.4.3). Les limites de ces grands ensembles géologiques proviennent d'une base de données spécifiquement dédiée à la géologie du socle rocheux issue du Système d'information géomineière du Québec (SIGÉOM, 2020) édité par le Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) du Québec.

De même, une carte topographique a été établie à partir du dernier modèle d'élévation (4^e version) du Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Ce modèle produit par la NASA offre 90 m de résolution et se compose de tuiles de 5 x 5° (Jarvis et al., 2008). Le modèle numérique de terrain (MNT) résulte ainsi de la combinaison des quatre feuillets suivants : 22-03, 22-04, 23-03 et 23-04. Pour les fins du projet actuel, le MNT présenté sur la carte A.4.4 a par la suite été simplifié pour réduire la résolution (carte A.4.5) à l'aide d'un outil disponible sur ArcGIS décrit dans l'annexe 5.

Quant aux données climatiques, il a été décidé d'utiliser la grille climatique éditée par le Réseau de surveillance du climat du Québec et mise à disposition par le MELCC (Bergeron, 2017) ; autrement appelée « grille Info-climat ». La 2^e version de cette grille de 0.1° de résolution (carte A.4.6), soit de l'ordre de 11 km en latitude et 8 km en longitude ici, permet l'accès aux trois données suivantes : précipitations totales (sans distinction des apports solides et liquides), températures minimales et maximales. Actuellement, les données disponibles sur une base quotidienne couvrent une période allant de 1961 à 2017. La procédure de sélection des mailles sur le territoire visé est détaillée dans l'annexe 5. De plus, afin d'être en accord avec la période de temps choisie par le réseau de surveillance du climat du MELCC pour établir les normales climatiques québécoises (1981-2010), la période de référence considérée pour réaliser les cartes des normales climatiques sur le sud du Québec utilisera ces mêmes 30 années de données. Les deux cartes finalement produites sont les suivantes : précipitations totales annuelles moyennes en mm/an (carte A.4.7) et températures moyennes annuelles en °C (carte A.4.8). Cette 2^e carte résulte de la combinaison des données brutes de températures minimales et maximales de la grille dont la procédure est détaillée dans l'annexe 5.

Enfin, les limites des Zones de gestion intégrée de l'eau par bassins versants (ZGIEBV), disponibles sur Données Québec (MELCC, 2020), ont aussi été considérées dans le processus d'élaboration des secteurs hydroclimatiques. Ceci assure une certaine cohérence quant aux limites hydrologiques et aussi concernant la gestion de l'eau à l'échelle régionale. Au total, ce sont neuf organismes de bassins versants qui sont totalement inclus dans la région d'étude (tableau 8.2 et carte A.4.9).

Tableau 8.2 : Organismes de bassins versants inclus au sein de la région d'étude

ID	ZGIEBV	OBV	Sigle	Aire (km ²)
3	Baie Missisquoi	Organisme de bassin versant de la baie Missisquoi	OBVBM	1 361
6	Bécancour	Groupe de concertation des bassins versants de la zone Bécancour	GROBEC	3 839
8	Châteauguay	Société de conservation et d'aménagement du bassin de la rivière Châteauguay	SCABRIC	2 411
9	Chaudière	Comité de bassin de la rivière Chaudière	COBARIC	6 711
12	Du Chêne	Organisme de bassins versants de la zone du Chêne	OBV du Chêne	1 175
28	Nicolet	Organisme de concertation pour l'eau des bassins versants de la rivière Nicolet	COPERNIC	3 654
29	Richelieu	Comité de concertation et de valorisation du bassin de la rivière Richelieu	COVABAR	2 868
34	Saint-François	Conseil de gouvernance de l'eau des bassins versants de la rivière Saint-François	COGESAF	9 005
40	Yamaska	Organisme de bassin versant de la Yamaska	OBV Yamaska	4 851

8.1.4 Définition des secteurs hydroclimatiques

Un rapide regard sur les cartes décrites dans la section 8.1.3 a mis en exergue plusieurs éléments. Tout d'abord, aucun lien formel n'a pu être établi entre les données climatiques et les grands ensembles géologiques. Par conséquent, la géologie n'a pas été retenue comme critère de définition des secteurs hydroclimatiques. Au contraire, le relief semble exercer une influence prépondérante sur la distribution des précipitations au sud du Saint-Laurent (carte A.4.7). Ainsi, la limite physique fixée à 200 m d'altitude par rapport au niveau moyen de la mer (carte A.4.10) marque un seuil entre une zone de précipitations plus faibles (1 050 mm/an en moyenne entre 1981 et 2010) au nord, là où le relief est moins marqué, et une autre, au sud, caractérisée par des reliefs plus importants où les précipitations totales sont plus élevées (1 153 mm/an en moyenne). Quant aux températures, le gradient observé sur la carte A.4.8 est orienté est-ouest avec des températures moyennes généralement plus élevées à l'ouest de la zone d'étude, soit en s'approchant de la Montérégie et de la région de Montréal.

Cette limite physique permet ainsi de distinguer deux zones aux caractéristiques climatiques distinctes (carte A.4.10) : une première zone côté fleuve Saint-Laurent au nord et une deuxième zone côté frontière américaine au sud. La zone nord est donc caractérisée par une pluviométrie plus faible que la zone sud qui enregistre en moyenne près de 100 mm de précipitations en plus chaque année (figure 8.1.a). Même si le gradient des températures moyennes est, a priori, d'orientation est-ouest, le relief exerce également une certaine influence sur ces températures puisque ces dernières sont en moyenne 1.5 °C plus élevées au nord de cette limite physique (figure 8.1.b). Ainsi, le calcul des normales climatiques sur ces deux zones permet de justifier l'utilisation de ce seuil physique à 200 m/NMM car il marque une réelle distinction entre deux zones aux normales climatiques distinctes (figure 8.1). Ce seuil de 200 m d'altitude sera par conséquent utilisé comme limite pour différencier les divers contextes climatiques de la région d'étude. À partir des neuf bassins versants initiaux, l'utilisation de cette limite permet de séparer en deux secteurs les quatre bassins versants suivants : Yamaska, Saint-François, Nicolet et Bécancour (carte A.4.11).

Similairement, une autre limite, cette fois-ci en lien avec les précipitations, a été utilisée pour séparer la portion sud du bassin versant (BV) de la rivière Saint-François couvrant le COGESAF (carte A.4.11). En effet, comme la partie sud de la rivière Saint-François présente des normales climatiques distinctes entre l'est et l'ouest, il a donc été décidé d'utiliser un seuil à 1 150 mm/an dans le but de différencier ces deux portions. L'utilisation de ce deuxième seuil est également justifiée par l'analyse des normales climatiques entre ces deux zones (figure 8.2). En effet, à l'ouest du bassin versant de la rivière Saint-François, les précipitations sont en moyenne de l'ordre de 1 128 mm/an tandis que l'est du bassin versant est plus humide avec 1 190 mm/an soit 62 mm/an de pluie en plus chaque année (figure 8.2.a), ce qui peut notamment s'expliquer par la présence de plus de reliefs sur la portion est du bassin où l'altitude est plus importante (407 m à l'est contre 277 m à l'ouest). De même, l'est du bassin affiche des températures moyennes avoisinant les 4.3 °C contre 5.3 °C à l'ouest (figure 8.2.b), ce qui reflète toujours la présence des reliefs où les températures sont généralement plus fraîches.

L'ajout de cette deuxième limite permet de séparer le bassin versant de la rivière Saint-François en trois zones : nord, est et ouest. En appliquant ces deux limites, la région d'étude est alors temporairement divisée en 14 secteurs (carte A.4.11). Toutefois, certains d'entre eux présentent des situations géographiques et des normales climatiques similaires à leurs voisins. Afin de proposer un nombre de secteurs hydroclimatiques restreints et ayant des superficies suffisantes, il a été décidé de combiner les secteurs suivants : Nicolet Nord avec Saint-François Nord et Yamaska Sud avec la Baie Mississquoi. Finalement, seuls quatre ZGIEBV n'ont pas été séparées, à savoir : Chaudière, Richelieu, du Chêne et Châteauguay. Le fait de ne pas diviser ces quatre bassins versants s'explique par l'absence de contrastes de précipitations ou de températures sur ces territoires. Au total, ce sont donc 12 secteurs hydroclimatiques qui ont été définis sur le sud du Québec (carte A.4.12 et carte A.4.13).

Les procédures mises en œuvre pour séparer les différents secteurs hydroclimatiques avec les deux limites sont expliquées en annexe 5.

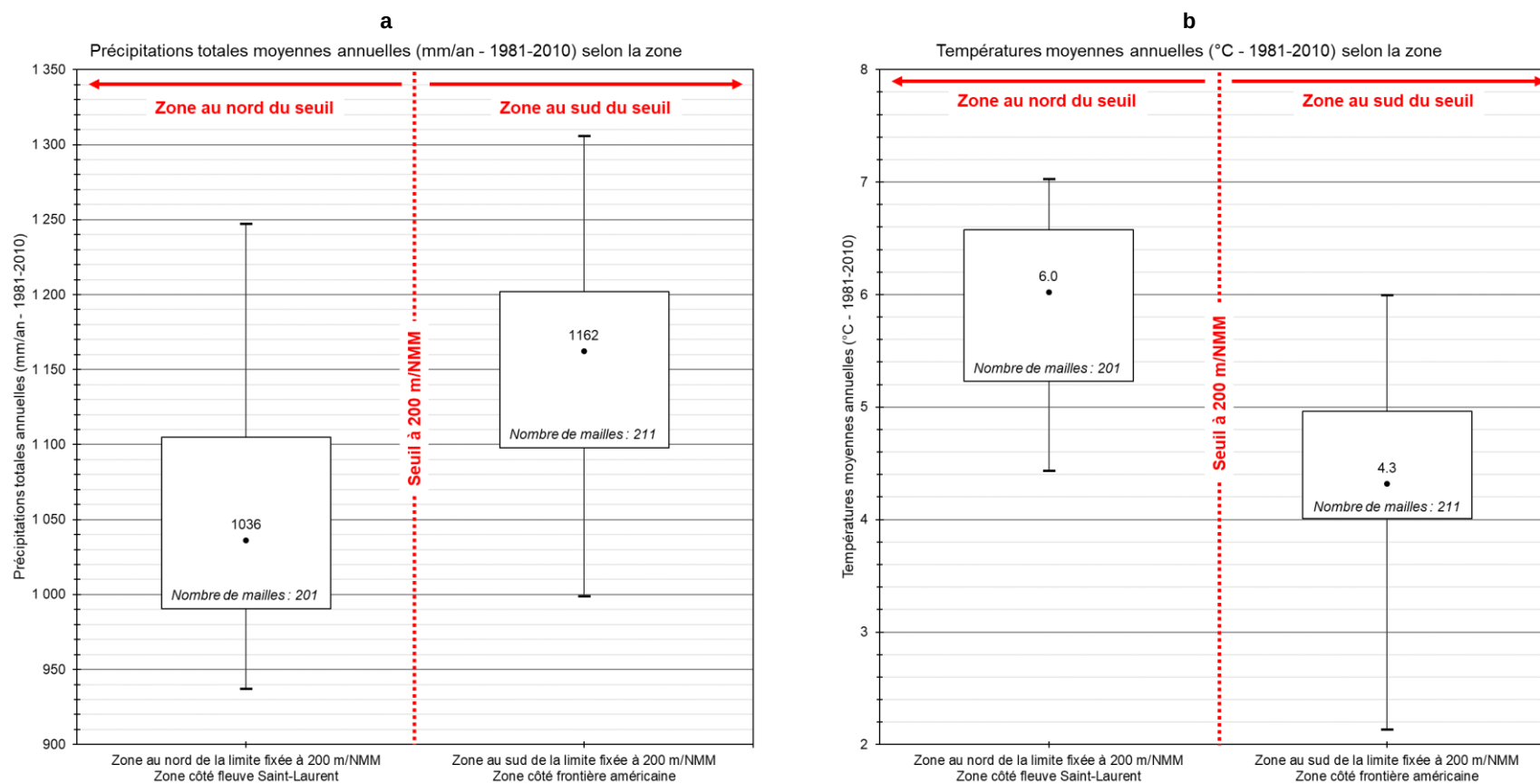


Figure 8.1 : Normales climatiques (1981-2010) selon la zone (seuil fixé à 200 m/NMM) : (a) précipitations totales moyennes annuelles et (b) températures moyennes annuelles

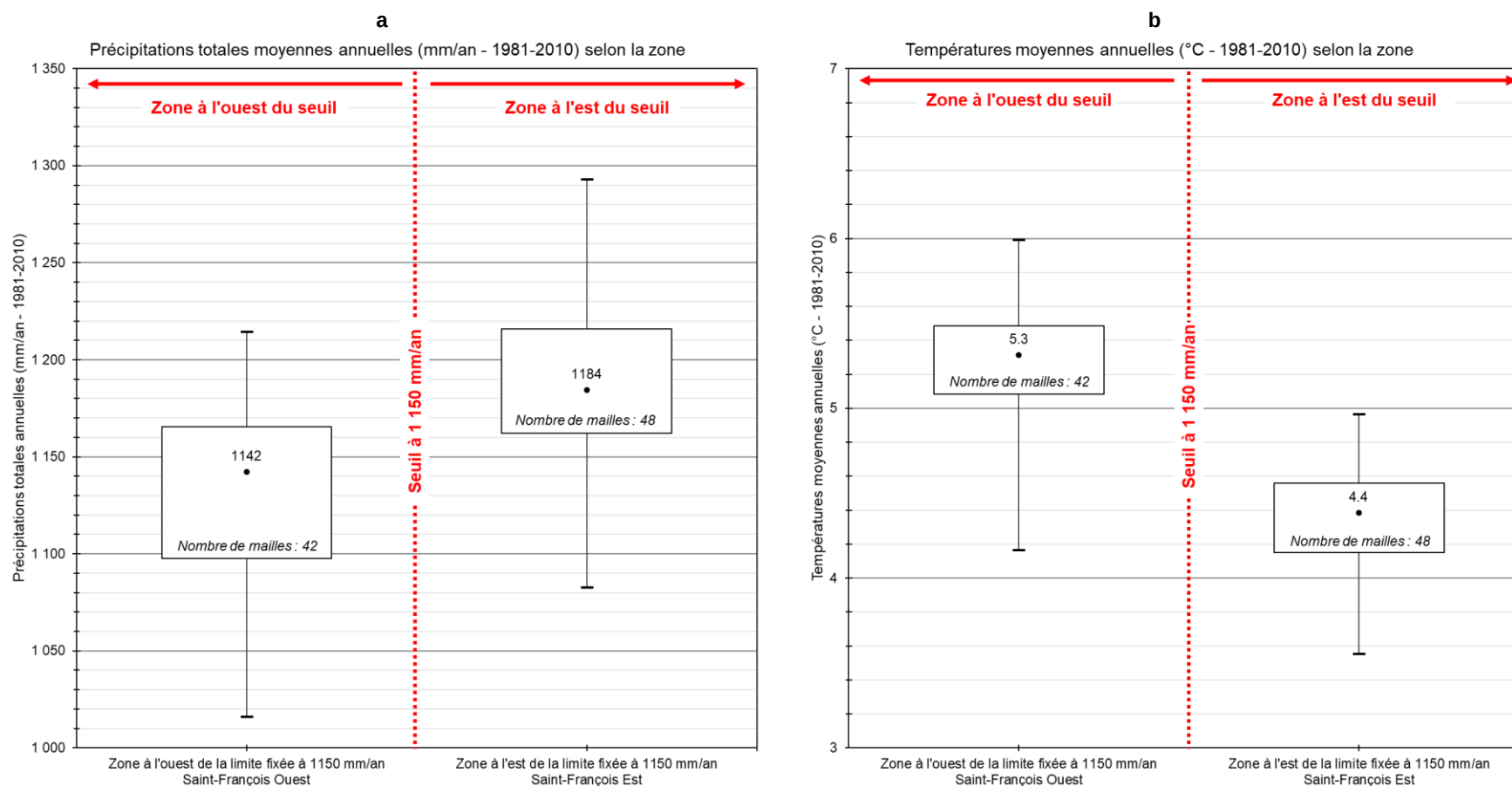


Figure 8.2 : Normales climatiques (1981-2010) selon la zone (seuil fixé à 1 150 mm/an) : (a) précipitations totales moyennes annuelles et (b) températures moyennes annuelles

8.1.5 Caractérisation des secteurs hydroclimatiques

Les 12 secteurs hydroclimatiques définis possèdent des caractéristiques physiographiques et surtout climatiques distinctes. Puisque la localisation des secteurs est en étroite relation avec les données climatiques, il est alors possible de les classer en plusieurs groupes selon leur situation par rapport aux normales climatiques estimées pour l'ensemble du sud du Québec (figure 8.3 et cartes A.4.14, A.4.15 et A.4.16). À noter que le territoire d'étude a les caractéristiques globales suivantes : (1) une élévation moyenne de 221 m/NMM pour un maximum de 1 178 m au sud dans les Appalaches et des altitudes minimales au nord en se rapprochant du fleuve Saint-Laurent, (2) des précipitations totales normalement comprises entre 1 032 (25^e percentile) et 1 172 mm/an (75^e percentile) et en moyenne de 1 104 mm/an et, finalement, (3) une température moyenne de 5.1 °C généralement comprise entre 4.3 (25^e percentile) et 6.0 °C (75^e percentile). Les contextes hydroclimatiques peuvent être ainsi rassemblés en divers groupes :

- Groupe 1 (en rouge sur la figure 8.3) : il correspond aux quelques bassins ou aux portions avales des bassins localisés à proximité du fleuve Saint-Laurent, soit au nord de la limite fixée à 200 m d'altitude, et les plus à l'ouest ; en l'occurrence : (1) les portions avales des BV des rivières Saint-François et Nicolet (Nicolet Nord & Saint-François Nord), (2) la portion aval du BV de la rivière Yamaska (Yamaska Nord), (3) le BV de la rivière Richelieu (Richelieu) et les BV de la zone Châteauguay (Châteauguay). Ces quatre secteurs hydroclimatiques sont caractérisés par (1) des altitudes moyennes plutôt basses, comprises entre 34 et 101 m/NMM, (2) des précipitations assez faibles, typiquement comprises entre 986 (25^e percentile) et 1 067 mm/an (75^e percentile), en moyenne égales à 1 033 mm/an, et (3) des températures élevées normalement comprises entre 5.9 °C (25^e percentile) et 6.6 °C (75^e percentile) pour une moyenne de 6.2 °C ;
- Groupe 2 (en vert sur la figure 8.3) : les bassins ou portions de bassins retrouvés ici correspondent aux régions situées au sud-ouest de la limite à 200 m/NMM. Cela inclut (1) la partie ouest de l'amont du BV de la rivière Saint-François (Saint-François Ouest) et (2) la portion amont du BV de la rivière Yamaska associée à la portion de la Baie-Missisquoi située côté canadien (Yamaska Sud & Baie Missisquoi). Ces deux secteurs hydroclimatiques sont définies par (1) des élévations moyennes plutôt importantes, comprises entre 225 et 277 m d'altitude, (2) des précipitations totales plus élevées, habituellement comprises entre 1 107 (25^e percentile) et 1 184 mm/an (75^e percentile), de l'ordre de 1 149 mm/an en moyenne, et (3) des températures plutôt élevées généralement comprises entre 5.2 °C (25^e percentile) et 5.7 °C (75^e percentile) pour une moyenne de 5.4 °C ;
- Groupe 3 (en bleu sur la figure 8.3) : dans ce groupe sont regroupés plusieurs portions de bassins localisées au sud-est du seuil fixé à 200 m/NMM où les reliefs sont les plus importants au sud du Québec, à savoir : (1) la partie est de l'amont du BV de la rivière Saint-François (Saint-François Est), (2) la portion amont du BV de la rivière Nicolet (Nicolet Sud) et (3) la portion amont du BV de la rivière Bécancour (Bécancour Sud). Ces trois secteurs hydroclimatiques sont marqués par (1) des altitudes moyennes assez élevées, comprises entre 307 et 407 m/NMM, (2) des précipitations totales importantes (moyenne à 1 192 mm/an) généralement comprises entre 1 161 (25^e percentile) et 1 231 mm/an (75^e percentile), et (3) des températures moyennes assez basses (4.3 °C) typiquement comprises entre 4.1 °C (25^e percentile) et 4.6 °C (75^e percentile) ;
- Groupe 4 (en violet sur la figure 8.3) : une unique région hydrographique appartient à ce groupe, soit la portion aval de la rivière Bécancour (Bécancour Nord). Ce contexte hydroclimatique est localisé à proximité du fleuve Saint-Laurent et sa limite sud correspond au seuil fixé à 200 m d'élévation. Il est caractérisé par (1) des altitudes plutôt basses (moyenne de 56 m/NMM pour un maximum à 232 m/NMM), (2) des précipitations plutôt faibles, habituellement comprises entre 1 006 (25^e percentile) et 1 091 mm/an (75^e percentile), pour une moyenne de 1 052 mm/an, et (3) des températures également peu importantes (4.9 °C en moyenne) comprises entre 4.7 °C (25^e percentile) et 5.0 °C (75^e percentile) ;

- Du Chêne (encart bleu sur la figure 8.3) : ce secteur hydroclimatique inclut l'ensemble du bassin versant de la rivière du Chêne, dont la ligne de partage des eaux amont correspond quasiment au seuil de 200 m d'altitude. Ce petit bassin (1 175 km²) fait ici figure d'exception car en se fiant uniquement à sa position géographique, il aurait normalement été classé avec le groupe 4 qui inclut les secteurs hydroclimatiques au nord-est du territoire d'étude. Toutefois, bien que marqué par des températures plutôt faibles (4.6 °C en moyenne), le BV de la rivière du Chêne est aussi caractérisé par des précipitations importantes avoisinant les 1 140 mm/an en moyenne ;
- Chaudière (encadré en bleu sur la figure 8.3) : ce secteur correspond au bassin versant de la rivière Chaudière qui s'étend du fleuve Saint-Laurent à la frontière américaine sur une surface de 6 711 km². Il n'a pas été possible de distinguer des gradients importants entre l'amont et l'aval du bassin que ce soit pour les précipitations (1 111 mm/an en moyenne) ou les températures (moyenne de 3.9 °C), c'est pourquoi ce BV n'a pas été scindé en plusieurs secteurs hydroclimatiques.

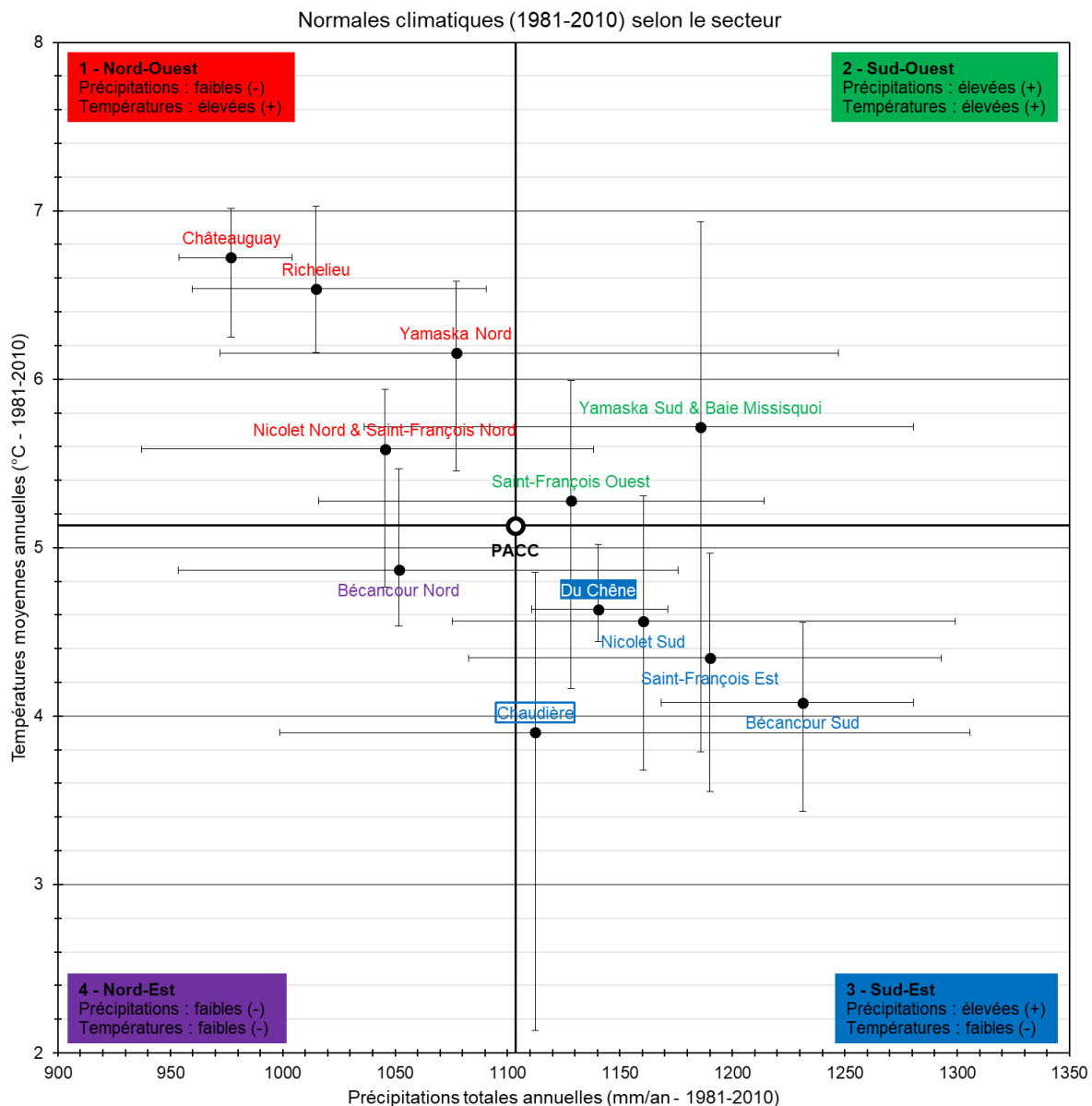


Figure 8.3 : Statistiques descriptives (minimum, maximum et moyenne) des normales climatiques (1981-2010) des différents secteurs hydroclimatiques par rapport à l'ensemble du sud du Québec (PACC)

8.2 Mise en forme des fiches descriptives de chaque secteur hydroclimatique

Dans le but de synthétiser les informations caractérisant chaque secteur hydroclimatique, deux documents ont été élaborés : une fiche informative au format *Lettre* (figure 8.4) accompagnée d'une planche cartographique au format *Tabloïd* (figure 8.5) respectivement disponibles dans les annexes 6 et 7. Leur formatage se veut simple et concis afin d'offrir les données nécessaires à la production et l'analyse de l'indicateur climatique. Pour aller dans ce sens, la planche cartographique reprend, dans les grandes lignes, le format utilisé dans le PACC de l'INRS (Gosselin et al., 2019) et également celui utilisé pour l'indicateur de stress sur l'eau souterraine présenté dans le rapport de phase 1 du présent projet (Domaine et al., 2020).

La fiche informative présentée sur la figure 8.4 prend pour exemple le secteur hydroclimatique #4 (Nicolet Nord & Saint-François Nord). Cette dernière est composée de plusieurs encarts : (1) identification du secteur hydroclimatique, aire totale du secteur et surface rapportée par rapport à l'ensemble du sud du Québec puis nombre de mailles de la grille Info-climat utilisées pour définir les normales climatiques, (2) nombre de stations actives du suivi des niveaux de nappe (RSESQ) et de la météo (Environnement Canada) ainsi que quelques statistiques sur le relief, (3) les statistiques descriptives des normales climatiques calculées grâce à la grille Info-climat pour les précipitations totales et les températures sur une base annuelle, (4) un graphique présentant les précipitations totales et les températures moyennes sur une base mensuelle, (5) deux graphiques indiquant l'écart mensuel moyen des normales climatiques (précipitations totales et températures) entre le secteur concerné (ici, le secteur #4) et la totalité du territoire d'étude (sud du Québec), et (6) une description sommaire des caractéristiques du secteur hydroclimatique. Cette fiche sera agrémentée dans le cadre du projet de bulletin sur l'état des nappes mené prochainement avec le MELCC.

À cette fiche est associée une planche cartographique composée de quatre cartes (figure 8.5) visant à offrir un complément visuel à la fiche informative. De la même façon que la fiche, la planche est aussi structurée en encarts : (1) le titre et le secteur d'étude (en l'occurrence le Sud du Québec via le PACC), (2) la carte des précipitations totales annuelles moyennes entre 1981 et 2010, (3) la carte des températures annuelles moyennes entre 1981 et 2010, (4) la localisation des stations météorologiques actives d'Environnement Canada, (5) l'emplacement des puits d'observation du RSESQ, (6) la légende des quatre cartes où les données ponctuelles (stations de suivi) sont classées selon le nombre d'années de suivi, (7) l'échelle de la carte au 1 : 2 200 000 et des précisions sur les coordonnées géographiques, (8) le secteur ciblé (ici, le secteur #4 : Nicolet Nord & Saint-François Nord), et (9) quelques statistiques descriptives du secteur hydroclimatique reprises de la fiche informative.

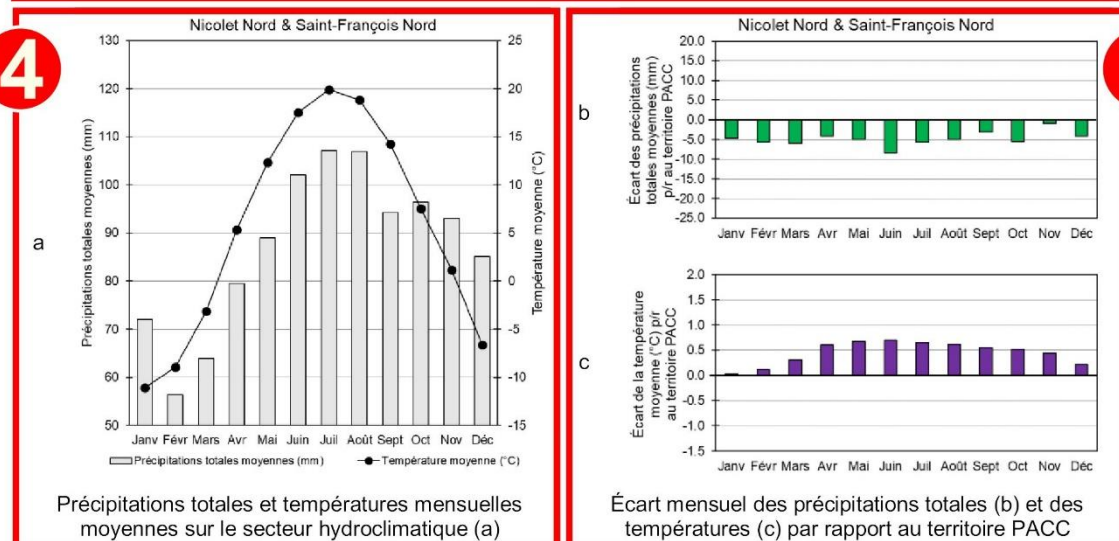
Comme dans le cas de la production des cartes de l'indicateur usage/recharge présenté dans le rapport de phase 1 (Domaine et al., 2020), le secteur hydroclimatique présenté est indiqué automatiquement par un polygone rose afin de pouvoir rapidement cibler la zone visée sur les diverses cartes de la planche cartographique (figure 8.5). De plus, les informations affichées dans les encarts « 8 » et « 9 » sont également mises à jour de façon automatique afin de correspondre au territoire sélectionné. Cela est rendu possible et grandement facilité en utilisant l'outil de *création de pages dynamiques* d'ArcGIS.

La définition de ces contextes hydroclimatiques se veut un portrait des conditions climatiques normalement rencontrées sur chacun des secteurs pour le sud du Québec. Ainsi, l'élaboration de ces deux documents et les fichiers Excel associés serviront de base à la production d'un indicateur climatique pour chaque secteur. Par la suite, il sera alors possible de sélectionner un puits du RSESQ typique reflétant les variations climatiques observées pour chaque secteur. Le choix du puits d'observation à rattacher à un secteur donné devra notamment répondre aux critères suivants : (1) être situé en zone de recharge, (2) avoir un suivi historique relativement long pour les puits du secteur, (3) être toujours actif et (4) ne pas être influencé par un ou plusieurs pompes à proximité. Cette sélection était l'un des objectifs du projet PACC de l'INRS qui vient d'être finalisé (Gosselin et al., 2021) et dont le travail se poursuivra avec le projet de bulletin d'état des nappes. Quand un puits de suivi sera associé à un secteur hydroclimatique, il pourra alors servir de point de référence pour le suivi de tendances climatiques afin d'anticiper un éventuel déclin du niveau de nappe ; information utile à la gestion des prélèvements à une échelle locale.

ID	Secteur hydroclimatique	Aire (km ² % p/r au PACC)	Mailles de la grille Info-Climat
4	Nicolet Nord & Saint-François Nord	3111 (8.7 %)	39

Stations de suivi	Nombre de stations actives	Altitude (m/MMM)
Puits d'observation du RSESQ	7	Min Max Moy
Stations météorologiques	6	0 371 101

Normales climatiques de 1981 à 2010	Min	Q1	Méd	Q3	Max	Moy
Précipitations totales annuelles (mm/an)	937	1000	1061	1084	1138	1046
Températures moyennes annuelles (°C)	4.8	5.4	5.6	5.8	5.9	5.6



Description du secteur hydroclimatique

Le secteur hydroclimatique #4 (Nicolet Nord & Saint-François Nord) combine les portions aval des bassins versants des rivières Nicolet (Nicolet Nord) et Saint-François (Saint-François Nord) et inclut les villes de taille importante de Drummondville et de Victoriaville. Il s'étend sur un territoire couvrant une superficie de 3 111 km² allant du fleuve Saint-Laurent au nord aux montagnes des Smith au sud et à la ville de Victoriaville à l'est. Comme il s'agit d'un secteur incluant l'aval de deux bassins versants, son altitude moyenne est plutôt basse (101 m/MMM) et la grande majorité de cette zone est située sous les 200 m/MMM avec seulement quelques reliefs à la limite amont atteignant les 371 m/MMM au maximum (montagnes des Smith). Ce secteur est caractérisé par des précipitations totales moyennes faibles (1 046 mm/an) et les zones les plus sèches (< 1 050 mm/an) se retrouvent à l'aval, soit au nord d'une limite allant de la ville de Drummondville et celle de Victoriaville (carte 1). La vaste majorité de cette région présente des températures plutôt élevées (> 5.5 °C) avec une moyenne de 5.6 °C et un gradient positif peu marqué d'est en ouest (carte 2). Les températures les plus faibles (< 5.0 °C) sont quant à elles localisées sur un secteur de taille modeste à l'est de la ville de Victoriaville. En se focalisant sur les variations mensuelles des normales climatiques (figure a), la pluviométrie est plus importante (> 102 mm/mois) durant la période estivale, soit pendant les mois de juin, juillet et août. Les précipitations totales les plus faibles (< 80 mm/mois) sont enregistrées entre les mois de janvier et avril et plus spécifiquement en janvier, février et mars (< 72 mm/mois). Les températures les plus élevées (> 17.5 °C) sont typiques des mois de juin, juillet et août tandis que les plus basses (< - 6.6 °C) sont constatées durant l'hiver, et plus particulièrement entre décembre et février. Les précipitations totales sont, tout au long de l'année, inférieures à ce qui est typiquement observé pour le sud du Québec (figure b) et ce, plus spécifiquement pour les mois de février, mars, juin, juillet et octobre où l'écart est le plus important (< - 5.0 mm). Quant aux températures moyennes mensuelles (figure c), elles sont toujours au-dessus de ce qui a été calculé pour le Québec au sud du fleuve Saint-Laurent et ce, surtout entre les mois d'avril et octobre où l'écart est le plus significatif (> + 0.5 °C).

Figure 8.4 : Fiche descriptive formatée pour visualiser les informations relatives aux secteurs hydroclimatiques (1/2) – Cas particulier du secteur Nicolet Nord & Saint-François Nord

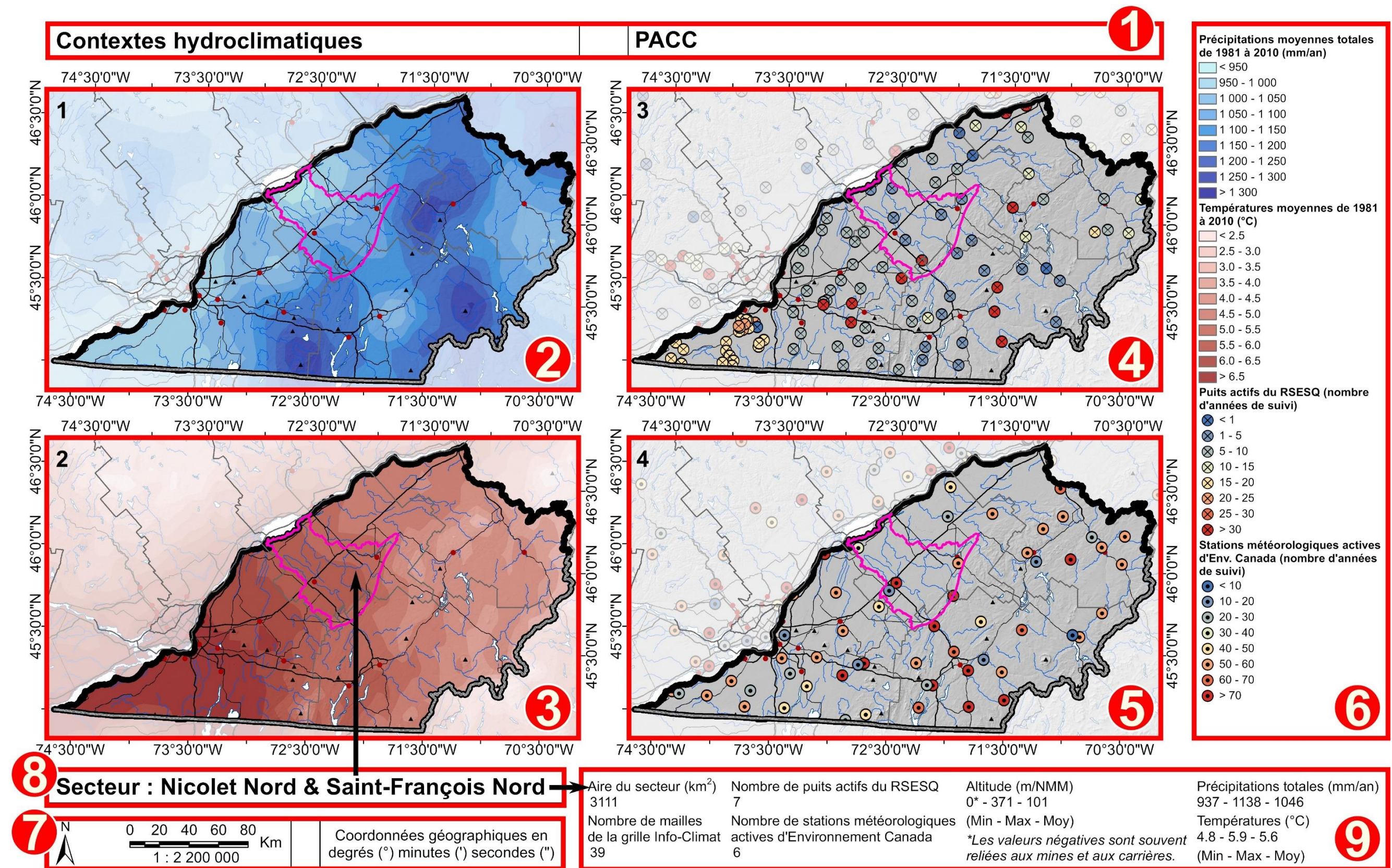


Figure 8.5 : Planche cartographique formatée pour visualiser les informations relatives aux secteurs hydroclimatiques (2/2) – Cas particulier du secteur Nicolet Nord & Saint-François Nord

8.3 Description des divers secteurs hydroclimatiques identifiés

Chaque secteur hydroclimatique identifié dans la section 8.1 pour le sud du Québec possède ses propres caractéristiques physiographiques (tableau 8.3) reliées essentiellement à l'existence ou l'absence de relief et à la proximité ou l'éloignement du fleuve Saint-Laurent. Ces caractéristiques physiographiques influencent grandement les normales climatiques calculées sur chaque secteur entre 1981 et 2010 grâce à la grille Info-climat (tableau 8.4). La grande variabilité des précipitations totales (figure 8.6.a) et des températures (figure 8.6.b) sur la région du PACC prouve l'utilité de scinder le territoire en plusieurs zones.

En effet, le sud du Québec est caractérisé par des reliefs importants pouvant atteindre 1 178 m/NMM alors que le fleuve Saint-Laurent marque les zones de plus basse altitude proche de zéro (tableau 8.3). La présence d'élévations négatives est souvent le reflet d'une intervention humaine reliée à l'existence de mines à ciel ouvert ou de carrières de granulats. À ces variations topographiques est donc associée une variation importante des normales climatiques sur le territoire du PACC puisque les précipitations totales varient de 937 à 1 306 mm/an et les températures moyennes annuelles de 2.1 à 7.0 °C (tableau 8.4).

Plus localement, les secteurs proches du fleuve vers le nord-ouest, soient ceux à basse altitude (< 200 m/NMM) correspondant pour l'essentiel à la plate-forme du Saint-Laurent, sont généralement les plus secs (figure 8.6.a). À l'inverse, en direction du sud-est en entrant dans le domaine appalachien, l'altitude augmente et les reliefs deviennent de plus en plus marqués. Ainsi, les secteurs de hauts reliefs (> 200 m/NMM) sont souvent les plus humides. La présence de ces reliefs au sud-est du territoire d'étude et l'existence du fleuve Saint-Laurent au nord viennent également influencer la distribution des températures (figure 8.6.b). En effet, les secteurs possédant de hauts reliefs, généralement ceux situés dans les Appalaches au sud-est de la zone PACC, sont ceux avec les températures les plus fraîches tandis que les secteurs proches du fleuve, au nord, sont habituellement plus doux. Ainsi, les secteurs avec les températures les plus chaudes sont ceux combinant la proximité du fleuve et l'absence de reliefs importants.

Afin de compléter la définition de ces secteurs hydroclimatiques, les fiches informatives décrites dans la section 8.2 offrent une description complète des caractéristiques typiques de chaque secteur : physiographie, précipitations et températures (annexe 6). Une comparaison est faite entre le secteur décrit et l'ensemble du sud du Québec (PACC) en s'appuyant sur les graphiques de l'encart 5 de la figure 8.4. Un écart de 5 mm de précipitations mensuelles par rapport au territoire du PACC peut être qualifié de significatif car l'erreur moyenne de la grille est proche de 0.1 mm (Bergeron, 2017). Il serait intéressant de vérifier si ces différences de précipitations entre les secteurs hydroclimatiques se traduisent par une variation de recharge pouvant être influencée par l'évapotranspiration (contrôlée par les températures) et par les conditions de confinement.

Ces travaux donnent un portrait adapté aux problématiques régionales et offrent une base de travail pour la définition de l'indicateur climatique présenté dans le rapport de phase 1 (Domaine et al., 2020). Les données reliées aux stations de suivi pourront alors être associées à chaque secteur hydroclimatique identifié. Le tableau 8.3 recense le nombre de stations météorologiques actives localisées au sein de chaque secteur hydroclimatique. Dans un premier temps, seules les stations d'Environnement Canada ont été indiquées. Les stations météorologiques sont également indiquées sur les planches cartographiques des 12 secteurs (annexe 7). Afin d'offrir une aide à la prise de décision, la carte 4 de la planche cartographique (figure 8.5) classe ces stations par nombre d'années de suivi. En première approche, chaque secteur hydroclimatique possède au moins une station de suivi de la météo et jusqu'à 10 pour le secteur #1 (Chaudière) ; exception faite du secteur #9 (Du Chêne) sans station de suivi météorologique. Dans un deuxième temps, les stations gérées par le MELCC pourront être utilisées au lieu des stations fédérales ou bien ajoutées à cette base de données pour améliorer la densité du suivi météorologique. De la même façon, le nombre de puits de suivi actifs du RSESQ présents sur chaque secteur hydroclimatique est indiqué dans le tableau 8.3. Ainsi, chaque secteur possède au moins 3 puits de suivi pour un maximum de 35 pour le secteur #12 (Châteauguay). La carte 3 des planches cartographiques jointe à l'annexe 7 indique également le nombre d'années de suivi pour chaque puits d'observation des niveaux de nappe (figure 8.5) afin de choisir le puits ou le groupe de puits le plus représentatif de chaque secteur identifié.

Tableau 8.3 : Caractéristiques physiographiques et stations de suivi des secteurs hydroclimatiques

ID	Nom	Aire		Quantité			Altitude (m/NMM)		
		km ²	%	Mailles ¹	Puits de suivi ²	Stations météorologiques ³	Minimum ⁴	Maximum	Moyenne
1	Chaudière	6 711	18.7	78	8	10	0	1 178	367
2	Saint-François Est	4 240	11.8	48	8	3	197	1 103	407
3	Saint-François Ouest	3 791	10.6	42	8	9	112	836	277
4	Nicolet Nord & Saint-François Nord	3 111	8.7	39	7	6	0	371	101
5	Nicolet Sud	1 517	4.2	18	3	1	-171	688	307
6	Richelieu	2 868	8.0	34	10	6	-14	398	34
7	Bécancour Nord	2 348	6.5	26	9	3	0	232	86
8	Bécancour Sud	1 491	4.2	17	5	2	-46	685	346
9	Du Chêne	1 175	3.3	15	3	0	-1	256	107
10	Yamaska Nord	3 915	10.9	42	18	6	-2	541	77
11	Yamaska Sud & Baie Missisquoi	2 297	6.4	23	9	3	-14	947	225
12	Châteauguay	2 411	6.7	30	35	7	-56	342	57
0	PACC	35 875	100	412	123	56	-171	1 178	221

1 : les mailles correspondent à celles de la grille Info-climat utilisée pour le calcul des normales climatiques de chaque secteur hydroclimatique ;

2 : les puits de suivi sont ceux du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ) géré par le MELCC ;

3 : les stations météorologiques utilisées ici sont celles dont les données sont mises à disposition librement par Environnement Canada ;

4 : les valeurs négatives s'expliquent notamment par la présence de mines ou de carrières (anomalies liées à un impact humain local).

Tableau 8.4 : Normales climatiques des secteurs hydroclimatiques

ID	Nom	Précipitations totales annuelles (mm/an - 1981-2010)			Températures moyennes annuelles (°C - 1981-2010)		
		Minimum	Maximum	Moyenne	Minimum	Maximum	Moyenne
1	Chaudière	999	1 306	1 112	2.1	4.9	3.9
2	Saint-François Est	1 083	1 293	1 190	3.6	5.0	4.3
3	Saint-François Ouest	1 016	1 214	1 128	4.2	6.0	5.3
4	Nicolet Nord & Saint-François Nord	937	1 138	1 046	4.8	5.9	5.6
5	Nicolet Sud	1 076	1 299	1 160	3.7	5.3	4.6
6	Richelieu	960	1 090	1 015	6.2	7.0	6.5
7	Bécancour Nord	954	1 176	1 052	4.5	5.5	4.9
8	Bécancour Sud	1 168	1 281	1 231	3.4	4.6	4.1
9	Du Chêne	1 111	1 171	1 140	4.4	5.0	4.6
10	Yamaska Nord	972	1 247	1 077	5.5	6.6	6.2
11	Yamaska Sud & Baie Missisquoi	1 036	1 281	1 186	3.8	6.9	5.7
12	Châteauguay	954	1 004	977	6.3	7.0	6.7
0	PACC	937	1306	1104	2.1	7.0	5.1

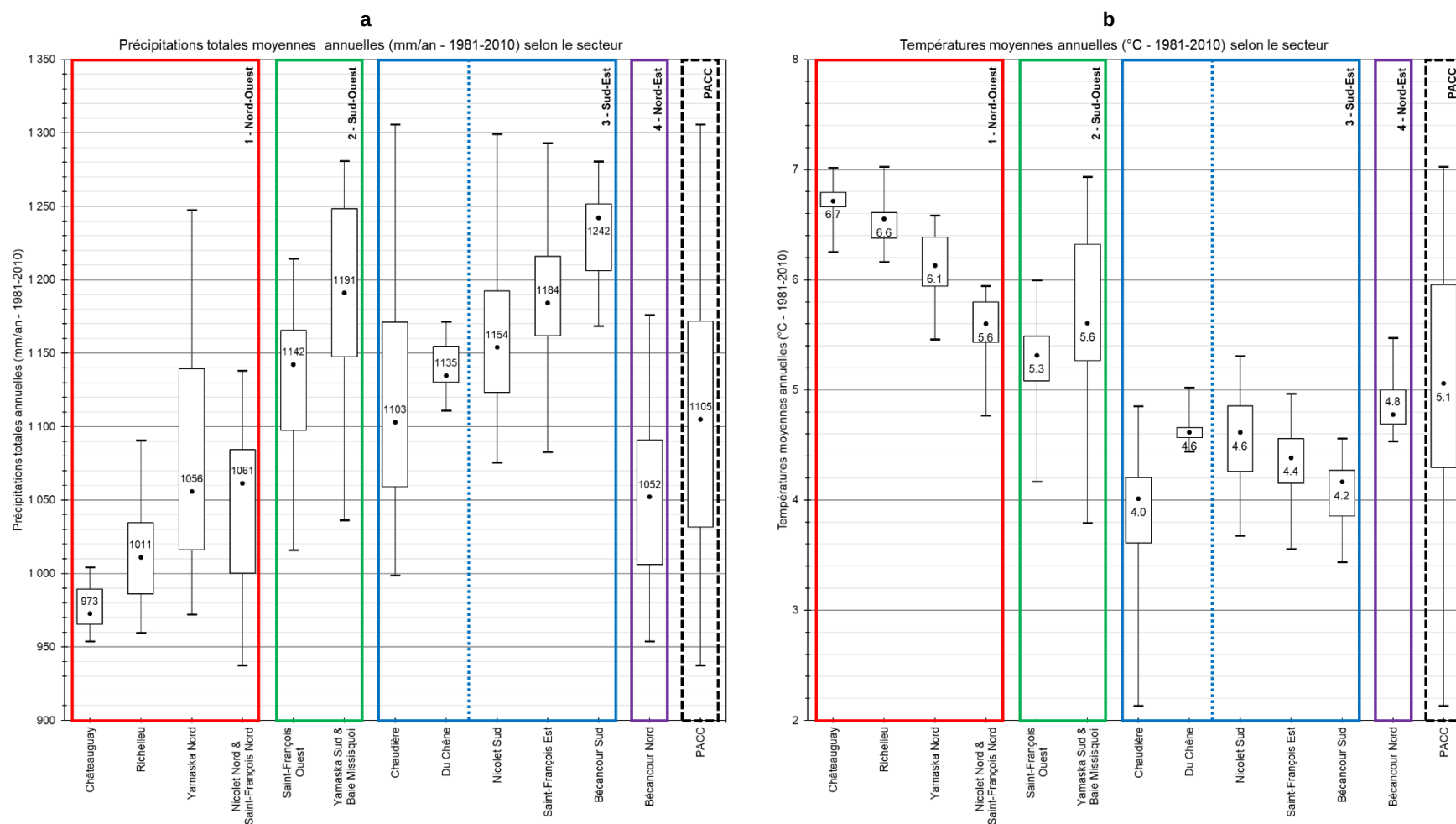


Figure 8.6 : Normales climatiques (1981-2010) selon le secteur hydroclimatique : (a) précipitations totales moyennes annuelles et (b) températures moyennes annuelles

8.4 Avantages et limitations de la procédure de définition des secteurs hydroclimatiques

La procédure de définition des secteurs hydroclimatiques pour le sud de la province est détaillée dans l'annexe 5 et comprend uniquement des manipulations sur ArcGIS ou tableur Excel. Le scindement du territoire du PACC est essentiellement basé sur le postulat suivant : « la limite physiographique située à 200 m/NMM permet de diviser le sud du Québec en deux zones : les secteurs les plus humides sont associés aux zones de reliefs au sud-est du territoire tandis qu'au nord, à proximité du fleuve Saint-Laurent, se trouvent les secteurs avec le moins de précipitations ».

Cette définition, bien que plutôt simple, s'appuie sur de nombreuses données et graphiques (section 8.1) et offre notamment l'avantage de pouvoir être facilement reproductible et adaptable aux autres territoires non-couverts par le PACC (Gaspésie et nord du Saint-Laurent). En effet, seuls deux secteurs hydroclimatiques font figure d'exception : le #9 (Du Chêne) et le #1 (Chaudière) ; exceptions toutefois facilement justifiées (section 8.1.5). Cette classification offre donc une bonne base de travail pour la définition de l'indicateur climatique.

Dans le même ordre d'idée, la présentation de chaque secteur hydroclimatique a été synthétisée sur deux documents : une fiche informative (annexe 6) et une planche cartographique (annexe 7). Ce format de présentation se veut simple et concis offrant alors à l'analyste ou au lecteur un aperçu rapide et simplifié des caractéristiques physiographiques et climatiques du secteur hydroclimatique ciblé. Ainsi, les planches cartographiques reprennent, dans les grandes lignes, le formatage des cartes auparavant produites pour l'indicateur de stress sur les eaux souterraines du rapport de phase 1 (Domaine et al., 2020), mais également celles produites dans le cadre du PACC (Gosselin et al., 2019) afin d'assurer une certaine continuité entre les projets du MELCC.

De plus, comme il s'agit d'un portrait des normales climatiques (précipitations totales et températures) calculées entre 1981 et 2010, une fois complété, ce travail ne devrait pas nécessiter de mise à jour à l'avenir. L'utilisation de la grille d'Info-climat présente plusieurs avantages : (1) les données ponctuelles enregistrées aux stations météorologiques provinciales ont été interpolées sur l'ensemble du Québec assurant ainsi une couverture spatiale uniforme et régulière même si les stations météo sont distribuées de façon irrégulière, (2) les valeurs nulles ont été corrigées pour obtenir une grille spatiale et temporelle avec le moins de lacunes possibles et (3) les données journalières couvrent une période de temps suffisamment lointaine (1961-2017) pour calculer les normales climatiques et suivre les tendances à long terme. La principale limitation de cette grille concerne les données récentes, soient celles à partir de janvier 2018, qui n'ont pas encore été traitées et intégrées. Toutefois, l'association d'une station météo de référence à chaque secteur hydroclimatique devrait permettre de remédier à ce problème pour les données récentes (tableau 8.3). En se basant sur la localisation des stations météo d'Environnement Canada, le secteur hydroclimatique #9 (Du Chêne) ne possède aucune station sur son territoire (tableau 8.3). Une station météo du Réseau de surveillance du climat du Québec (RSCQ) ou une autre située en rive nord du fleuve Saint-Laurent pourront éventuellement être utilisées dans ce cas particulier.

Lorsqu'un puits ou un groupe de puits de référence du RSESQ auront été associés à chaque secteur hydroclimatique dans le cadre du PACC, il sera alors possible de déterminer le déphasage entre les apports verticaux (précipitations) et les fluctuations induites sur les niveaux de nappe comme dans le cas du puits de Pont-Rouge (section 7.2). En complément, l'utilisation de la grille d'Info-climat facilitera l'intégration des données issues de modèles climatiques qui devraient permettre d'anticiper un éventuel déclin dans les niveaux de nappe. De plus, l'utilisation des limites des Zones de gestion intégrée de l'eau par bassins versants (ZGIEBV) dans la définition des 12 secteurs hydroclimatiques devrait faciliter la mise en œuvre des actions de gestion des eaux souterraines sur ces territoires. Ainsi, un portrait de la situation actuelle des nappes par secteur hydroclimatique pourra être alors établi dans le même ordre d'idée que le bulletin de l'état mensuel des nappes produit par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières en France (BRGM, 2020).

8.5 Intégration des secteurs hydroclimatiques pour produire l'indicateur climatique

Tel qu'indiqué dans le rapport intérimaire de la phase 1 du projet (Domaine et al., 2020), la production de l'indicateur climatique vise à évaluer le contrôle des précipitations sur la recharge et les niveaux piézométriques ou encore sur les variables hydrologiques (débit de base ou débit total d'un cours d'eau). Dans ce même rapport, plusieurs recommandations avaient été émises : (1) produire cet indicateur climatique sous la forme de graphiques simples demandant peu d'explications, (2) considérer la période 1981-2010 pour le calcul des normales climatiques et notamment des précipitations afin d'être en accord avec les données du Réseau de surveillance du climat du Québec (RSCQ), (3) se concerter pour utiliser la même source de données météorologiques, soit les stations de suivi provinciales ou la grille Info-climat et, finalement, (4) subdiviser le territoire afin d'obtenir des secteurs aux conditions climatiques distinctes auxquels seront associés un indicateur climatique représentatif.

La définition des secteurs climatiques dans le présent rapport vise à répondre à ce dernier point. Ainsi, comme les secteurs hydroclimatiques possèdent des conditions climatiques typiques (section 8.3), il est alors possible de produire un indicateur climatique pour chacun des 12 secteurs précédemment définis. Cet indicateur pourrait ressembler à ce qui a déjà été entrepris dans le rapport intérimaire de la phase 1 (Domaine et al., 2020), c'est-à-dire un indicateur simple et normalisé sous forme graphique permettant de comparer les précipitations aux niveaux piézométriques enregistrés dans certains puits du RSESQ, voire même aux débits de certains cours d'eau. Ce travail préliminaire s'était avéré prometteur pour le puits de Pont-Rouge (05080001) dont les fluctuations du niveau piézométrique montraient une corrélation évidente avec les épisodes de précipitations d'une station météorologique proche avec un déphasage de l'ordre d'une année. La mise en évidence de ce délai de réaction de la nappe peut permettre aux acteurs de l'eau, tels que les municipalités, d'anticiper des épisodes de déclin du niveau de la nappe faisant suite à plusieurs années de sécheresse relative et de mettre en œuvre les procédures de gestion adéquates.

Afin de proposer un indicateur plus abouti et permettant également de spatialiser l'information par secteur hydroclimatique, l'approche utilisée dans le rapport intérimaire de la phase 1 (Domaine et al., 2020) pourrait être adaptée afin de se rapprocher de ce qui est déjà fait dans d'autres pays comme la France ou les États-Unis. En effet, ces deux pays utilisent l'indicateur pluviométrique standardisé (*Standardized Precipitation Index, SPI*) pour évaluer si le cumul des précipitations sur une zone donnée est déficitaire ou excédentaire par rapport à ce qui est habituellement enregistré à la même période. Aux États-Unis, un programme de suivi des sécheresses (*National Integrated Drought Information System, NIDIS*), mis en œuvre en 2006, permet de suivre l'évolution du SPI (NIDIS, 2020). En France, c'est le site Info Sécheresse (ImaGeau, 2020a) qui met à jour périodiquement des cartes du SPI déterminé sur plusieurs périodes de temps (1, 3 et 6 mois) et basé sur les limites départementales. Le SPI calculé sur 6 mois (180 jours) pourrait ainsi fournir une indication sur un déclin probable des niveaux de nappe et des débits des cours d'eau (OMM, 2012). La production de cet indicateur pluviométrique standardisé est d'ailleurs basée sur le calcul de l'indice de précipitations normalisé suggéré par l'Organisation météorologique mondiale (OMM, 2012) et initialement mise au point par McKee et al. (1993). Ce calcul permet alors de quantifier le déficit ou l'excès de précipitations sur plusieurs échelles de temps, généralement 3, 6, 12, 24 et 48 mois. Le but final est ensuite de comparer les valeurs pour une période donnée à ce qui est normalement enregistré sur cette même période pour définir si les conditions sont relativement sèches ou humides, tel que résumé au tableau 8.5.

Tableau 8.5 : Valeurs de l'indice SPI

SPI	Catégorie
> 2.0	Extrêmement humide
1.5 à 1.99	Très humide
1.0 à 1.49	Modérément humide
-0.99 à 0.99	Proche de la normale
-1.0 à -1.49	Modérément sec
-1.5 à -1.99	Très sec
< -2.0	Extrêmement sec

Dans le cadre du présent projet, il est envisagé de produire cet indicateur dans chacun des 12 secteurs hydroclimatiques définis précédemment. L'utilisation des secteurs hydroclimatiques permettrait ainsi de spatialiser l'information pour obtenir des cartes similaires au suivi réalisé en France et aux États-Unis. En effet, la production du SPI nécessite uniquement des données de précipitations et cet indicateur se révèle être efficace pour des conditions climatiques variées (OMM, 2012). L'Organisation météorologique mondiale suggère d'avoir des données de précipitations mensuelles complètes couvrant une période minimale de 20 à 30 ans. Le *National Drought Mitigation Center* de l'Université du Nebraska met à disposition un exécutable permettant de produire ce SPI (NDMC, 2020). À titre d'exemple, le SPI sur 6 mois a été calculé sur une maille de la grille Info-climat choisie arbitrairement (figure 8.7).

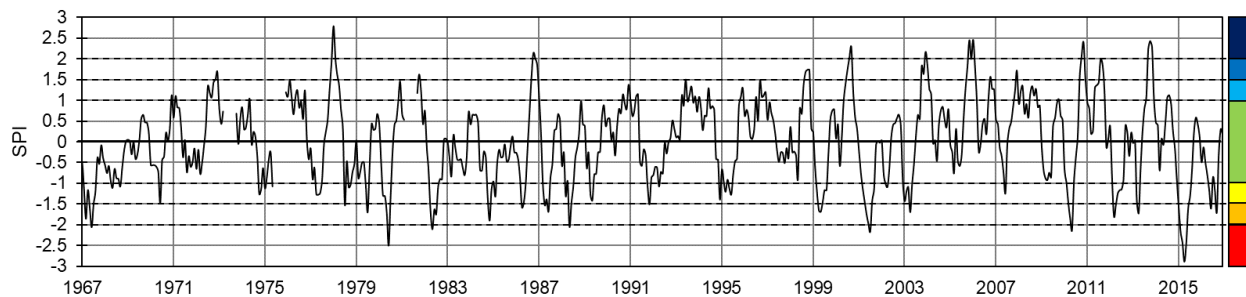


Figure 8.7 : Exemple de SPI sur 6 mois calculé sur une maille arbitraire de la grille Info-climat

Puisque la grille Info-climat ne fournit pas de données récentes (2017 en date de la rédaction de ce rapport), il est envisagé de les compléter avec des données issues de stations météorologiques de référence. Toutefois, il serait intéressant d'avoir accès à des données plus récentes de la grille climatique du MELCC. Cela assurerait de produire un indicateur climatique (1) homogène puisque basé sur des données d'une grille uniforme sur tout le territoire, (2) fiable car les données d'entrée de la grille Info-climat sont contrôlées en amont (Bergeron, 2017) et (3) mis à jour de façon régulière avec les données récentes de l'année $n-1$. Une amélioration potentielle du SPI pourrait être l'intégration des données de température moyenne et de la latitude afin de tenir compte de l'évapotranspiration, tel que suggéré par Vicente-Serrano et al. (2010), et obtenir un indice de précipitations et d'évapotranspiration normalisé (*Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*, *SPEI*). De même, des éléments restent à définir, notamment concernant le choix des données météorologiques à considérer pour son élaboration : (1) utiliser une maille de la grille Info-climat située au centre du secteur hydroclimatique visé, (2) prendre une maille de la grille Info-climat dont les statistiques se rapprochent le plus des statistiques moyennes de l'ensemble du secteur hydroclimatique ciblé, (3) intégrer toutes les données de l'ensemble des mailles de la grille Info-climat comprises dans le secteur hydroclimatique concerné, ou (4) sélectionner une maille de la grille Info-climat où il y a un puits du RSESQ avec un hydrogramme en conditions libres et avec une chronique de niveaux d'eau assez longue.

Ce dernier point permettrait de faire le lien avec le projet PACC (Gosselin et al., 2021) qui visait à classer les puits du RSESQ afin de choisir des puits ou des groupes de puits de référence pour suivre les fluctuations des niveaux de nappe. Ces quelques puits, alors associés aux 12 secteurs climatiques, pourraient être utilisés pour produire un autre indicateur visant à déterminer si les niveaux de nappes sont en dessous ou au-dessus des niveaux normalement enregistrés sur une période donnée. L'indicateur piézométrique standardisé (*Standardized Piezometric Level Index*, *SPLI*), développé par le BRGM (Seguin, 2015), est déjà mis en œuvre à l'échelle départementale en France, toujours sur le site Info Sécheresse (ImaGeau, 2020b). Comme le SPI, il implique la mise en œuvre d'arrêtés de restriction d'eau sur le territoire lorsque des déclinés de niveaux d'eau sont enregistrés. Le SPLI présente plusieurs avantages, dont celui de reprendre les principes du mode de calcul du SPI et de caractériser l'état piézométrique des nappes libres sur tout un territoire ayant des comportements variés : nappes à cycles pluriannuels ou avec des tendances à la hausse ou à la baisse (Klinka, 2016). Il vise à quantifier les écarts à la moyenne entre plusieurs puits de suivi de façon homogène (Klinka, 2016). Si cet indicateur est appliqué au Québec, la classification proposée par le BRGM (Seguin et Klinka, 2016) devra sans doute être adaptée aux fluctuations des nappes typiques du Québec.

De façon similaire aux travaux complétés dans le rapport intérimaire de la phase 1 (Domaine et al., 2020) sur les puits d'observation de Pont-Rouge et de Saint-Rémi, le SPLI peut être mis en relation avec les précipitations (SPI) afin de produire un indicateur climatique robuste et standardisé sur tout le sud du Québec. Grâce aux SPI et SPLI, il serait alors possible de déterminer, par corrélation croisée, le délai de réponse (déphasage) entre des périodes pluvieuses et les variations des niveaux d'eau reliées à l'inertie des nappes. Dans le cadre d'un projet similaire à la présente étude, le BRGM a d'ailleurs utilisé ces deux indicateurs afin d'établir un réseau de référence piézométrique en France pour suivre l'effet des changements climatiques sur les eaux souterraines (Vernoux et Seguin, 2013).

8.6 Perspectives liées à la définition des secteurs hydroclimatiques

Les limites des secteurs hydroclimatiques respectent à la fois la variation des conditions climatiques (précipitations), la géomorphologie (topographie) qui contrôle en bonne partie les conditions climatiques ainsi que les limites des grands bassins versants qui sont affectées par les conditions climatiques, que ce soit au niveau de l'écoulement de surface ou de l'écoulement souterrain (notamment par rapport à la recharge). Ainsi définis, les secteurs hydroclimatiques capturent les causes des variations climatiques (topographie) et les limites des bassins hydrologiques sur lesquels ces variations climatiques auront un impact.

Les limites des secteurs hydroclimatiques semblent donc bien adaptées au suivi des variations interannuelles des conditions climatiques, notamment à l'aide de l'indicateur climatique proposé précédemment. Cet indicateur correspond en fait à l'indice des précipitations normalisé (*Standardized Precipitation Index*, SPI) tel que défini par McKee et al. (1993). Les travaux précédents (Domaine et al., 2020) ont montré que cet indicateur climatique peut être mis en relation à la fois avec la variation de conditions hydrologiques de cours d'eau et la variation des niveaux d'eau souterraine suivis par le RSESQ. Cette relation montre le contrôle qu'exercent les précipitations sur le régime hydrologique de surface et souterrain.

Tel que proposé par le BRGM (Seguin, 2015), un indicateur semblable au SPI peut aussi être produit pour représenter les niveaux d'eau souterraine à l'aide d'un indice des niveaux piézométriques normalisé (*Standardized Piezometric Level Index*, SPLI). Le SPLI est équivalent à l'indicateur piézométrique qui avait été mis en relation avec l'indicateur climatique dans le cadre de nos travaux. Si un SPLI était produit à l'intérieur des secteurs hydroclimatiques, il serait ainsi possible de mettre en relation le niveau des nappes et l'intensité des précipitations qui contrôle en grande partie ce niveau.

Les secteurs hydroclimatiques semblent ainsi appropriés pour faire le suivi à la fois des conditions météorologiques et de l'effet des variations de ces conditions sur les débits des cours d'eau et les niveaux des nappes. Pour définir l'état des nappes à l'intérieur des secteurs hydroclimatiques, il sera nécessaire d'identifier des puits du RSESQ qui présentent les caractéristiques requises, soient des conditions libres permettant au puits de refléter la recharge induite par les précipitations. Ainsi, les secteurs hydroclimatiques peuvent aussi servir de base pour la gestion du RSESQ en permettant d'identifier les besoins d'ajout de puits ou la redondance de puits existants du réseau dans un même secteur hydroclimatique.

La définition de secteurs hydroclimatiques permettrait d'exploiter les outils développés dans le cadre des autres projets de l'INRS portant sur le RSESQ, soient le projet PACC (Gosselin et al., 2021) et le projet sur la gestion du RSESQ (SARDES, voir Gosselin et al., 2020). Les résultats de l'évaluation de la recharge réalisée dans le cadre du projet PACC pourraient ainsi servir à la sélection de puits appropriés pour faire le suivi de l'état des nappes dans les différents secteurs hydroclimatiques au sud de la province. L'exploitation des outils développés dans le cadre du projet SARDES (Suivi, analyse et représentation de données d'eaux souterraines) pourrait aussi être faite dans la région du projet PACC afin de faire la démonstration de ces outils et vérifier leur intérêt pour les utilisateurs des données du RSESQ. Enfin, un futur projet pourrait être réalisé dans la région du projet PACC pour développer une approche permettant de définir l'état des nappes et prédire leur évolution à moyen terme (quelques mois) ou en climat futur. Cette définition de l'état des nappes et leur évolution future pourrait servir aux gestionnaires de captages de surface ou souterrains.

9 USAGE INTRAMUNICIPAL DE L'EAU SOUTERRAINE

Suite à l'élaboration de l'indicateur de stress sur l'eau souterraine (usage/recharge), des recommandations avaient été émises (section 6.4) pour améliorer sa représentativité. En effet, cet indicateur offre un premier aperçu des pressions à l'échelle municipale mais présente plusieurs faiblesses : (1) il représente mal le niveau de stress sur l'eau souterraine dans les municipalités de petite taille, (2) il ne permet pas de représenter les divers usages (agricole, résidentiel ou ICI) et donc (3) d'identifier les potentiels conflits d'usage entre les différents préleveurs d'eau souterraine à une échelle plus locale.

C'est dans ce cadre que l'indicateur intramunicipal a été développé pour définir le niveau d'usage à l'intérieur des municipalités. La mise en œuvre de cet indicateur a été faite en Montérégie Est afin d'assurer une certaine cohérence entre les développements du présent rapport. La section 9.1 détaille les diverses étapes d'élaboration de cet indicateur intramunicipal. La démarche est ensuite détaillée dans les sections suivantes, soit (1) le traitement de la base de données des grands préleveurs d'eau (section 9.2), (2) l'élaboration des diverses grilles d'usage, dont la grille finale de l'usage total (section 9.3). Ensuite (3), la production de l'indicateur et sa représentation sont abordés de concert avec la définition de seuils d'usage visant à mettre en relief les zones de stress selon les types d'usage (section 9.4). La section 9.5 aborde finalement les limitations et les apports de la mise en œuvre d'un tel indicateur à l'intérieur des municipalités.

9.1 Démarche de définition de l'indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine

Globalement, les étapes de production de cet indicateur suivent la logique de la figure 9.1, c'est-à-dire :

1. Collecte des données d'entrée reliées à l'usage de l'eau souterraine

Les données d'entrée utiles à la production de l'indicateur comprennent les estimations d'usage de l'eau à l'échelle municipale issues des projets PACES ; en l'occurrence celles extraites de l'annexe 6 du PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013a). Dans le tableur annexé au rapport PACES de l'INRS, les données d'intérêt concernent uniquement les usages de l'eau souterraine et plus spécifiquement les usages suivants : (1) l'usage agricole hors-réseau par municipalité, en distinguant l'usage végétal de l'animal, et obtenu en convertissant les types de production du MAPAQ (2011a) en volumes d'eau à l'aide de chartes ; (2) l'usage résidentiel hors-réseau par municipalité, calculé en croisant les données de recensement, issues du MAMROT (2010) – MAMH maintenant – avec les données du nombre de personnes desservies par les réseaux de distribution disponibles via le MDDEFP (2011) – MELCC actuellement – et une charte de consommation moyenne journalière par habitant et finalement ; (3) l'usage total réseau par municipalité, déterminé selon des règles similaires à l'usage précédent. Cet usage total réseau par municipalité sera utilisé uniquement pour les quelques captages municipaux qui n'ont pas été déclarés comme GPE. Ces derniers sont répertoriés dans la liste des captages d'eau souterraine disponible dans l'annexe 6 du PACES de Montérégie Est (Carrier et al., 2013a) compilée via les réseaux de distribution recensés au Québec (MELCC, 2021b) et grâce aux anciens rapports collectés pendant les projets PACES. Les déclarations des grands préleveurs d'eau, dits « GPE », sont aussi recueillies auprès du MELCC (2021a), notamment pour les années récentes (2015 à 2019).

2. Collecte des données d'entrée nécessaires à la répartition des usages de l'eau souterraine

Les données d'utilisation du territoire du MELCC (2017) sont également utiles pour distribuer les usages agricoles hors-réseau. C'est également le cas des données de recensement des captages individuels disponibles dans la banque de données du SIH (MELCC, 2021c) et nécessaires pour répartir l'usage résidentiel hors-réseau.

3. Traitement de la base de données des GPE

La base de données des GPE a été traitée initialement pour toute la province afin de définir un numéro unique par site de prélèvement et y associer une catégorie d'usage (agricole, ICI et municipal). Dans un deuxième temps, de nombreuses incohérences ont été recensées dans cette base de données : (1) code SCIAN inexact ; (2) localisation des sites erronée ou encore (3) source du prélèvement (eau de surface ou eau souterraine) inadéquate. Un important travail de traitement des GPE a donc été appliqué plus spécifiquement sur la région d'étude, soit la Montérégie Est, afin de retenir uniquement les GPE prélevant les eaux souterraines. Ce travail est décrit à la section 9.2.

4. Ajout des captages municipaux d'importance

Certains captages municipaux, présents dans la liste des captages municipaux extraite de l'annexe 6 du PACES de Montérégie Est (Carrier et al., 2013a), n'apparaissaient pas dans les déclarations des GPE municipaux récents (2015-2019). Il a donc été décidé de les ajouter afin de les considérer comme des points de prélèvement pérennes.

5. Élaboration des grilles d'usage

L'ensemble des usages est réparti sur une grille composée de 144 647 mailles de 250 m qui provient de la grille produite lors de l'élaboration de l'indicateur de stress sur l'eau souterraine (section 4.1). Les usages spatialement distribués à partir de sources de données spatialisées concernent : (1) l'usage agricole total hors-réseau dont l'usage végétal est réparti sur les mailles au droit des surfaces maraîchères, exception faite de certaines municipalités où la carte d'utilisation du territoire ne répertoriait aucun maraîchage (voir section 9.3), et l'usage animal distribué sur les mailles au droit des surfaces fourragères et également ; (2) l'usage résidentiel hors-réseau distribué selon la densité des puits résidentiels. Les autres usages sont également répartis spatialement sur la grille à partir de données ponctuelles (GPE et autres captages municipaux d'importance) : (1) l'usage total réseau par municipalité, combinant les volumes d'eau prélevés par les GPE municipaux et les quelques autres captages municipaux, est réparti sur les mailles situées dans une zone d'influence de 500 m de rayon pour les GPE et de 250 m de rayon pour les autres captages et aussi ; (2) l'usage ICI hors-réseau, provenant des volumes d'eau déclarés par les GPE ICI, est distribué sur mailles localisées dans l'aire d'influence de 500 m de rayon autour de chaque GPE ICI. L'usage agricole hors-réseau est uniquement affiché sur la carte finale de l'indicateur car les volumes déclarés varient beaucoup d'une année sur l'autre et que les puits agricoles ne sont pas systématiquement déclarés.

6. Création de la grille d'usage total finale

La grille finale correspond donc à l'assemblage des quatre grilles d'usage de l'eau souterraine précédemment décrites : (1) usage total réseau, (2) usage agricole hors-réseau, (3) usage ICI hors-réseau et (4) usage résidentiel hors-réseau. Sur cette grille, l'usage est présenté en $\text{m}^3/\text{an}/\text{km}^2$. Sur ces grilles initiales, l'usage est moyenné sur un ensemble de mailles proches (voir section 9.3) afin d'obtenir les grilles individuelles finales dont la grille de l'usage total.

7. Production de l'indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine

Finalement, l'indicateur intramunicipal intègre l'ensemble de ces grilles d'usage en mettant en évidence les prélèvements ponctuels d'importance (section 9.4). Sur cette carte sont notamment ajoutés les GPE agricoles qui n'ont pas été intégrés dans les calculs d'usage. À partir des grilles « lissées », des seuils d'usage peuvent aussi être définis pour identifier les secteurs sous fort stress.

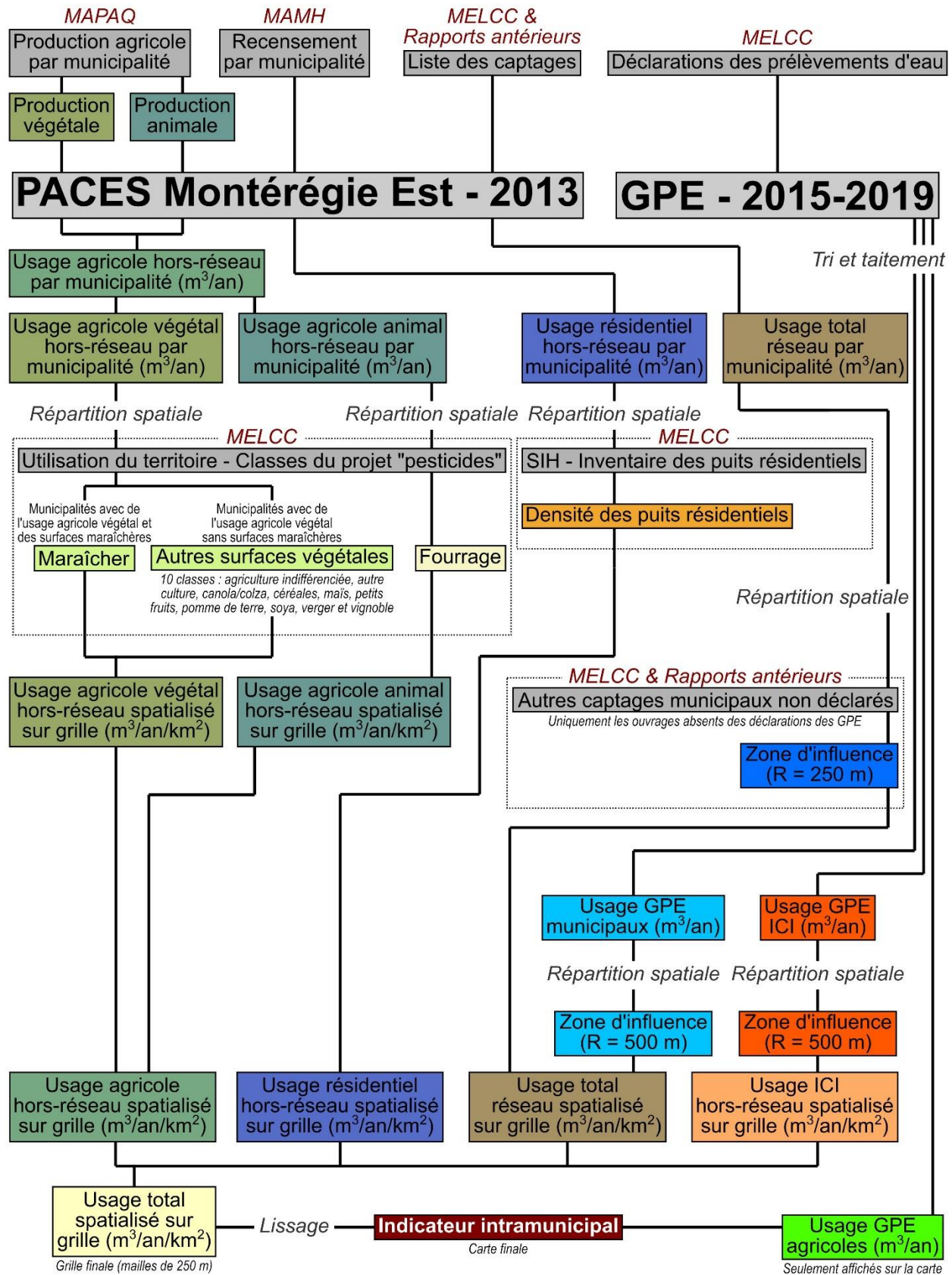


Figure 9.1 : Processus de production de l'indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine

9.2 Traitement des données sur les grands préleveurs d'eau (GPE)

Dans le but de produire un indicateur à l'échelle intramunicipale, il a été nécessaire d'obtenir les données ponctuelles des prélèvements d'eau, notamment pour les Grands préleveurs d'eau (GPE). Depuis le 22 juin 2011, le Règlement sur la déclaration des prélèvements d'eau (MELCC, 2021a) exige à tout propriétaire (industries, commerces ou institutions voire certaines municipalités avec leur propre réseau de distribution) de déclarer le volume d'eau prélevé dès que son prélèvement moyen dépasse 75 m³/jour. Ainsi, les données issues des déclarations annuelles soumises au ministère avant le 31 mars de chaque année permettent d'obtenir les volumes annuels prélevés de l'année précédente. Ces données ont ainsi été récupérées au format Excel auprès du MELCC depuis le début des projets PACES ; elles concernent les années suivantes : 2009, 2010 et 2011 puis 2015, 2016, 2017, 2018 et 2019.

Toutefois, un important travail a dû être appliqué à cette base de données pour ne conserver que les déclarations les plus pertinentes. Ce travail a été nécessaire pour obtenir une base de travail la plus fiable possible afin de produire l'indicateur intramunicipal. Le traitement de la base de données des GPE a été effectué en deux temps : (1) une phase préliminaire de traitement des données pour l'ensemble des GPE de la province et (2) une deuxième phase de tri nécessitant une approche au cas par cas et donc uniquement appliquée à la Montérégie Est. L'ensemble du processus est détaillé dans l'annexe 8.

En parallèle, deux autres tâches ont également été effectuées sur cette base de données dans le but de définir les GPE permanents et les volumes représentatifs. Toutefois, ces deux étapes ayant été mises en œuvre sur tous les GPE de la province, il ne devrait pas être nécessaire de les appliquer de nouveau lors de l'élaboration d'un indicateur intramunicipal sur un autre territoire. Elles sont néanmoins décrites également dans l'annexe 8 jointe au présent rapport.

9.2.1 *Traitement préliminaire des déclarations originales et création d'un numéro unique*

Comme les fichiers transmis par le MELCC dans le cadre des projets PACES concernaient des déclarations sur des périodes « anciennes » (2009, 2010 et 2011) et « récentes » (2015, 2016, 2017, 2018 et 2019), la première étape a consisté à compiler l'ensemble des volumes déclarés récemment (2015-2019). Ce sont ces volumes récents qui sont pris en compte lors de l'élaboration de l'indicateur intramunicipal.

Cette première étape est délicate puisque qu'il s'agit de combiner les volumes déclarés par site de prélèvement au fil des années alors que les sites de prélèvement ne sont pas forcément déclarés chaque année. En effet, pour un même lieu, plusieurs sites de prélèvement peuvent être déclarés une année donnée puis ne plus l'être l'année suivante (4 en 2015, puis 3 en 2017 et finalement 1 seul en 2019 dans l'exemple de la figure A.8.1). Pour retrouver un site de prélèvement d'une année sur l'autre, il serait donc logique de s'appuyer sur les données de la fiche de déclaration. Toutefois, les nombreuses incohérences rencontrées dans la base de données des GPE ne permettent pas de retrouver avec certitude les sites de prélèvement d'une année sur l'autre. Ces inconsistances entre les déclarations pour un même site, mentionnées dans la figure 9.2 et également dans la figure A.8.1, concernent notamment : (1) une orthographe ou une casse différente dans le nom du lieu ou du site ou encore (2) des divergences dans la précision des coordonnées (latitude et longitude) selon les années.

Afin de s'affranchir de ces incohérences, il a donc été décidé de créer un numéro unique combinant le numéro du lieu du Système d'aide à la gestion des opérations (SAGO), la latitude et la longitude pour retrouver le même site d'une année sur l'autre et obtenir les volumes moyens sur la période récente (2015-2019). Comme la précision sur la latitude et la longitude pouvaient varier d'une année sur l'autre (figure 9.2), il a été nécessaire de tronquer les coordonnées (latitude et longitude) à un niveau de précision adapté pour obtenir un numéro unique référant à un même site. En identifiant ainsi chaque site par un numéro unique, il est alors possible d'identifier 3 658 GPE sur l'ensemble de la province ayant été déclarée au moins une fois entre 2015 et 2019.

Orthographe ↔ Code SCIAN ↔ Secteur d'activité inadéquat

	Numéro unique	Numéro du lieu	Nom légal du lieu ou de la personne physique	Code Scian	Secteur d'activité	Nom du site de prélèvement	Longitude DD Nad83	Latitude DD Nad83	
2015	X2075614-76.093888888947.7461111111	X2075614	Club de Golf Triangle d'Or inc.	71391	Terrains de golf & country clubs	Trou No 1	-76.0938888889	47.7461111111	 Numéro unique imprécis
2016	X2075614-76.093888888947.7461111111	X2075614	Club de golf Triangle D'Or inc.	22131	Réseaux d'aqueduc & systèmes d'irrigation	Trou No 1	-76.0938888889	47.7461111111	
2017	X2075614-76.093888888947.7461111111	X2075614	Club de Golf Triangle d'Or inc.	713910	Terrains de golf & country clubs	trou no 1	-76.0938888000	47.7461111000	
2018	X2075614-76.093888888947.7461111111	X2075614	Club de Golf Triangle d'Or inc.	713910	Terrains de golf & country clubs	Trou No 1	-76.0938888889	47.7461111111	
2019	X2075614-76.093888888947.7461111111	X2075614	Club de Golf Triangle d'Or inc.	713910	Terrains de golf & country clubs	Trou No 1	-76.0938888889	47.7461111111	

Note : Afin d'assurer la confidentialité des déclarants de l'exemple, les coordonnées des sites de prélèvement d'eau ont été modifiées.

Casse ↔ Précision ↔

Figure 9.2 : Exemple d'incohérences constatées dans la base de données des GPE

À partir du code SCIAN du Système de classification des industries de l'Amérique du Nord de 2002 (Statistiques Canada, 2021), la catégorie d'usage (agricole, ICI ou municipal) peut alors être attribuée à chaque GPE recensé au Québec selon la procédure décrite dans l'annexe 8. Toutefois, de nouvelles erreurs liées à l'attribution du code SCIAN ont été rencontrées dans la base de données des GPE. La figure 9.2 illustre un exemple d'incohérence qui mène à l'attribution d'un mauvais secteur d'activité et finalement à une catégorie d'usage erronée. Dans cet exemple, pour la déclaration de 2016, le golf est affilié au secteur d'activité « Réseaux d'aqueduc & systèmes d'irrigation » relié au code SCIAN 22131 qui suggérerait un GPE municipal alors qu'il s'agit en réalité d'un GPE ICI. Cette erreur est peut-être causée par un changement dans la personne remplissant le formulaire de déclaration d'une année à l'autre.

9.2.2 Traitement spécifique de la BD des GPE pour la Montérégie Est

Suite à l'attribution des numéros uniques et des catégories d'usage pour l'ensemble des GPE du Québec déclarés entre 2015 et 2019, une phase de traitement plus spécifique a été nécessaire. Celle-ci a nécessité un regard individuel pour chaque GPE. Ainsi, elle a seulement été appliquée sur les GPE initialement localisés en Montérégie Est qui sont au nombre de 338.

Hormis une erreur ponctuelle reliée un code SCIAN inadapté pour un golf (figure A.8.5), rapidement identifiée puis corrigée ; trois types de vérifications ont été faites sur l'ensemble des GPE de la Montérégie Est : (1) adéquation de la source de prélèvement avec le type de GPE, (2) précision de la méthode de mesure du volume ou du débit déclaré et (3) cohérence dans la localisation du site. Ce processus est détaillé dans l'annexe 8.

La source de prélèvement (eau de surface ou souterraine) a été vérifiée et un indice de confiance a été attribué à cette information en se basant à la fois sur la source de prélèvement et un certain jugement professionnel (tableau A.8.4). L'indice de confiance peut prendre les valeurs suivantes : élevé (SPa), moyen (SPb) et faible (SPc). Un « x » est ajouté à la fin de l'indice si la source de prélèvement du GPE a été modifiée par rapport à la déclaration initiale. Plusieurs erreurs liées à la source de prélèvement sont mises en relief sur la figure A.8.6. Elles concernent surtout les carrières pour lesquelles la source de prélèvement affiliée est l'eau de surface alors que l'eau pompée dans une carrière est généralement d'origine souterraine. Ponctuellement, d'autres erreurs peuvent être rencontrées et reliées à des incohérences comme par exemple un puits indiqué dans le nom du site associé à une source de prélèvement de surface (voir figure A.8.6). Une autre modification a aussi été apportée ponctuellement sur un bassin tampon en milieu maraîcher vraisemblablement alimenté par un puits (voir aussi sur la figure A.8.6). Dans ce cas particulier, il serait primordial d'obtenir la confirmation du déclarant. Au total, 27 changements ont été apportés pour les carrières (GPE ICI) et un autre pour les GPE agricoles.

Un indice de confiance a également été attribué à la méthode de mesure des volumes ou des débits déclarés (équipement de mesure ou méthode d'estimation) (tableau A.8.5). Cet indice peut prendre les valeurs suivantes : élevé (MMa) lorsqu'un équipement de mesure est utilisé, moyen (MMb) quand une méthode d'estimation est employée et faible (MMc) lorsque la méthode de mesure n'est pas indiquée. Un « x » est aussi ajouté à l'indice « MMa » dans le cas d'un bris d'équipement.

La localisation du site revêt un enjeu important. En effet, la précision de l'indicateur intramunicipal est directement relié à la localisation des sites de prélèvements d'importance et donc spécifiquement des GPE. Cette étape a dû être faite au cas par cas en vérifiant la concordance entre les informations fournies dans les déclarations et les éléments suivants : vue aérienne sur Google Maps, adresse postale ou encore Google Street View. Un indice de confiance a aussi été défini lors de cette phase (tableau A.8.6) : élevé (LSa), moyen (LSb) et faible (LSc) où un « x » est ajouté lorsque la localisation a été changée. Plusieurs erreurs majeures de localisation ont été détectées dans la BD des GPE. Celles-ci sont illustrées en partie dans la figure A.8.7. Deux GPE ont dû être rejetés car finalement situés en dehors de la Montérégie Est : (1) un golf placé initialement sur un autre à une distance de l'ordre de 30 km et (2) une pépinière normalement localisée en rive nord du fleuve Saint-Laurent à environ 38 km de sa localisation initiale. L'emplacement de plusieurs GPE agricoles, également illustré dans la figure A.8.7, était à l'origine indiqué au droit des champs ou des vergers alors que le site de prélèvement référait à un lac situé à proximité. Finalement, la localisation de 21 sites a dû être corrigée et 8 sites de prélèvement ont été rejetés car en dehors de la région d'étude.

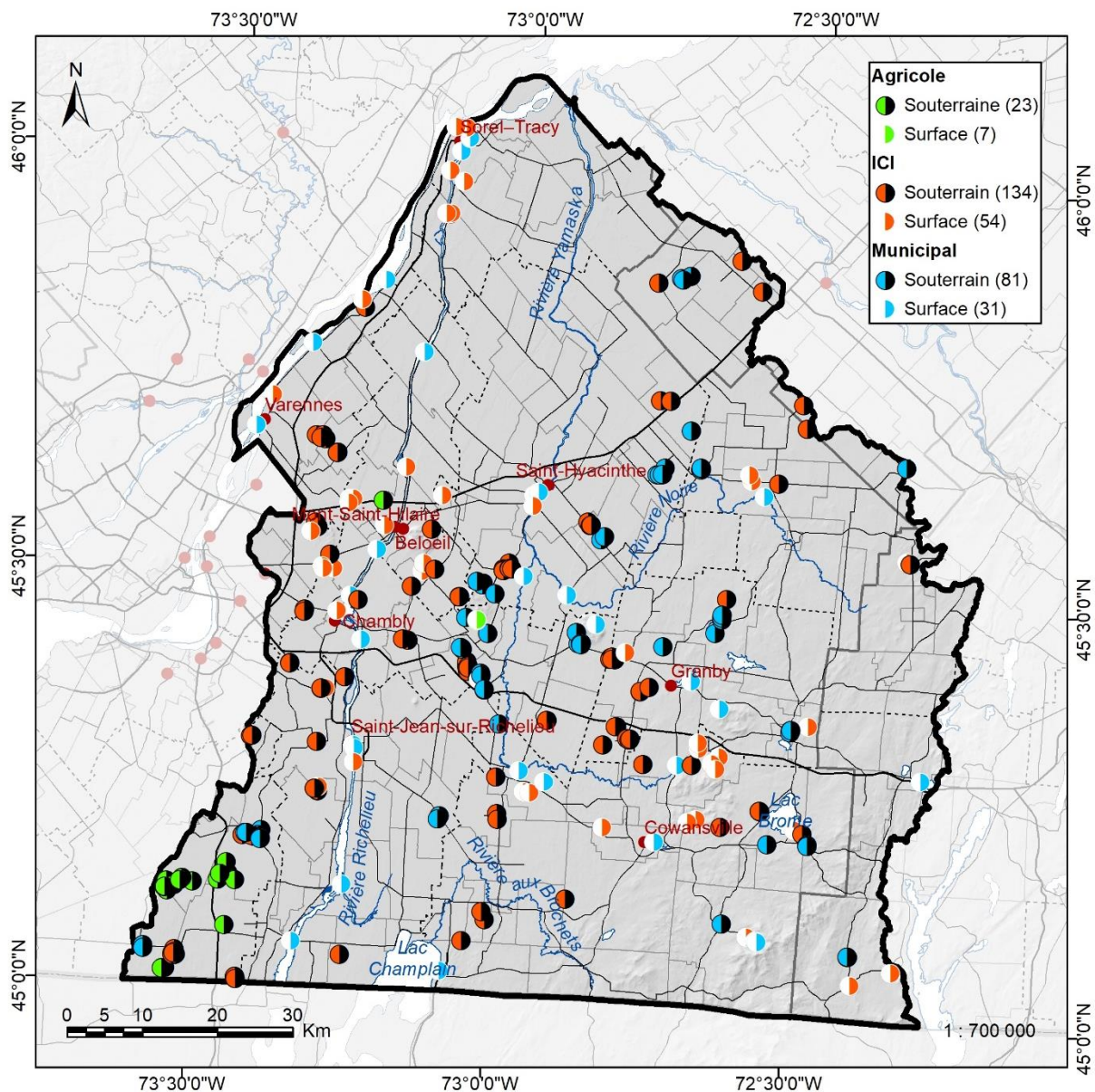


Figure 9.3 : Distribution des GPE retenus (n = 330) après la phase de traitement des données initiales

Après cette phase de traitement spécifique, 330 GPE ont été conservés en Montérégie Est dont 238 GPE prélevant les eaux souterraines retenus pour la production de l'indicateur intramunicipal (tableau 9.1). L'ensemble de ces GPE classés par source de prélèvement et par catégorie d'usage est aussi présenté dans la figure 9.3.

Tableau 9.1 : Ensemble des GPE retenus après la phase traitement des données initiales

Catégorie d'usage de l'eau	Total des GPE	GPE – Surface	GPE – Souterrain
Agricole	30	7	23
ICI	188	54	134
Municipal	112	31	81
Total	330	92	238

Les cartes A.10.1, A.10.2 et A.10.3 présentent respectivement les 330 GPE répertoriés en Montérégie Est puis les 92 GPE prélevant uniquement les eaux de surface et enfin les 238 GPE pompant les eaux souterraines.

9.2.3 Analyse des données issues de la BD des GPE

Afin de s'assurer de définir correctement les zones ponctuelles de stress sur la ressource en eau souterraine, trois analyses rapides des données en présence ont été effectuées. Celles-ci ne sont pas nécessaires pour la production de l'indicateur intramunicipal en lui-même mais comme il s'agissait d'une première tentative de définition des pressions à l'intérieur des municipalités, il fallait s'assurer d'utiliser les données les plus robustes.

Les trois analyses concernaient : (1) la définition des GPE dits « permanents », (2) l'attribution d'un volume représentatif pour chaque site de prélèvement et finalement, (3) la comparaison des volumes déclarés par les GPE lors du PACES de Montérégie Est (Carrier et al., 2013a) avec les données actuelles collectées sur la période 2015-2019.

La première analyse visait à définir des GPE permanents, c'est-à-dire ceux apparaissant à la fois dans les déclarations anciennes (2009-2011) et les déclarations récentes (2015-2019). Une comparaison a donc été faite entre les deux bases de données en attribuant un numéro unique à chaque GPE du Québec dont la définition est précisée dans la section 9.2.1.

Finalement, sur les 3 658 GPE déclarés entre 2015 et 2019 dans la province, seulement 1 760 ont été retrouvés dans les déclarations faites entre 2009 et 2011 (tableau 9.2). Cela élimine une quantité trop importante de GPE (1 898 soit 52 %).

Tableau 9.2 : Bilan des GPE conservés pour le Québec lors de la définition de GPE permanents

GPE (2015-2019) au Québec		GPE en excluant ceux non déclarés en 2009-2011	
Surface	1054	Surface	539
Souterrain	2604	Souterrain	1221
Total	3658	Total	1760
Agricole	324	Agricole	56
ICI	1493	ICI	696
Municipal	1841	Municipal	1008

En Montérégie Est, 207 GPE seraient alors éliminés sur les 338 déclarés initialement (figure A.8.2). Ceci réduit drastiquement le nombre de GPE conservés (tableau 9.3).

Tableau 9.3 : Bilan des GPE conservés pour la Montérégie Est lors de la définition de GPE permanents

GPE (2015-2019) en Montérégie Est		GPE en excluant ceux non déclarés en 2009-2011	
Surface	123	Surface	57
Souterrain	215	Souterrain	74
Total	338	Total	131
Agricole	36	Agricole	1
ICI	190	ICI	73
Municipal	112	Municipal	57

Ce constat est sûrement dû au fait que le Règlement sur la déclaration des prélèvements d'eau (MELCC, 2021a) a été mise en place récemment (2011). Ainsi, un nombre plus important de GPE est déclaré dans les années récentes. Il a donc été décidé de considérer l'ensemble des GPE déclarés entre 2015 et 2019 puisque cette base de données semble la plus réaliste.

La seconde analyse avait pour objectif initial de définir un volume de déclaration représentatif pour chaque GPE. En effet, les volumes déclarés pour un même GPE peuvent fortement varier d'une année sur l'autre (sur un même site de prélèvement peut être déclaré 0 m³/an puis plusieurs millions de m³/an l'année suivante). La procédure a consisté à comparer l'utilisation de deux types de valeurs pour tous les GPE du Québec et de la Montérégie Est : le volume maximal déclaré sur la période récente (2015-2019) et le volume moyen calculé entre 2015 et 2019.

Les résultats sont présentés dans les figures A.8.3 et A.8.4. Ces box-plots suggèrent que l'utilisation de la valeur maximale surévaluerait trop les prélèvements. Il a donc été décidé de considérer les valeurs moyennes sur la période déclarée pour la production de l'indicateur intramunicipal.

La dernière analyse indiquée ici à titre informatif concerne la comparaison des volumes d'eau souterraine prélevés par les GPE récents (2015-2019) avec ceux prélevés par les GPE compilés lors du PACES de Montérégie Est (2013). Le but était de s'assurer de la cohérence entre les deux sources de données puisqu'elles sont utilisées conjointement dans la production de l'indicateur. Les hypothèses de départ étaient les suivantes : (1) les volumes de GPE ICI récents (2015-2019) devraient être plus importants que les usages ICI hors-réseau définis en 2013 et (2) les volumes de GPE municipaux récents (2015-2019) devraient être similaires à l'usage total réseau de 2013. Les GPE agricoles n'ont pas été considérés car la variabilité interannuelle des volumes déclarés est trop importante.

La figure A.8.8.b illustre bien la hausse des volumes déclarés pour l'usage ICI hors-réseau. Ceci est logique puisque les GPE déclarés sont plus nombreux actuellement. La figure A.8.8.a montre une moins bonne corrélation que prévu pour l'usage total réseau ; l'usage total réseau actuel est sous-estimé par rapport à celui défini en 2013 lors du PACES. Ceci trouve son explication dans le fait que l'usage produit par le PACES de Montérégie Est (Carrier et al., 2013a) est distribué sur toute la municipalité même si les puits sont localisés en dehors du territoire. Par exemple, pour le canton d'Orford, les puits sont tous en dehors des limites du PACES d'où l'absence d'usage total réseau lorsque sont considérés uniquement les localisations ponctuelles des GPE municipaux. Ce constat montre en fait une force de l'indicateur intramunicipal puisque celui-ci ne répartit pas l'usage total réseau sur l'ensemble du territoire municipal mais dans une zone d'influence proche du GPE municipal, ce qui est plus réaliste. Pour d'autres municipalités comme Stukely-Sud ou Abercorn, les installations de production d'eau sont relativement petites et donc sous le seuil de déclaration comme grands préleveurs d'eau fixé à 75 m³/jour (MELCC, 2021a). Elles n'apparaissent donc pas dans les GPE déclarés sur la période récente (2015-2019). Ces quelques captages d'eau municipaux de faible volume ont d'ailleurs été ajoutés puis pris en compte lors de l'élaboration de l'indicateur intramunicipal.

9.3 Élaboration des grilles d'usage

La démarche de production des grilles d'usage de l'eau nécessaire à l'élaboration de l'indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine, présentée brièvement dans la section 9.1, est détaillée ici. Plus de détails sur les procédures employées et les outils utilisés se trouvent dans l'annexe 9. Les divers usages considérés sont en effet distribués spatialement sur une grille de 144 647 mailles de 250 m par 250 m couvrant l'ensemble de la Montérégie Est. Quatre grilles d'usage sont initialement réalisées : (1) usage total réseau (section 9.3.1), (2) usage agricole hors-réseau (section 9.3.2), (3) usage ICI hors-réseau (section 9.3.3) et (4) usage résidentiel hors-réseau. En combinant ces dernières, la grille de l'usage total est alors élaborée (section 9.3.5). Toutes ces grilles brutes sont ensuite simplifiées pour obtenir les diverses grilles finales (section 9.3.6) nécessaires à la production de l'indicateur final (section 9.4). Sur toutes ces grilles, les divers usages de l'eau souterraine sont affichés en $\text{m}^3/\text{an}/\text{km}^2$.

9.3.1 Usage total réseau

L'usage total réseau est calculé à partir de deux sources de données : (1) les volumes d'eau souterraine prélevés par les GPE municipaux déclarés récemment (2015-2019) et (2) l'usage de l'eau souterraine pour les quelques captages municipaux d'importance non répertoriés dans la base de données des GPE.

En Montérégie Est, entre 2015 et 2019, l'usage moyen par GPE municipal s'échelonne de 0 à 600 165 m^3/an (figure 9.4). Pour l'usage établi à partir des 81 GPE municipaux prélevant les eaux souterraines, une zone d'influence de 500 m de rayon a été considérée autour de ces points de prélèvement. Ainsi, l'usage des GPE municipaux a été distribué sur les 1 011 mailles incluses dans cette aire d'influence supposée.

En parallèle, afin de ne manquer aucun aqueduc municipal, la liste des captages municipaux alimentant des réseaux de distribution extraite de l'annexe 6 du PACES de Montérégie Est (Carrier et al., 2013a) a été comparée avec les GPE municipaux déclarés entre 2015 et 2019. Cette étape a été nécessaire puisque 14 puits municipaux n'avaient pas été recensés dans les déclarations récentes des GPE municipaux. Ces captages se répartissent entre les cinq municipalités suivantes : Abercorn (1), Brigham (1), Frelighsburg (1), Stukely-Sud (1) et Warden (10). Pour la municipalité de Warden, l'usage total réseau déclaré en 2013, soit 31 937 m^3 (figure 9.4), a été uniformément réparti entre les 10 puits. Pour ces 14 points de captage, l'usage a été distribué sur les 47 mailles incluses dans une aire d'influence potentielle de 250 m de rayon. Cette aire d'influence a été supposée plus restreinte que celle des GPE en raison des volumes annuels prélevés qui sont moindre dans le cas de ces quelques captages municipaux.

Les deux grilles ont ensuite été assemblées pour élaborer la grille de l'usage total réseau (carte A.10.11).

9.3.2 Usage agricole hors-réseau

L'usage agricole total réseau a nécessité deux sources de données : (1) l'usage de l'eau souterraine par type de production agricole par municipalité issu de l'annexe 6 du PACES de Montérégie Est (Carrier et al., 2013a) et (2) la carte de l'utilisation du territoire de 2017 (MELCC, 2017). Le premier usage a initialement été estimé à partir des surfaces de productions végétales et du nombre de têtes de bétail fournies par le MAPAQ auxquels ont été associées des facteurs de consommation par type de production de la charte de consommation du MAPAQ (Carrier et al., 2013a).

La procédure a consisté à répartir l'usage agricole hors-réseau par municipalité sur les surfaces agricoles qui représentent 52.3 % de la superficie de la Montérégie Est (tableau 9.4). L'usage agricole végétal a été associé aux mailles incluses au droit des surfaces maraîchères tandis que l'usage agricole animal a été réparti sur les mailles situées au droit des surfaces fourragères. Pour ce faire, la carte d'utilisation du territoire de 30 m de résolution (cartes A.10.4 et A.10.5) a tout d'abord été simplifiée pour atteindre une résolution de 250 m (figure A.9.1 et cartes A.10.6 à A.10.7).

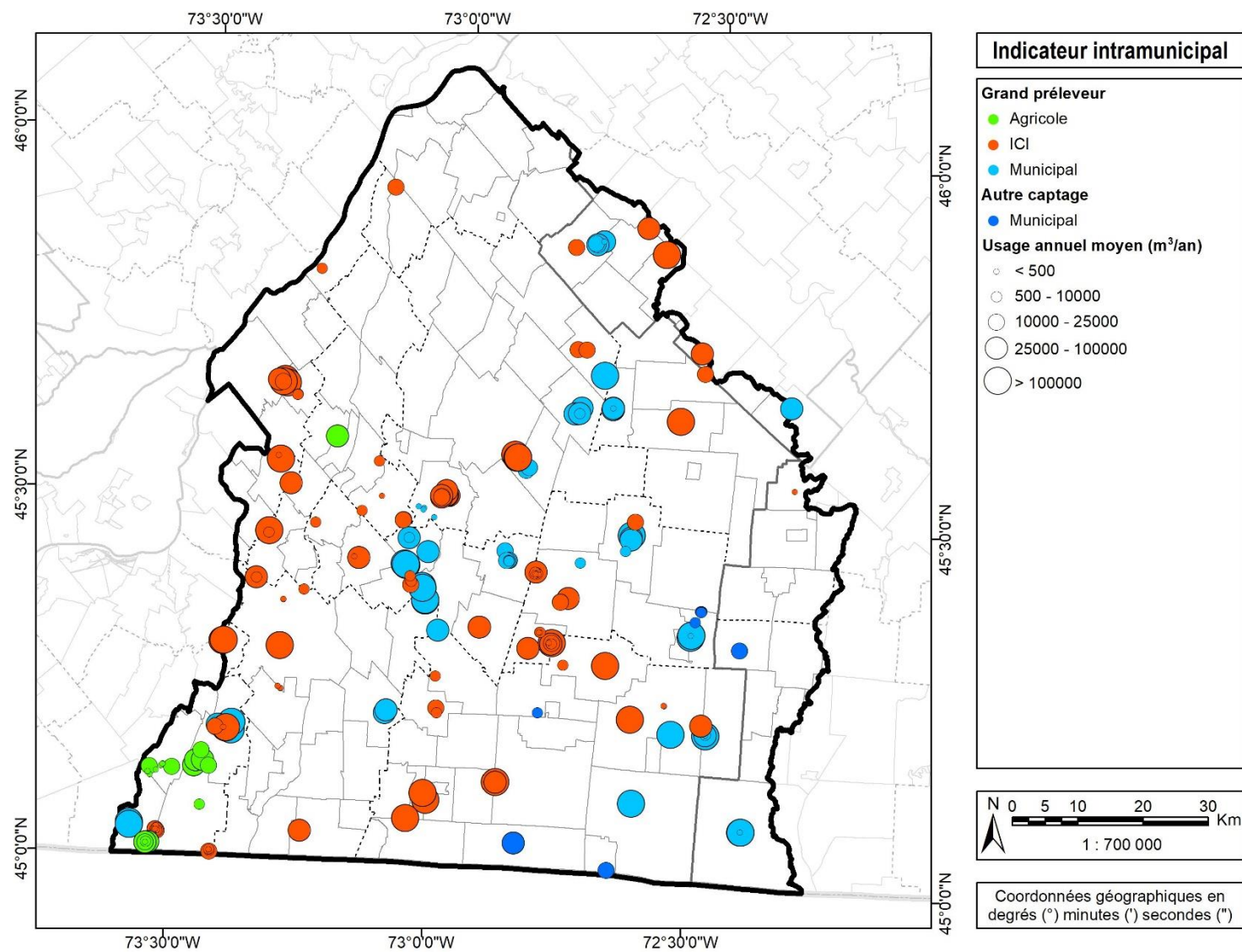


Figure 9.4 : Ensemble des grands préleveurs d'eau souterraine et des captages municipaux d'importance en Montérégie Est

Tableau 9.4 : Catégories générales d'utilisation du territoire en Montérégie Est

Catégories générales	Aire (km ²)	Ratio (%)
<i>Agricole</i>	4 726	52.3
Anthropique	868	9.6
Aquatique	275	3.0
Coupe et régénération	28	0.3
Forestier	2 643	29.2
Humide	495	5.5
Non classifié	5.2	0.1
Sol nu et lande	0.75	0.0
Total	9 040	100.0

Ensuite, en chaque point de la grille de 144 647 mailles ont été attribuées des classes générales mais également les classes du projet « pesticides ». Cette dernière classification permet de distinguer les maraîchers et les fourrages des autres surfaces agricoles (tableau 9.5).

Tableau 9.5 : Catégories du projet « pesticides » d'utilisation du territoire en Montérégie Est

Catégories générales	Aire (km ²)	Ratio (%)
Agriculture indifférenciée	668	14.1
Autre culture	4.8	0.1
Canola/Colza	0.38	0.0
Céréales	215	4.5
<i>Fourrage</i>	672	14.2
Maïs	1 853	39.2
<i>Maraîcher</i>	67	1.4
Petits fruits	1.8	0.0
Pomme de terre	7.5	0.2
Soya	1 209	25.6
Verger	26	0.6
Vignoble	2.0	0.0
Total	4 726	100.0

Au sein de 63 municipalités combinant usage agricole végétal et présence de maraîchers (tableau 9.6), l'usage agricole végétal a alors été réparti sur le nombre de mailles situées au droit des surfaces maraîchères qui représentent 1.4 % des superficies agricoles de la Montérégie Est (tableau 9.5).

Toutefois, la grille d'utilisation du territoire du MELCC, datée de 2017, semble sous-estimer les surfaces de cultures maraîchères. Par conséquent, pour 63 autres municipalités sans maraîchers (tableau 9.6), un usage agricole végétal avait été calculé lors du PACES de Montérégie Est (Carrier et al., 2013a). Pour ces municipalités, identifiées dans le tableau A.9.8, il a alors été décidé de répartir cet usage agricole végétal sur les 10 autres classes de surfaces végétales : agriculture indifférenciée, autre culture, canola/colza, céréales, maïs, petits fruits, pomme de terre, soya, verger et vignoble.

Pour les 22 municipalités restantes (tableau 9.6), aucun usage agricole végétal n'avait été estimé en 2013. La carte A.10.10 permet de visualiser les trois types de municipalités du territoire au regard de l'usage agricole végétal et des surfaces maraîchères.

Tableau 9.6 : Synthèse des municipalités au regard de l'usage agricole végétal et des surfaces maraîchères en Montérégie Est

Descriptif	Nombre de municipalités
Municipalités avec de l'usage agricole végétal et des surfaces maraîchères	63
Municipalités avec de l'usage agricole végétal sans surfaces maraîchères	63
Municipalités sans usage agricole végétal	22
Total	148

Quant à l'usage agricole animal, il a été distribué dans chaque municipalité sur les mailles localisées au droit des superficies en fourrage. Ces surfaces destinées à l'alimentation des animaux représentent 14.2 % des surfaces agricoles en Montérégie Est (tableau 9.5).

La grille de l'usage agricole total hors réseau (carte A.10.14) correspond alors à la combinaison des grilles d'usage agricole végétal (carte A.10.12) et animal (carte A.10.13).

Les GPE agricoles n'interviennent pas directement dans les calculs de l'usage agricole hors-réseau. En effet, puisqu'ils présentent une forte variabilité interannuelle dans les volumes déclarés et que les puits agricoles ne sont pas systématiquement déclarés, il a été décidé de les afficher uniquement dans la carte finale de l'indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine (section 9.4). Ces 23 points de prélèvement en milieu agricole affichent des volumes moyens entre 2015 et 2019 allant de 0 à 84 369 m³/an selon les sites (figure 9.4).

9.3.3 Usage ICI hors-réseau

L'usage ICI hors-réseau est uniquement déterminé grâce aux données des GPE ICI récemment déclarés (2015-2019). En effet, afin d'obtenir un indicateur actualisé, il a été décidé d'utiliser une base de données actualisée plutôt que de se fier aux données du PACES qui datent de 2013.

En Montérégie Est, les volumes annuels moyens des 134 GPE ICI pompant les eaux souterraines s'étalent de 0 à 2 175 033 m³/an (figure 9.4). Le volume annuel moyen de ces GPE ICI est réparti sur les 1 674 mailles situées dans leur zone d'influence potentielle fixée à 500 m de rayon.

Comme pour le reste des GPE (ou des autres captages municipaux identifiés précédemment), une maille peut être recoupée par plusieurs zones d'influence. Dans ce cas, la procédure mis en place permet de tenir compte des usages cumulés sur cette maille.

La grille de l'usage ICI hors-réseau de l'eau souterraine est présentée sur la carte A.10.15 fournie dans l'annexe 10.

9.3.4 Usage résidentiel hors-réseau

L'usage résidentiel hors-réseau est estimé à partir de deux sources de données : (1) l'usage résidentiel hors-réseau par municipalité calculé lors du PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013a) et (2) la banque de données du SIH qui recense les puits individuels déclarés au Québec (MELCC, 2021c), soit 231 157 puits lors de son téléchargement. Le premier usage a été estimé à partir des données du recensement du MAMROT (2010), du nombre de personnes desservies par un réseau municipal alimenté par un puits (MDDEFP, 2011) et d'études hydrogéologiques antérieures. A chaque habitant non desservi par un aqueduc municipal, une consommation de 0.25 m³/jour avait été attribuée pour estimer l'usage résidentiel hors-réseau par municipalité (Carrier et al., 2013a).

La procédure a ensuite consisté à élaborer une carte de densité des puits, puis à distribuer l'usage résidentiel hors-réseau dans chaque municipalité selon le nombre de puits résidentiels par maille.

Une carte de densité des puits résidentiels a donc été produite en Montérégie Est à partir du SIH qui recensait 30 526 puits sur le territoire d'étude (carte A.10.8).

La carte de densité des puits par km² (carte A.10.9) traduit les informations du PACES de Montérégie Est (Carrier et al., 2013a) qui indiquaient la présence d'une zone d'eau saumâtre et donc non potable au nord de la région avec une quasi-absence de puits. En Montérégie Est, ces zones sans puits représentent 87.8 % des mailles du territoire (tableau 9.7).

Tableau 9.7 : Distribution de la densité de puits résidentiels en Montérégie Est

Densité de puits résidentiels (puits/km ²)	Distribution (km ²)	Ratio (%)
Nulle	7 938	87.8
16-25	724	8.0
25-50	287	3.2
50-75	38	0.4
75-100	31	0.3
100-150	16	0.2
150-200	5.3	0.1
200-432	2.3	0.0
Total	9 040	100.0

En Montérégie Est, la densité varie de 16 (1 puits par maille de 0.0625 km²) à 432 puits par km² dans les secteurs les plus denses (figure 9.5) qui sont toutefois peu représentés (tableau 9.7).

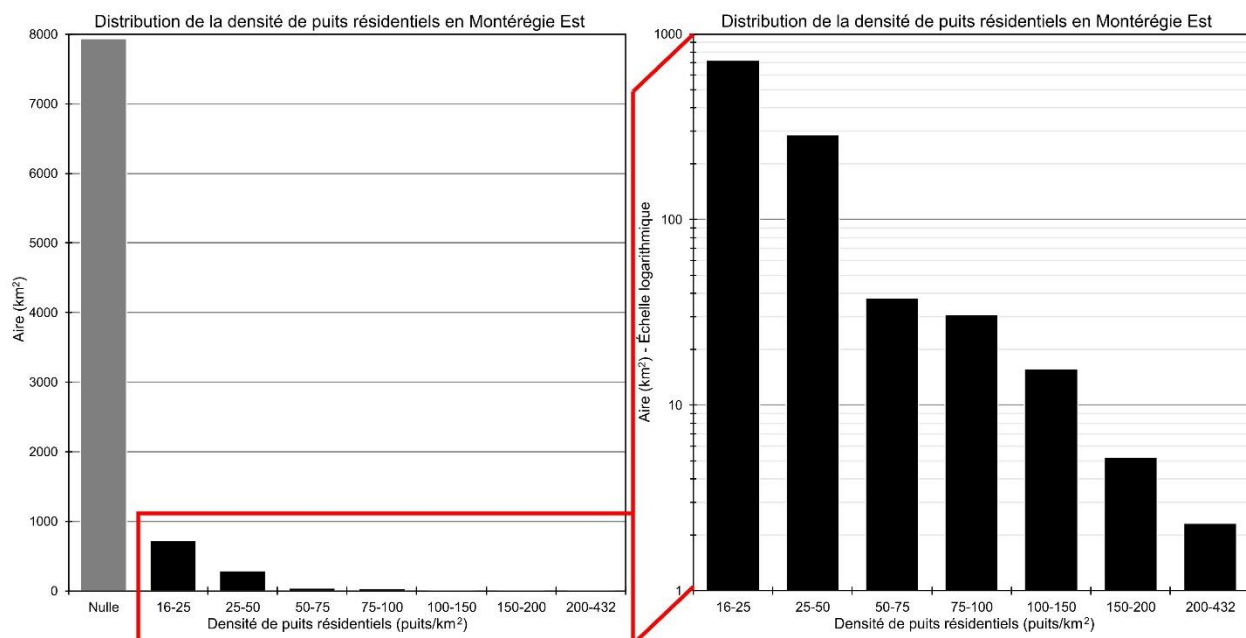


Figure 9.5 : Distribution de la densité de puits résidentiels en Montérégie Est

L'usage résidentiel hors-réseau estimé en 2013 lors du PACES a alors été distribué dans chaque municipalité selon le nombre de puits par maille. Pour certaines municipalités, comme celle de l'Ange-Gardien qui s'alimente via les eaux de surface, aucun usage résidentiel hors-réseau de l'eau souterraine n'avait été calculé lors du PACES de Montérégie Est (Carrier et al., 2013a) bien que cette municipalité présente de nombreux puits résidentiels. Il serait nécessaire de vérifier la conformité des données d'entrée. À l'inverse, la municipalité de Saint-Philippe n'affiche aucun puits résidentiel sur la portion de territoire présente en Montérégie Est mais un usage résidentiel hors-réseau y est estimé (Carrier et al., 2013a). Ceci s'explique simplement par le fait que l'usage résidentiel hors-réseau du PACES de Montérégie Est est réparti sur tout le territoire municipal sans prise en compte de l'emplacement des puits résidentiels. L'usage résidentiel hors-réseau attribué à cette municipalité a été considéré comme nul dans le cadre du développement de l'indicateur intramunicipal permettant alors de s'affranchir de cette incohérence.

La grille de l'usage résidentiel hors-réseau est présentée sur la carte A.10.16 disponible dans l'annexe 10.

9.3.5 *Usage total*

La production de la grille d'usage finale de l'eau souterraine (carte A.10.17) a simplement nécessité l'assemblage des données des quatre grilles précédentes sur l'ensemble des 144 647 mailles de 250 m par 250 m de la Montérégie Est.

9.3.6 *Production des grilles finales*

Afin de tenir compte de l'incertitude sur la localisation des prélèvements, une représentation moins spécifique que les grilles initiales a été produite. Ainsi, la production des grilles finales a consisté à intégrer les usages sur des surfaces plus grandes que les mailles de la grille (250 m). Cette opération a été rendue possible en appliquant un lissage par moyenne mobile dans un cercle de 5 mailles de rayon autour de chaque maille.

Les cinq grilles finales de l'usage de l'eau souterraine en Montérégie Est sont présentées sur les pages suivantes : (1) usage total réseau (figure 9.6), (2) usage agricole hors-réseau (figure 9.7), (3) usage ICI hors-réseau (figure 9.8), (4) usage résidentiel hors-réseau (figure 9.9), et finalement, (5) usage total (figure 9.10).

Sur chacune des cartes, les secteurs où l'usage était non significatif (i.e. inférieur à $500 \text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$) ont été volontairement masqués pour mettre en évidence les autres secteurs où l'usage est plus important (i.e. supérieur à $500 \text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$).

De plus, afin d'assurer une certaine cohérence entre les cartes et de pouvoir les comparer entre-elles, les échelles de couleurs utilisées ont toutes été subdivisées en cinq classes d'usage basé sur les quantiles de l'usage total : usage faible (500 à $2\,500 \text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$), usage modéré ($2\,500$ à $5\,000 \text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$), usage moyen ($5\,000$ à $10\,000 \text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$), usage élevé ($10\,000$ à $20\,000 \text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$) et usage très important (supérieur à $20\,000 \text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$).

Comme mentionné précédemment, les calculs de l'usage sur grille ont intégré l'intégralité des usages (ponctuels ou distribués), exception faite des GPE agricoles qui ont toutefois été ajoutés à la carte de l'usage agricole hors-réseau (figure 9.7).

Également, sur la carte de l'usage résidentiel hors-réseau ont été ajoutés les puits du SIH afin de montrer la relation entre ces deux données (figure 9.9) hormis pour le nord de la région d'étude correspondant à une zone d'eau souterraine dans le roc qui est impropre à la consommation où aucun usage résidentiel hors-réseau n'a été évalué puisque la population y est alimentée via des réseaux d'eau de surface.

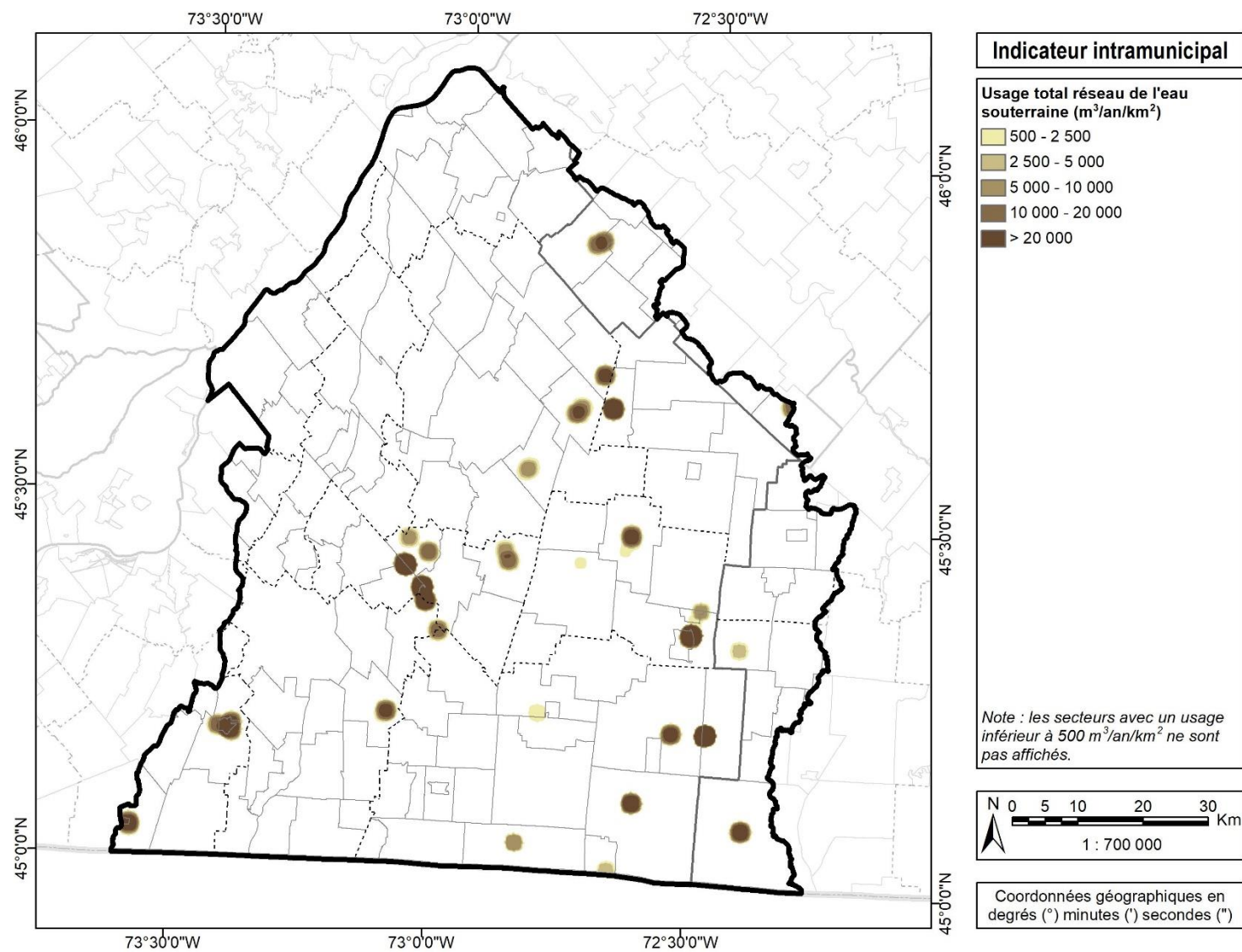


Figure 9.6 : Usage total réseau de l'eau souterraine en Montérégie Est

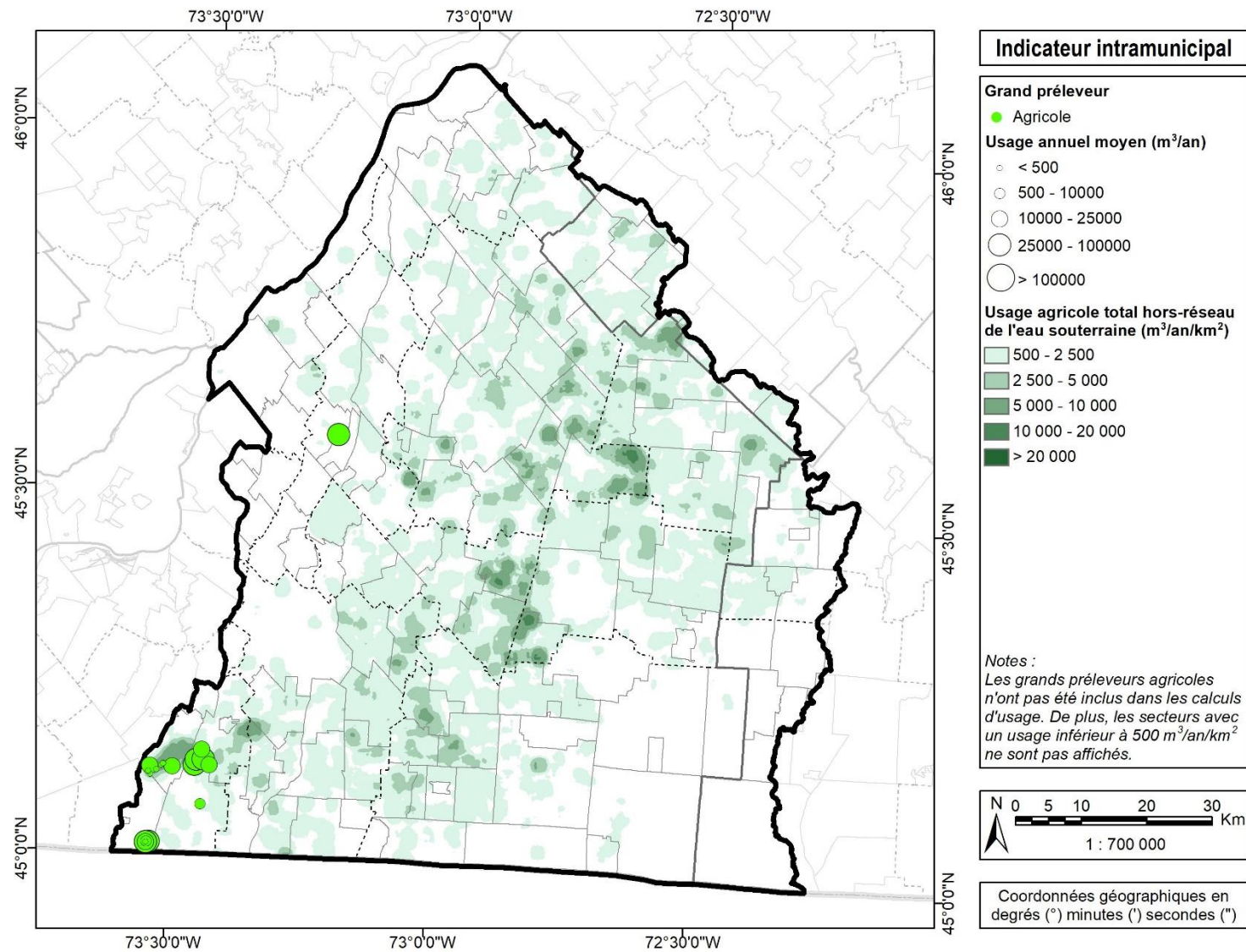


Figure 9.7 : Usage agricole hors-réseau de l'eau souterraine et grands préleveurs agricoles d'eau souterraine en Montérégie Est

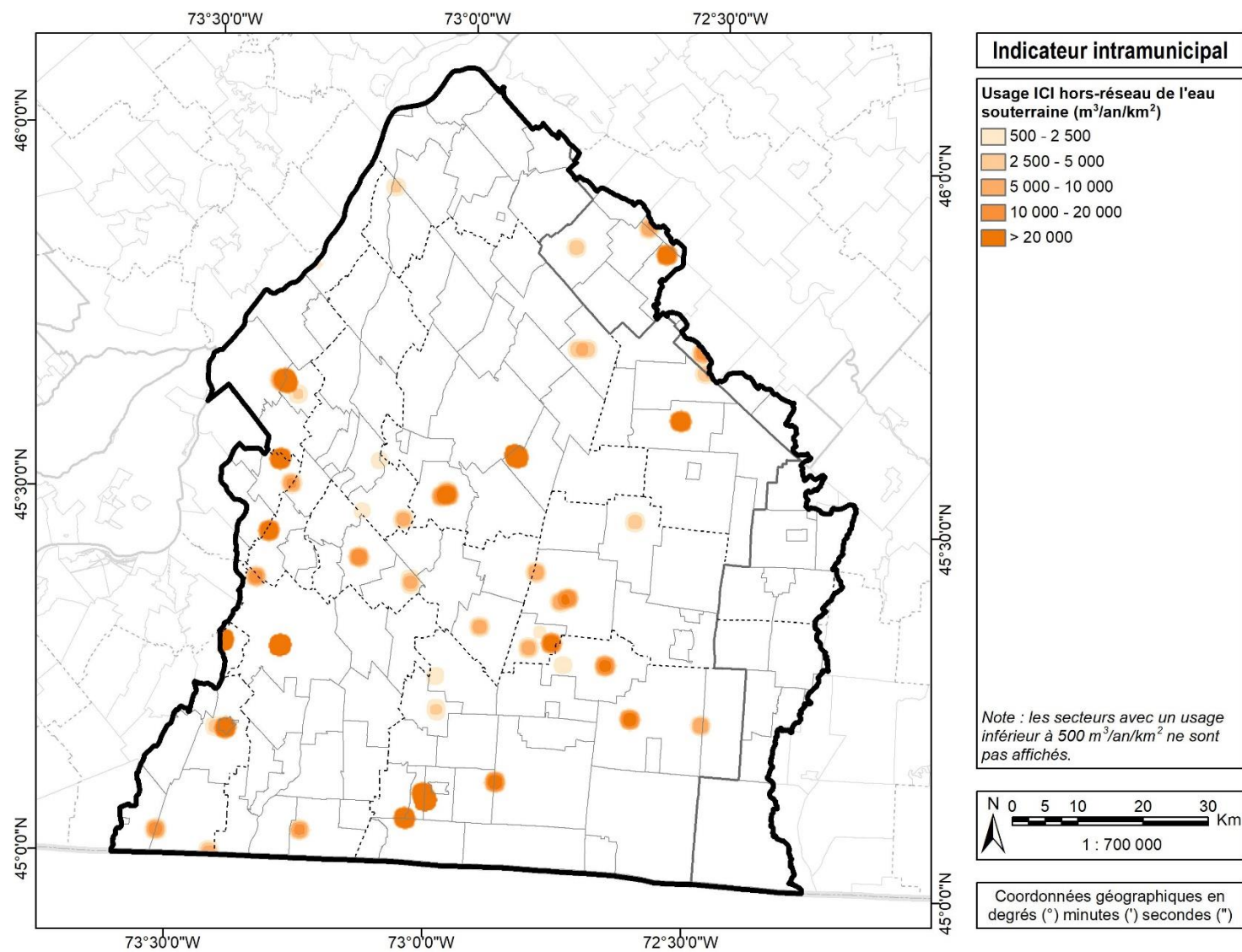


Figure 9.8 : Usage ICI hors-réseau de l'eau souterraine en Montérégie Est

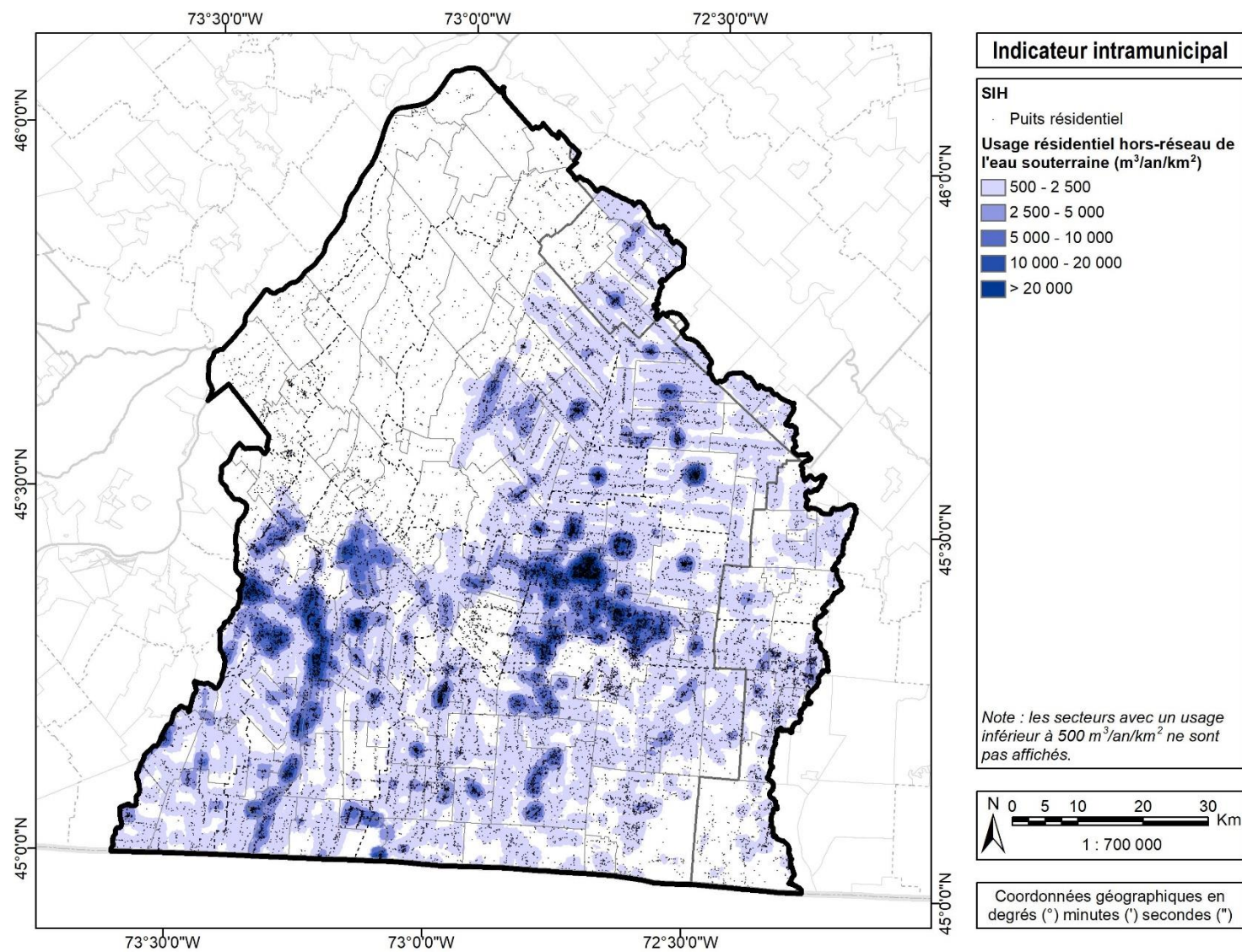


Figure 9.9 : Usage résidentiel hors-réseau de l'eau souterraine et puits résidentiels en Montérégie Est

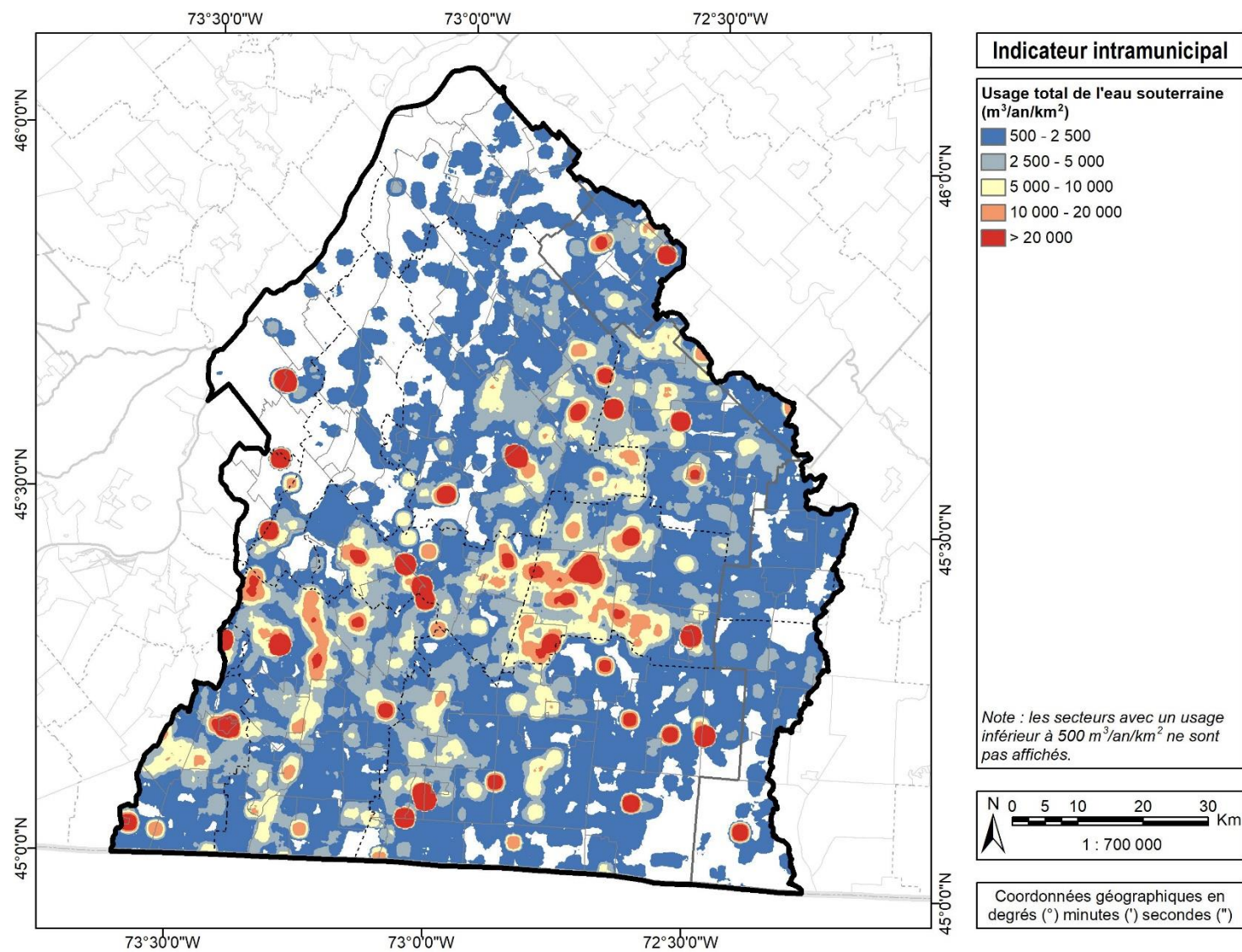


Figure 9.10 : Usage total de l'eau souterraine en Montérégie Est

9.4 Production de l'indicateur intramunicipal et définition de seuils d'usage

Afin de produire un indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine permettant de mettre en évidence localement les secteurs sous stress et également de constater la présence potentielle de conflits d'usage, la carte finale se devait d'intégrer l'ensemble des usages de l'eau souterraine (figure 9.11). Sur cette carte, tous les prélèvements d'eau de la Montérégie Est sont représentés, qu'ils soient distribués ou ponctuels :

- Usage résidentiel hors-réseau : il correspond à la couche d'usage résidentiel hors-réseau de la figure 9.9. Cet usage a toutefois été regroupé en deux classes distinctes afin de simplifier la lecture de la carte : (1) usage faible à moyen (500 à $10\,000\text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$) et (2) usage élevé à très élevé (supérieur à $10\,000\text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$). Comme sur les cartes de la section précédente, les secteurs d'usage négligeable, soit en-dessous de $500\text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$, ne sont pas considérés. L'affichage en point ou hachure en deux tons de bleu permet de mettre en évidence (par transparence) la présence de potentiel conflit d'usage avec l'usage agricole total hors-réseau décrit ci-dessous ;
- Usage agricole hors-réseau : il correspond à la couche d'usage agricole total hors-réseau (i.e. combinant l'usage agricole végétal et animal) de la figure 9.7. Les cinq classes en dégradé de vert y ont été laissées telles quelles afin de cibler les secteurs sous stress important, c'est-à-dire : (1) usage faible (500 à $2\,500\text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$), (2) usage modéré ($2\,500$ à $5\,000\text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$), (3) usage moyen ($5\,000$ à $10\,000\text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$), (4) usage élevé ($10\,000$ à $20\,000\text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$) et finalement, (5) usage très important (supérieur à $20\,000\text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$). Comme pour l'usage résidentiel hors-réseau, les secteurs d'usage non significatif (inférieur à $500\text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$) ne sont affichés sur la carte. La lecture de l'usage agricole hors-réseau est aussi agrémentée des 23 GPE agricoles recensés sur la période récente (2015-2019) et distingués par des points de couleur verte, comme sur la figure 9.4. Les gammes d'usage utilisées pour représenter le volume d'eau annuel moyen prélevé sur ces points de captage sont basées sur les valeurs arrondies des quantiles proches de l'ensemble des GPE de la Montérégie Est : (1) usage faible (inférieur à $500\text{ m}^3/\text{an}$), (2) usage modéré (500 à $10\,000\text{ m}^3/\text{an}$), (3) usage moyen ($10\,000$ à $25\,000\text{ m}^3/\text{an}$), (4) usage élevé ($25\,000$ à $100\,000\text{ m}^3/\text{an}$) puis, (5) usage très élevé (supérieur à $100\,000\text{ m}^3/\text{an}$).
- Usage ICI hors-réseau : pour ne pas alourdir la carte d'une nouvelle couche d'usage distribué et lissé sur grille, l'usage ICI hors-réseau est identifié par des points de couleur orange correspondant à l'inventaire des GPE ICI déclarés entre 2015 et 2019 et identifiables sur la figure 9.4. Pour la Montérégie Est, l'usage annuel moyen en m^3/an en ces 134 points de captage est modulé selon les cinq classes décrites précédemment pour les GPE agricoles.
- Usage total réseau : de la même façon que pour l'usage ICI réseau, l'usage total réseau est ici représenté par des données ponctuelles issues de deux sources : (1) les 81 GPE municipaux déclarés entre 2015 et 2019 en Montérégie Est, symbolisés par des points de couleur bleue claire, et (2) les 14 autres puits municipaux non répertoriés dans la BD des GPE qui sont représentés par des points de couleur bleue foncée. Ces divers puits sont aussi indiqués sur la figure 9.4 de la section 9.3. Comme pour les autres GPE de la carte, l'usage annuel moyen en m^3/an de ces sites de prélèvement est retranscrit par cinq points de différentes tailles selon le volume d'eau prélevé.

Finalement, le format de présentation de carte de l'indicateur de stress sur l'eau souterraine présenté à la figure 4.1 a été retenu comme format de visualisation des données de l'indicateur à l'échelle intramunicipale (figure 9.12). Ceci assure notamment une continuité entre les divers indicateurs produits dans le cadre du projet. Le format a toutefois dû être adapté et les encartes quelque peu édités dans le but de bien distinguer les secteurs sous stress et les potentiels conflits d'usage à une échelle plus locale. À partir de la carte générale de la Montérégie Est au 1/550 000 (à gauche), il est possible, sous ArcGIS, d'aller sélectionner la municipalité souhaitée pour obtenir un niveau de détail plus élevé dans l'encart au 1/100 000 (en bas à droite).

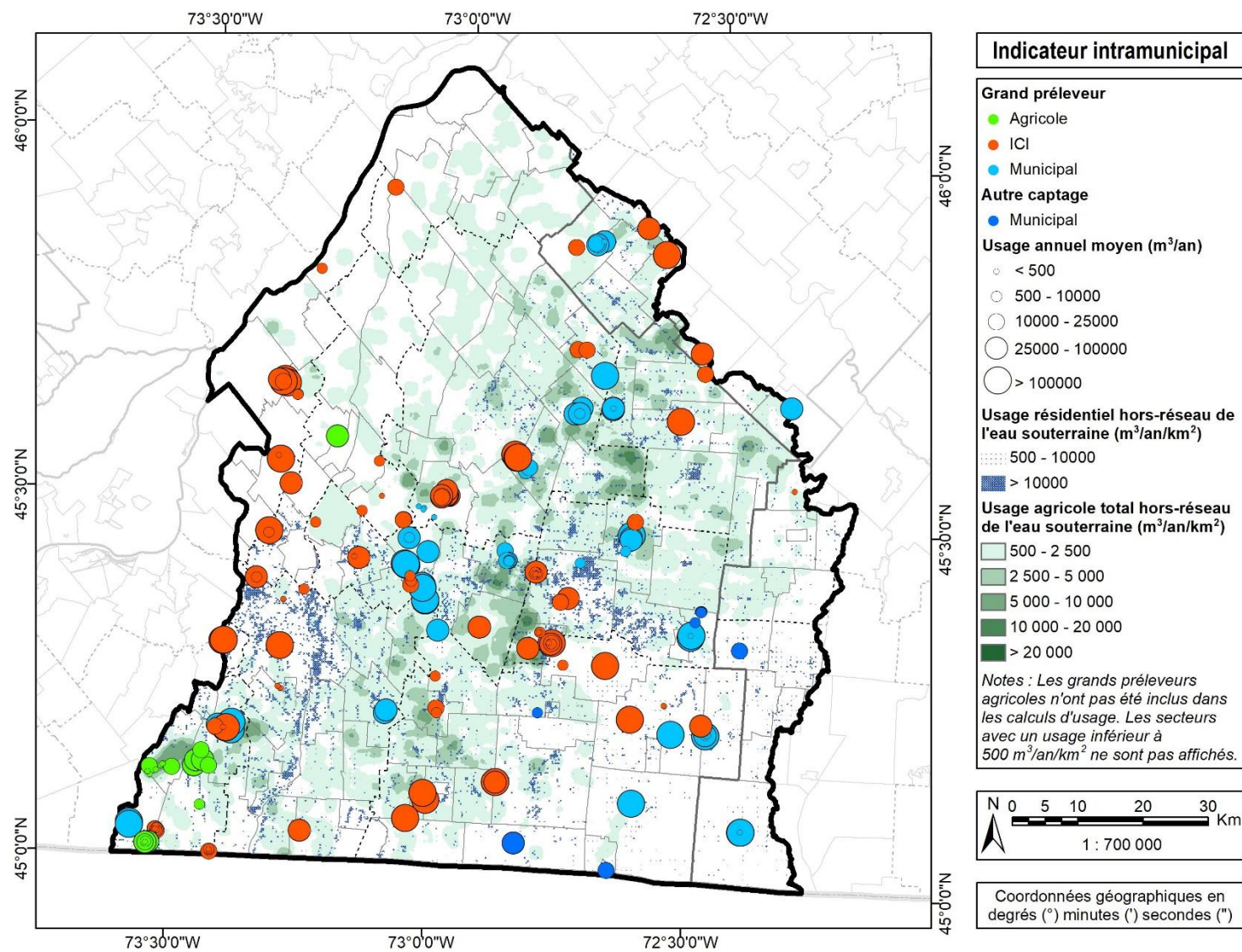


Figure 9.11 : Indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine en Montérégie Est

Sur la figure 9.12, c'est la ville de Granby qui est utilisée pour montrer l'application de l'indicateur intramunicipal. La plupart des résidents de cette ville sont approvisionnés par un réseau d'aqueduc alimenté par les eaux de surface mais de nombreux secteurs périphériques montrent une importante densité de puits résidentiels, particulièrement au nord-est de la ville où l'usage résidentiel hors-réseau est supérieur à $10\,000\text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$. Dans l'ensemble, l'usage agricole hors-réseau est faible à moyen (500 à $10\,000\text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$) et surtout localisé en bordure de la municipalité. L'usage ICI hors-réseau est représenté par quelques GPE ICI au centre et au nord-ouest du territoire dont l'usage peut être élevé ($25\,000$ à $100\,000\text{ m}^3/\text{an}$). Un autre usage GPE municipal d'importance modérée (500 à $10\,000\text{ m}^3/\text{an}$) est identifié au nord de la ville. Les secteurs de stress sur l'eau souterraine pourraient être associés aux zones à fort développement résidentiel sans aqueduc, surtout localisés au nord-est de la ville, et à quelques GPE ICI. L'usage agricole hors-réseau ne semble pas être une source de pression sur l'eau souterraine pour cette ville. L'aqueduc municipal étant alimenté par la rivière Yamaska Nord (MRC de la Haute-Yamaska, 2017), il est logique de ne pas retrouver d'usage total réseau de l'eau souterraine au centre de la municipalité. Une zone potentielle de conflit d'usage pourrait être identifiée au nord-est de la ville car elle combine plusieurs catégories d'usage : (1) un usage agricole hors-réseau moyen ($5\,000$ à $10\,000\text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$), (2) un usage résidentiel élevé à très élevé (supérieur à $10\,000\text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$) et (3) un usage ICI hors-réseau représenté par la présence de neuf GPE ICI dont un où l'usage est considéré comme élevé (i.e. de $25\,000$ à $100\,000\text{ m}^3/\text{an}$).

En Montérégie Est, l'indicateur intramunicipal devrait également permettre d'identifier d'autres secteurs sous stress important mais également des conflits d'usage locaux. À première vue, cela pourrait être le cas au sud-ouest de la région d'étude où plusieurs usagers de l'eau sont identifiés dans les municipalités suivantes : Saint-Cyprien-de-Napierville, Saint-Bernard-de-Lacolle, Saint-Patrice-de-Sherrington, village d'Hemmingford, Canton d'Hemmingford, et Napierville. Cette dernière, déjà identifiée grâce à l'indicateur de stress sur l'eau souterraine (section 6.3), présente en effet plusieurs GPE ICI et municipaux d'importance sur son territoire dont six avec un usage très élevé (i.e. supérieur à $100\,000\text{ m}^3/\text{an}$).

Les secteurs sous stress peuvent être également identifiés en s'appuyant des cartes A.10.18 à A.10.22 où des seuils d'exploitation de l'eau souterraine ont été définis. Bien qu'arbitraires, ces seuils permettent de délimiter les zones où l'usage atteint un niveau important. Deux seuils ont été définis en se basant sur les niveaux d'usage élevé ($10\,000$ à $20\,000\text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$) à très élevé (supérieur à $20\,000\text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$) définies sur les cartes précédentes. À partir de ces cartes, plusieurs constats préliminaires peuvent être émis :

- Usage total réseau (carte A.10.18) : à l'échelle de la Montérégie Est, une bonne quinzaine de secteurs sous stress peuvent être définis dont la municipalité de Napierville discutée précédemment ;
- Usage agricole hors-réseau (carte A.10.19) : l'intérêt d'afficher les GPE agricoles est ici confirmé puisque l'usage agricole total hors-réseau ne semble pas présenter un niveau de stress important en Montérégie Est hormis dans trois municipalités (Saint-Alphonse-de-Granby, Saint-Paul-d'Abbotsford et Saint-Valérien-de-Milton). Les GPE agricoles permettent donc de cibler le sud-ouest de la région d'étude comme zone sous stress potentiel ainsi que la ville de Beloeil ;
- Usage ICI hors-réseau (carte A.10.20) : sur cette carte peuvent être identifiés une vingtaine de secteurs sous stress en Montérégie Est ;
- Usage résidentiel hors-réseau (carte A.10.21) : plusieurs secteurs sous stress reliés à cet usage peuvent être cernés grâce à cette carte, dont celui de la ville de Granby discuté précédemment ou encore le long de la rivière Richelieu à Saint-Jean-sur-Richelieu ;
- Usage total (carte A.10.22) : cette carte combine l'ensemble des usages et présente donc le stress global sur l'eau souterraine en Montérégie Est qui est surtout limité à des zones ponctuelles, concentrées au centre et au sud de la région et aussi à l'ouest de la rivière Richelieu. Elle peut être utilisée conjointement à la carte de l'indicateur pour identifier les zones sous stress sans toutefois permettre de discerner les potentiels conflits d'usage.

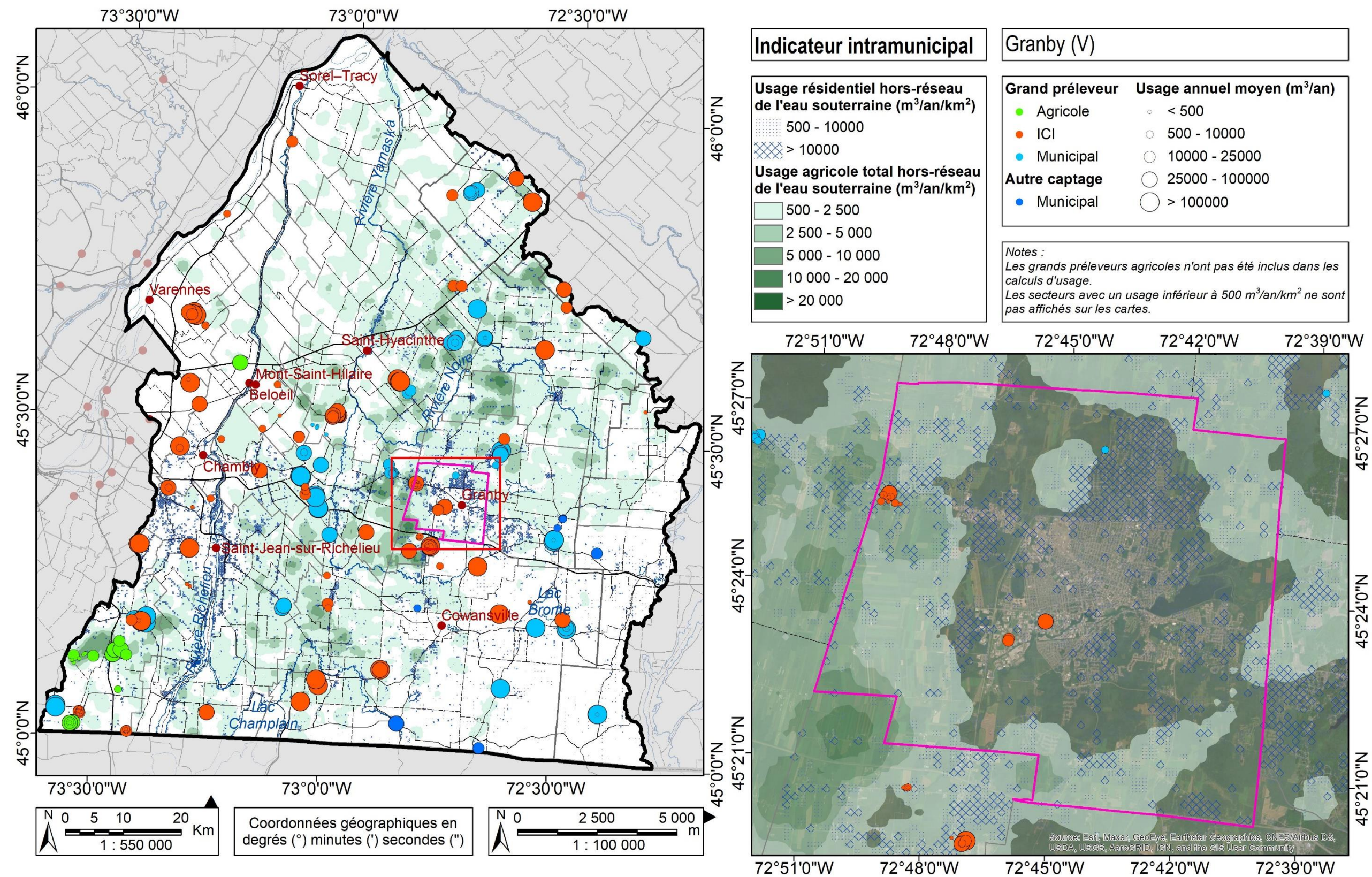


Figure 9.12 : Exemple d'indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine sur la ville de Granby

9.5 Apports et limitations de l'indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine

L'élaboration de l'indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine a permis de répondre à deux des principales limites identifiées lors de la production de l'indicateur de stress sur l'eau souterraine à l'échelle municipale. En effet, le niveau de détail atteint permet, d'une part, d'identifier les zones sous stress au sein des municipalités et, d'autre part, de différencier les usages et donc d'identifier de potentiels conflits. Cet indicateur intramunicipal permet alors de mieux juger de la possibilité d'ajouter un préleveur d'importance sur les secteurs d'une municipalité en tenant compte du niveau de stress local. L'usage sur le réseau a été volontairement conservé sans distinction des catégories d'usage, ce qui offre une lecture plus simple et directe des secteurs de stress.

D'autres avantages ressortent suite à la production de cet indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine. Il devrait être reproductible sur d'autres territoires et pour d'autres projets puisqu'il se base uniquement sur des données disponibles issues des projets PACES et de la banque de données des GPE qui sont produites et disponibles pour le secteur municipalisé du Québec. Il serait également possible de le mettre à jour sur une base régulière en se référant aux données actualisées fournies par le MAPAQ (types de production agricoles par municipalité), le MELCC (banque de données du SIH, base de données des GPE ou encore population desservie par les réseaux de distribution municipaux) ou encore le MAMH (recensement de la population). Sa production pourrait être facilitée en suivant le protocole de l'annexe 9 qui assure un certain gain de temps. L'utilisation d'une grille au 250 m offre également plusieurs avantages puisqu'elle permet de connaître à la fois l'usage total par maille et différencie également les catégories d'usage pour identifier les potentiels conflits reliés à l'eau souterraine. Le format de présentation de la carte finale de l'indicateur intramunicipal (figure 9.12) offre également deux niveaux d'affichage permettant alors un survol de la région au 1/550 000 puis d'aller cibler les conditions au sein de la municipalité désirée à l'échelle 1/100 000. Un outil sur ArcGIS (pages dynamiques ou *data driven pages*) assure une certaine automatisation du processus en facilitant la navigation entre les municipalités. Avec cet outil, il serait également possible de générer automatiquement un fichier en format PDF par municipalité selon le format de la figure 9.12. Un autre apport de cette carte finale est que l'ensemble des usages de l'eau sont distingués, ce qui permet de cibler rapidement les secteurs potentiellement conflictuels. L'indicateur intramunicipal permet aussi de corriger certaines approximations reliées à l'estimation de l'usage municipal approché dans le cadre des projets PACES. En effet, comme la procédure de production de l'indicateur tient compte de la localisation des prélèvements et ne répartit pas l'usage sur l'ensemble du territoire municipal mais plutôt sur une grille, il tient compte uniquement des prélèvements réalisés sur la région d'étude et semble ainsi plus robuste.

Plusieurs limitations de l'indicateur intramunicipal ont toutefois été identifiées. Celles-ci sont surtout reliées à des incertitudes dans les données d'entrée utilisées : BD des GPE, banque de données du SIH et grille d'utilisation du territoire. En effet, de nombreuses incohérences ont été identifiées dans les déclarations des GPE (section 9.2) : erreur de localisation, code SCIAN inexacte ou encore source de prélèvement incorrecte. De même, puisque les volumes déclarés chaque année dans cette BD des grands préleveurs d'eau varient amplement, il a été décidé de les moyenner sur la période récente (2015-2019) ce qui constitue une première approximation. L'utilisation de la BD du SIH engendre aussi une certaine incertitude puisque certains puits n'ont pas nécessairement été déclarés, des doublons y sont parfois identifiés et des erreurs de localisation peuvent y être présentes. Quant à la grille d'utilisation du territoire, elle semble sous-estimer les surfaces maraîchères (constat d'ailleurs mis en évidence dans un projet connexe). Pour 63 municipalités, l'usage agricole végétal a alors dû être réparti sur les autres surfaces végétales. De plus, la phase de simplification de la grille de 30 m de résolution initiale vers une résolution de 250 m entraîne certainement quelques approximations. Aucun niveau de seuil n'a pu être identifié dans la bibliographie, il a donc été décidé de se fier aux quantiles pour définir les cinq classes d'usage de l'eau souterraine et les deux seuils définissant un usage important de la ressource. Ces seuils permettent toutefois de cibler les zones où le niveau stress pourrait être plus conséquent et pourront être adaptés au besoin.

La démarche mise en œuvre (section 9.1) a permis de s'affranchir de certaines limitations identifiées dans les données d'entrée. Tout d'abord, les incertitudes les plus apparentes reliées à la base de données des GPE ont été corrigées lors d'une phase de traitement au cas par cas de chaque GPE mais il est recommandé au ministère de mettre en place une procédure pour vérifier l'exactitude des données déclarées et assurer un suivi des déclarants, voire même obtenir des précisions utiles sur la source de prélèvement ou la catégorie d'usage reliée au secteur d'activité. Comme l'usage agricole hors-réseau du PACES Montérégie Est datait de 2013, il a également été décidé d'afficher sur la carte finale les nouveaux usages agricoles hors-réseau correspondant aux GPE agricoles mais de ne pas les inclure dans les calculs. Le fait de répartir l'usage agricole hors-réseau sur certaines surfaces agricoles permet également de s'assurer d'un certain réalisme dans la répartition de cet usage puisque la position des puits utilisés pour les usages agricoles est généralement inconnue car non déclarés.

Puisque cet indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine est calculé sur une grille composée de mailles de 250 m, il est envisageable de mieux représenter l'indicateur de stress sur l'eau souterraine (usage/recharge) définie dans la section 6. En effet, certaines municipalités de petites tailles (inférieur à 10 km²) présentaient un ratio usage/recharge potentiellement aberrant, comme Napierville, ou à tout le moins important comme Roxton Falls ou Hemmingford. Cette limitation avait déjà été mise en évidence (section 6.4) car l'approche utilisée pour produire cet indicateur de stress usage/recharge considère uniquement la recharge qui se produit directement dans la municipalité ce qui représente une approximation puisque l'écoulement de l'eau souterraine peut apporter des quantités importantes d'eau depuis l'extérieur de la municipalité (Martin et al., 2013). La grille d'usage actuelle permettrait alors de palier à cette faiblesse en intégrant l'usage sur les bassins (niveau 1) et sous-bassins hydrogéologiques (niveau 2) délimités dans le livrable 20 du PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013a). En utilisant ainsi les limites naturelles des bassins souterrains, appelées lignes de partage, l'indicateur de stress sur l'eau souterraine produit serait grandement amélioré. Il serait ainsi plus réaliste car il mettrait en relation à la fois le renouvellement de la ressource en eau souterraine (grille de la recharge) avec le niveau d'approvisionnement en eau souterraine (grille de l'usage total) au sein des mêmes domaines (bassins souterrains) d'écoulement de l'eau souterraine.

10 STRESS SUR L'EAU SOUTERRAINE PAR SOUS-BASSIN

Bien que l'indicateur de stress sur l'eau souterraine appliqué à l'échelle municipale offre un premier aperçu du niveau de stress à l'échelle régionale (voir section 6), il souffre de plusieurs limitations importantes évoquées dans la section 6.4 : (1) les différents types d'usage (agricole, résidentiel et ICI) ne sont pas distingués, (2) les variations saisonnières des prélèvements d'eau (cas particulier des usages maraîchers) ne peuvent donc pas être considérées et (3) l'indicateur « usage/recharge » ne témoigne pas toujours de l'état réel des pressions exercées sur les ressources en eaux souterraines au sein des municipalités puisque l'eau peut provenir de l'extérieur des limites municipales. C'est en considérant ces limitations que l'indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine a été développé dans le cadre du présent rapport (voir section 9). Cet indicateur, développé sur une grille composée de mailles de 250 m, permet d'identifier à l'intérieur des municipalités les secteurs où l'usage est important et de déterminer la présence d'éventuels conflits d'usage de l'eau souterraine puisque les catégories d'usagers y sont différenciées. Les principales limitations de cet indicateur sont reliées aux données d'entrée (voir section 9.5) mais la grille d'usage développée devrait permettre son application sur tout le Québec municipalisé. Le but ultime étant de définir les secteurs où l'usage est important, voire critique, et ce à l'échelle intramunicipale mais également de calculer l'indicateur de stress sur l'eau souterraine (ratio « usage/recharge ») de façon plus réaliste, c'est-à-dire en considérant les limites hydrogéologiques naturelles ; c'est l'objet de la présente section. Cet indicateur de stress pourrait être par la suite appliqué sur l'ensemble du territoire couvert par un ancien projet de caractérisation hydrogéologique (section 11).

10.1 Définition des indicateurs de stress sur l'eau souterraine par bassin

En utilisant les lignes de partage des eaux souterraines définies à partir de la carte piézométrique de l'aquifère rocheux du PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013b), il est possible de délimiter des bassins (niveau 1) et des sous-bassins (niveau 2) versants hydrogéologiques. Entre ces bassins hydrogéologiques, il ne devrait pas y avoir d'échange d'eau souterraine, ce qui offre un avantage indéniable pour le développement de l'indicateur de stress sur l'eau souterraine et permet alors de s'affranchir des quelques approximations ou aberrations identifiées sur la carte de l'indicateur développés à l'échelle municipale (figure 6.1). La représentativité du bilan (usage et recharge) est donc grandement améliorée ; surtout pour les petites municipalités où une grande partie de l'eau souterraine exploitée provient essentiellement de l'extérieur des limites municipales.

En combinant la grille d'usage total lissée (figure 9.10) produite lors du développement de l'indicateur intramunicipal avec la grille de recharge de l'aquifère rocheux extraite du PACES de Montérégie Est (Carrier et al., 2013a), il est alors possible d'attribuer à chaque maille de 250 m un volume d'eau prélevé annuellement et une quantité d'eau contribuant à la recharge de l'aquifère régional rocheux. En additionnant les mailles incluses au sein des mêmes bassins (niveau 1) ou sous-bassins (niveau 2) versants hydrogéologiques, un bilan de la recharge et de l'usage de l'eau souterraine peut alors être fait à l'intérieur des limites naturelles. Afin de dresser un portrait complet de l'état et des conditions d'exploitation des ressources en eau souterraine en Montérégie Est, il a été nécessaire de définir quatre indicateurs spatialement distribués : (1) la recharge moyenne annuelle, (2) l'usage total annuel, (3) le stress sur l'eau souterraine (ratio « usage/recharge ») et (4) la recharge effective (recharge moins l'usage). En combinant ces quatre indicateurs, il est alors possible d'avoir un aperçu (1) de la ressource renouvelable disponible (recharge), (2) de l'importance des usages en termes absolus (usage), (3) de la nature (durable ou limitée) de l'exploitation par rapport à la quantité de ressource disponible (ratio « usage/recharge ») et (4) du volume d'eau souterraine non exploitée et donc disponible pour soutenir le débit de base des cours d'eau ou les écosystèmes (recharge effective). Afin de pouvoir comparer facilement les cartes entre-elles, il a été décidé de conserver les mêmes unités (mm/an) pour la recharge, l'usage et la recharge effective.

Afin de faciliter la lecture des cartes produites, des seuils ont été définis pour ces quatre indicateurs. Pour estimer la quantité de ressource renouvelable (recharge), les cinq seuils suivants sont utilisés : (1) très faible (0-20 mm/an), (2) limitée (20-50 mm/an), (3) modérée (50-100 mm/an), (4) bonne (100-200 mm/an) et (5) élevée (≥ 200 mm/an). La définition de ces seuils est basée sur les études auparavant menées par l'INRS (PACES et autres) et un certain jugement professionnel. En effet, les secteurs au nord de la Montérégie Est où de l'argile marine est présente sont associés à une recharge très faible (moins de 20 mm/an). La présence de dépôts peu perméables se traduit généralement par une recharge dite « limitée » (entre 20 et 50 mm/an). La recharge est, à l'inverse, qualifiée d'élevée lorsqu'elle dépasse les 200 mm/an. La recharge est finalement qualifiée de modérée à bonne quand elle approche les 100 mm/an d'où les classes « modérée » (50 à 100 mm/an) et « bonne » (100 à 200 mm/an). La définition de ces classes devrait être adaptée au reste du Québec municipalisé puisqu'elles couvrent assez largement les 25^e (91 mm/an) et 75^e (327 mm/an) percentiles des huit projets régionaux définissant la recharge réelle du roc (voir section 11.2). La Montérégie Est est un cas particulier intéressant puisqu'une large zone d'argile marine est présente au nord du territoire, ce qui a permis la définition des classes de recharge très faible à limitée. En effet, les 25^e (8 mm/an) et 75^e (204 mm/an) percentiles de la carte de recharge du roc y sont plus faibles qu'ailleurs.

Le niveau d'exploitation en termes absolus est défini par l'usage traduit ici en hauteur d'eau (mm/an). Il est possible de passer facilement aux $\text{m}^3/\text{an}/\text{km}^2$ en multipliant l'usage en mm/an par un facteur 1 000 ($[\text{m}^3/\text{an}/\text{km}^2] = [\text{mm}/\text{an}] * 1\,000$) puis de calculer le volume total d'usage dans un bassin donné en m^3/an en intégrant la superficie du bassin ($[\text{m}^3/\text{an}] = [\text{mm}/\text{an}] * \text{Superficie totale en km}^2 * 1\,000$). Les cinq classes utilisées pour définir le niveau d'exploitation de l'eau souterraine ont été établies comme suit : (1) très faible (0-5 mm/an), (2) faible (5-10 mm/an), (3) modéré (10-20 mm/an), (4) élevé (20-40 mm/an) et (5) très élevé (≥ 40). Ces seuils ont été déterminés à la fois par étude statistique des données d'usage de l'eau souterraine des 77 bassins versants hydrogéologiques et par jugement professionnel afin d'être représentatifs des niveaux d'usage ailleurs dans la province. D'ailleurs, en appliquant ces cinq seuils d'usage dans un secteur sous stress important localisé en Montérégie Ouest (Ballard et al., 2021), il est possible d'identifier de manière adéquate les municipalités ayant un niveau d'exploitation important (élevé à très élevé). Ce constat révèle donc que l'indicateur du niveau d'exploitation de la ressource en eau souterraine est adapté à la fois sur une région d'usage faible à modéré (la Montérégie Est) et sur une zone d'usage important (cas particulier de Saint-Rémi en Montérégie Ouest ; voir Ballard et al., 2021).

L'indicateur de stress sur l'eau souterraine traduit par le ratio « usage/recharge » a lui aussi été converti en cinq classes : (1) faible (0-5%), (2) modéré (5-10%), (3) élevé (10-20%), (4) non durable (20-40%) et (5) surexploitation (≥ 40). Les seuils définis ici correspondent à ceux définis par Raskin (1997) et déjà mis en œuvre à l'échelle municipale en Montérégie Est (voir section 6). Selon Raskin (1997), le stress sur l'eau souterraine est considéré comme non significatif quand il est inférieur à 10% tandis que le seuil à 20% marque un début d'exploitation de la recharge pouvant être limitant pour le développement économique local ; c'est ainsi que la classe « non durable » a été définie (20 à 40%). Toujours selon Raskin (1997), le niveau d'usage devient important lorsqu'il dépasse les 40% de la recharge définissant alors des conditions de « surexploitation » de la ressource. Seul le seuil à 15% a été écarté ici car il n'apportait pas d'information supplémentaire pertinente sur la répartition du niveau de stress sur l'eau souterraine dans les bassins versants hydrogéologiques. Lorsqu'appliquées sur la zone de Mercier en Montérégie Ouest (Ballard et al., 2021), ces seuils permettent également de cerner adéquatement les secteurs sous stress important, ce qui montre que les classes utilisées ici sont adaptées à divers contextes d'exploitation. Afin de compléter cet indicateur de stress sur l'eau souterraine, un critère a été ajouté pour définir si la ressource est « marginale » ou « exploitable ». Une ressource est qualifiée de « marginale » quand elle combine moins de 20 mm/an de recharge (ressource renouvelable faible) et moins de 5 mm/an d'usage (niveau d'exploitation très faible). Pour les bassins versants hydrogéologiques correspondant à une ressource « marginale », le ratio « usage/recharge » ne doit pas être analysé tel quel puisque la ressource est à la fois limitée et faiblement exploitée. La ressource est considérée comme « exploitable » pour le reste des bassins versants hydrogéologiques ne combinant pas ces deux critères.

Le dernier indicateur correspond à la recharge effective, soit à la recharge soustraite de l'usage. Cette quantité correspond alors au volume annuel d'eau souterraine pouvant contribuer aux rivières et aux écosystèmes dans un bassin versant hydrogéologique donné. Afin d'assurer une certaine continuité avec les classes de recharge (ressource disponible), les seuils définis pour la recharge effective sont similaires hormis l'ajout d'un seuil où la contribution aux cours d'eau et aux écosystèmes est considérée comme nulle (≤ 0 mm/an). Ce quatrième indicateur est intéressant puisqu'il peut être comparé à la ressource disponible avant usage (recharge) et donc déterminer les bassins versants hydrogéologiques dans lesquels l'usage est d'importance et peut avoir un impact sur les débits de base des cours d'eau et le maintien des écosystèmes.

Certaines portions de bassins versants hydrogéologiques en bordure de la Montérégie Est n'ont pas été considérées dans les bilans et la mise en œuvre des indicateurs de stress (portions grisées sur les cartes des figures 10.1 à 10.4 de la section suivante). Cela crée quelques lacunes spatiales sur les limites du territoire mais assure une certaine représentativité des résultats en écartant les petits bassins hydrogéologiques. Pour éviter cet aléa, il faudrait disposer d'une carte piézométrique débordant des limites de la région pour inclure intégralement l'ensemble des bassins et des sous-bassins versants hydrogéologiques.

Avant d'appliquer ces quatre indicateurs sur le territoire de la Montérégie Est, il est nécessaire de tenir compte de la présence d'une zone d'eau saumâtre dans l'aquifère rocheux impropre à la consommation au nord du territoire. Cette zone est délimitée par un trait rouge sur les cartes des figures 10.1 à 10.4 de la présente section. Au sein de cette zone, la recharge est limitée voire même très faible et l'alimentation en eau potable est assurée par l'eau de surface ; les quelques préleveurs d'eau souterraine puisent leur eau dans des aquifères granulaires de surface à partir de points de prélèvement dédiés généralement à l'agriculture. Ainsi, dans cette large zone, il n'y a pas de relation entre l'usage de l'eau souterraine (dans les aquifères granulaires) et la recharge de l'aquifère rocheux. Par conséquent, l'indicateur de stress sur l'eau souterraine pour les bassins versants hydrogéologiques localisés à l'intérieur de cette zone d'eau impropre à la consommation n'est pas valide et ne devrait pas être considéré dans l'analyse des cartes (figures 10.1 à 10.4 de la section 10.2).

10.2 Application à la Montérégie Est

Afin de tester l'applicabilité de ces indicateurs en Montérégie Est, les bassins versants hydrogéologiques de niveau 1 et 2 ont été considérés. Contrairement aux bassins de niveau 1 pouvant atteindre les 1 888 km² (cas de celui de la rivière Richelieu), les bassins de niveau 2 paraissent mieux adaptés à la définition des indicateurs de stress sur l'eau souterraine. En effet, leurs superficies offrent un niveau de détail suffisant s'approchant le plus des surfaces des municipalités de Montérégie Est, sachant que cette échelle a été sélectionnée comme la plus représentative lors de la mise en œuvre de l'indicateur de stress sur l'eau souterraine (voir section 6 et tableau 10.1).

Tableau 10.1 : Comparatif des surfaces de définition de l'indicateur de stress sur l'eau souterraine

Données		Bassins versants hydrogéologiques		Municipalités
		Niveau 1	Niveau 2	
Nombre		20	77	153
Aire (km ²)	Minimum	4	3	0 ¹
	25 ^e	15	20	33
	Médiane	96	80	58
	75 ^e	508	151	78
	Maximum	1 888	902	249
	Moyenne	441	115	61

1 : les statistiques considèrent les surfaces municipales incluses en Montérégie Est d'où la présence de secteurs de faibles étendues amenant à la valeur 0 avec la valeur approchée (en fait 0.28 km²).

Une brève description des indicateurs des stress sur l'eau souterraine en considérant les bassins versants hydrogéologiques de niveau 1 a néanmoins été produite ici. Il est d'ailleurs possible de voir chacune des cartes produites à cette échelle dans l'annexe 11 : (1) quantité de ressource disponible (carte A.11.1), (2) niveau d'exploitation (carte A.11.2), (3) niveau relatif d'exploitation (carte A.11.3) et (4) niveau des ressources après exploitation (carte A.11.4). À partir de ces quatre cartes d'indicateur, il est possible de décrire sommairement le niveau de stress sur l'eau souterraine pour les 20 bassins versants hydrogéologiques de niveau 1 (voir les tableaux 10.2 à 10.5).

La carte de recharge (carte A.11.1) indique une quantité de ressource renouvelable généralement très faible à modérée en bordure du fleuve et dans la zone d'eau saumâtre où la circulation d'eau souterraine est limitée. Elle est également modérée le long de la rivière Richelieu et sur une portion de la rivière Noire. Sur 12 des 20 bassins versants hydrogéologiques de niveau 1, essentiellement ceux situés au sud-est de la région, la recharge est plus importante et qualifiée de bonne (tableau 10.1). À cette échelle, aucun bassin ne peut être classé dans la classe de recharge élevée.

Quant à l'usage (carte A.11.2), le fait d'utiliser cette échelle de visualisation montre bien qu'elle n'est pas adaptée puisqu'elle « lisse » le niveau d'exploitation et ne permet pas de distinguer les secteurs sous avec un niveau d'usage important. Hormis une exception locale à l'ouest de la région d'étude où le niveau d'usage est très élevé, les 19 bassins de niveau 1 restants reflètent un niveau d'usage absolu faible (5 bassins) ou très faible (14 bassins). Les classes d'usage modéré et élevé ne sont pas représentées à cette échelle (tableau 10.3). De plus, il n'est pas possible de distinguer sur la carte les secteurs où l'usage de l'eau souterraine est normalement peu important, c'est-à-dire dans les limites de la zone d'eau saumâtre, soit sur un secteur couvrant 2 200 km² au nord de la région.

En utilisant alors l'indicateur « usage/recharge » (carte A.11.3), le niveau relatif d'exploitation est globalement faible à l'est et au sud-est de la région (tableau 10.4). Ce niveau d'usage est généralement modéré sur le reste des bassins versants hydrogéologiques de niveau 1 en dehors de la zone d'eau saumâtre ; hormis pour la rivière l'Acadie à l'ouest (niveau d'exploitation élevé) et un petit bassin souterrain sur la bordure ouest du territoire d'étude où l'usage entraîne une surexploitation de la ressource en eau souterraine. Dans la zone d'eau saumâtre, il n'est pas possible d'analyser cet indicateur puisque l'usage de l'eau souterraine se fait à partir d'aquifères granulaires superficiels. D'ailleurs, la ressource est considérée comme marginale pour deux bassins versants hydrogéologiques le long du fleuve Saint-Laurent.

Finalement, la carte de recharge effective (carte A.11.4) est intéressante, surtout lorsqu'elle est comparée à la carte de recharge initiale (carte A.11.1). Pour le petit bassin à l'ouest du territoire, le niveau d'exploitation est tel que la recharge ne permet pas de compenser les volumes d'eau prélevés annuellement (tableau 10.5). De plus, le niveau d'exploitation sur le bassin de la rivière Richelieu semble également limiter le volume d'eau disponible après exploitation (initialement, le bassin était classé avec une recharge modérée mais présente ici une recharge effective limitée). Il s'est donc intéressant d'estimer ainsi le changement de l'apport d'eau souterraine résultant de son usage à l'échelle des bassins versants hydrogéologiques de niveau 1 qui couvrent un plus grand territoire.

Une compilation des conditions rencontrées dans chaque bassin versant hydrogéologique de niveau 1 a également été produite (tableaux 10.6 et 10.7). Cette dernière fournit des informations relatives aux caractéristiques de ces bassins (tableau 10.6) : superficie totale et proportion incluse dans la zone d'eau saumâtre ainsi que le nombre de puits (résidentiels, municipaux et grands préleveurs d'eau souterraine) recensés. De plus, le classement des 20 bassins versants hydrogéologiques de niveau 1 identifiés en Montérégie Est selon les quatre indicateurs de stress sur l'eau souterraine est également compilé dans le tableau 10.7. Cette même compilation a été faite pour les bassins versants hydrogéologiques de niveau 2 (voir les tableaux A.12.1 à 12.5 de l'annexe 12).

Tableau 10.2 : Quantité de ressource disponible (recharge de l'eau souterraine) en Montérégie Est pour les bassins hydrogéologiques de niveau 1

Recharge (mm/an)	Ressource renouvelable	Nombre de bassins	Ratio (%)
0 - 20	Très faible	2	10.0
20 - 50	Limitée	2	10.0
50 - 100	Modérée	4	20.0
100 - 200	Bonne	12	60.0
≥ 200	Élevée	0	0.0

Tableau 10.3 : Niveau d'usage (usage absolu de l'eau souterraine) en Montérégie Est pour les bassins hydrogéologiques de niveau 1

Usage (mm/an)	Niveau d'exploitation	Nombre de bassins	Ratio (%)
0 - 5	Très faible	14	70.0
5 - 10	Faible	5	25.0
10 - 20	Modéré	0	0.0
20 - 40	Élevé	0	0.0
≥ 40	Très élevé	1	5.0

Tableau 10.4 : Aspect durable de l'exploitation des eaux souterraines (ratio usage/recharge) en Montérégie Est pour les bassins hydrogéologiques de niveau 1

Ratio usage/recharge (%)	Niveau relatif d'exploitation	Nombre de bassins ¹	Ratio (%)
0 - 5	Faible	12 (1)	60.0
5 - 10	Modéré	4 (0)	20.0
10 - 20	Élevé	2 (0)	10.0
20 - 40	Non durable	1 (1)	5.0
≥ 40	Surexploitation	1 (0)	5.0

1 : le nombre de bassins où la ressource est considérée comme marginale est indiqué entre parenthèses.

Tableau 10.5 : Niveau des ressources en eau souterraine après exploitation (recharge effective) en Montérégie Est pour les bassins hydrogéologiques de niveau 1

Recharge effective (mm/an)	Contribution aux rivières et aux écosystèmes	Nombre de bassins ¹	Ratio (%)
≤ 0	Nulle	1 (+1)	5.0
0 - 20	Très faible	2 (0)	10.0
20 - 50	Limitée	3 (+1)	15.0
50 - 100	Modérée	2 (-2)	10.0
100 - 200	Bonne	12 (0)	60.0
≥ 200	Élevée	0 (0)	0.0

1 : la différence avec la ressource renouvelable (recharge du tableau 10.2) est indiquée entre parenthèses.

Note : il est possible de convertir les données ici en mm/an vers les m³/an/km² en appliquant la formule suivante : [m³/an/km²] = [mm/an] * 1 000

Tableau 10.6 : Statistiques descriptives (aire et points de prélèvement) des bassins hydrogéologiques de niveau 1 en Montérégie Est (1/2)

ID	Nom du bassin hydrogéologique de niveau 1	Aire			Points de prélèvement des eaux souterraines					
		Total	Zone d'eau saumâtre		Captages municipaux		GPE souterrains		Puits résidentiels	
		km ²	km ² (1)	Ratio (%) ⁽²⁾	Nombre	Densité (nb/km ²)	Nombre	Densité (nb/km ²)	Nombre	Densité (nb/km ²) ⁽³⁾
1	Acadie	399	0	0.0	4	0.01	32	0.08	1543	3.87
19	Aux Brochets	757	0	0.0	4	0.01	11	0.01	2333	3.08
2	Châteauguay	34	0	0.0	0	0.00	6	0.18	71	2.09
20	De la Roche	41	0	0.0	0	0.00	0	0.00	119	2.87
3	Fleuve (section 01)	28	28	98.0	0	0.00	0	0.00	16	0.57
4	Fleuve (section 02)	230	189	82.1	0	0.00	6	0.03	278	1.21
5	Lac Champlain	4	0	0.0	0	0.00	0	0.00	26	6.08
6	Missisquoi	424	0	0.0	1	0.00	3	0.01	795	1.87
7	Noire (basse)	403	0	0.0	7	0.02	24	0.06	3091	7.67
8	Noire (haute)	1074	0	0.0	3	0.00	6	0.01	2212	2.06
9	Richelieu	1888	807	42.7	5	0.00	52	0.03	4497	2.38
10	Saint-François (section 01)	15	0	0.0	0	0.00	0	0.00	71	4.78
11	Saint-François (section 02)	8	0	0.0	0	0.00	0	0.00	49	6.44
12	Saint-Jacques (section 01)	11	0	0.0	0	0.00	0	0.00	16	1.50
13	Saint-Jacques (section 02)	8	0	0.0	0	0.00	2	0.25	33	4.14
14	Saint-Jacques (section 03)	14	0	0.0	0	0.00	0	0.00	22	1.63
15	Saint-Jacques (section 04)	20	0	0.0	0	0.00	0	0.00	17	0.85
16	Sutton	150	0	0.0	2	0.01	1	0.01	322	2.15
17	Yamaska (basse)	1740	1037	59.6	14	0.01	32	0.02	2853	1.64
18	Yamaska (haute)	1574	11	0.7	24	0.02	54	0.03	6015	3.82

1 : lorsqu'il y a présence d'eau saumâtre, la case est grisée et la valeur est affichée en italiques ;

2 : lorsque la proportion d'eau saumâtre est supérieure à 10%, la case est grise et la valeur affichée en italiques ;

3 : lorsque la densité de puits est supérieure à 5 par km², la case est grisée et si la densité est supérieure à 10 puits par km², alors la valeur est affichée en italiques.

Tableau 10.7 : Statistiques descriptives (indicateurs de stress sur l'eau souterraine) des bassins hydrogéologiques de niveau 1 en Montérégie Est (2/2)

ID	Nom du bassin hydrogéologique de niveau 1	Recharge		Usage		Ratio usage/recharge		Disponibilité de la ressource	Recharge effective	
		mm/an	Indice	mm/an	Indice	%	Indice		mm/an ⁽¹⁾	Indice ⁽²⁾
1	Acadie	78	Modérée	9	Faible	10.9	Élevé	Exploitable	70	Modérée
19	Aux Brochets	131	Bonne	7	Faible	5.2	Modéré	Exploitable	124	Bonne
2	Châteauguay	124	Bonne	4	Très faible	3.5	Faible	Exploitable	120	Bonne
20	De la Roche	146	Bonne	8	Faible	5.2	Modéré	Exploitable	138	Bonne
3	Fleuve (section 01)	6	Très faible	0	Très faible	0.6	Faible	Marginale	6	Très faible
4	Fleuve (section 02)	13	Très faible	4	Très faible	31.8	Non durable	Marginale	9	Très faible
5	Lac Champlain	113	Bonne	2	Très faible	2.0	Faible	Exploitable	111	Bonne
6	Missisquoi	176	Bonne	1	Très faible	0.6	Faible	Exploitable	175	Bonne
7	Noire (basse)	90	Modérée	8	Faible	8.6	Modéré	Exploitable	82	Modérée
8	Noire (haute)	130	Bonne	3	Très faible	2.2	Faible	Exploitable	127	Bonne
9	Richelieu	50	Modérée	4	Très faible	7.1	Modéré	Exploitable	47	Limitée
10	Saint-François (section 01)	191	Bonne	1	Très faible	0.6	Faible	Exploitable	190	Bonne
11	Saint-François (section 02)	169	Bonne	2	Très faible	1.3	Faible	Exploitable	167	Bonne
12	Saint-Jacques (section 01)	165	Bonne	2	Très faible	1.4	Faible	Exploitable	162	Bonne
13	Saint-Jacques (section 02)	93	Modérée	164	Très élevé	176.6	Surexploitation	Exploitable	-71	Nulle
14	Saint-Jacques (section 03)	101	Bonne	1	Très faible	0.5	Faible	Exploitable	101	Bonne
15	Saint-Jacques (section 04)	48	Limitée	0	Très faible	0.2	Faible	Exploitable	48	Limitée
16	Sutton	181	Bonne	3	Très faible	1.5	Faible	Exploitable	179	Bonne
17	Yamaska (basse)	30	Limitée	3	Très faible	10.4	Élevé	Exploitable	27	Limitée
18	Yamaska (haute)	152	Bonne	6	Faible	3.8	Faible	Exploitable	147	Bonne

1 : lorsque la recharge effective est inférieure à 0, la case est grisée et la valeur affichée en italiques ;

2 : lorsque qu'il y a une différence entre la classe de ressource disponible initialement (recharge) et la ressource disponible après usage (recharge effective), la valeur est soulignée.

Note : il est possible de convertir les données ici en mm/an vers les m³/an/km² et les m³/an en appliquant les formules suivantes : [m³/an/km²] = [mm/an] * 1 000 et [m³/an] = [mm/an] * Superficie totale en km² * 1 000

Comme expliqué au début de la présente section, l'échelle des bassins versants hydrogéologiques de niveau 2 paraît la plus adaptée à une analyse des indicateurs de stress sur l'eau souterraine. Les cartes produites à cette échelle (figures 10.3 à 10.6) seront donc décrites ici plus en détail. Les cartes de base sont également affichées afin de montrer le passage vers les indicateurs qui permettent de mieux lire le niveau de stress sur la ressource en eau souterraine à une échelle adaptée tout en considérant les limites naturelles (celle des bassins versants hydrogéologiques de niveau 2) : (1) la carte de recharge (figure 10.1) extraite des livrables du PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013b) qui a permis de définir la quantité de ressource disponible (recharge) et (2) la carte de l'usage total de l'eau souterraine (figure 10.2) produite lors de la mise en œuvre de l'indicateur intramunicipal de l'eau souterraine (voir section 9 et figure 9.10).

Au nord de la Montérégie Est, la recharge est généralement très faible (0-20 mm/an) à limitée (20-50 mm/an) pour 30% des sous-bassins versants hydrogéologiques (tableau 10.8), essentiellement situés dans la zone d'eau saumâtre mais également le long de la rivière Richelieu (figure 10.3), soit là où une épaisse couche argileuse limite la recharge de l'aquifère rocheux. En périphérie de ces bassins, une zone de transition fait en sorte que la recharge est modérée (50-100 mm/an) pour 20% des bassins situés au sud-ouest et à l'est du territoire. Le sud-est de la Montérégie Est constitue la zone de recharge principale de la région, il est donc normal d'y retrouver une majorité de bassins (49%) avec une bonne recharge (100-200 mm/an). Seul un bassin versant hydrogéologique de niveau 2 (« Aux Brochets (e) » – voir tableau A.12.1 de l'annexe 12) en bordure de la frontière américaine affiche un niveau de recharge élevée (≥ 200 mm/an).

Comparativement à la carte de l'usage total de l'eau souterraine réparti sur les bassins versants hydrogéologiques de niveau 1 (carte A.11.2 de l'annexe 11), celle des bassins de niveau 2 (figure 10.4) permet vraiment de cibler les zones où l'usage est important sans que le volume d'eau souterraine prélevé ne soit réparti et donc « dilué » sur un large territoire. Comme mentionné précédemment, le niveau d'usage de l'eau souterraine est globalement très faible (0-5 mm/an) à faible (5-10 mm/an) pour la plupart (92%) des bassins versants hydrogéologiques de niveau 2 de la région (tableau 10.9). Pour le reste des sous-bassins (8%), l'usage est modéré (10-20 mm/an) pour quatre d'entre eux (« Acadie (c) », « Noire (basse - b) », « Richelieu (b) » et « Yamaska (haute - c) »). La proposition de planche cartographique (voir section 10.3) offre la possibilité d'identifier plus précisément les catégories d'usagers de l'eau souterraine au sein de ces bassins où l'usage est modéré. Pour le bassin de niveau 2 « Richelieu (b) », ce sont surtout des captages ICI et municipaux tandis que pour la « Yamaska (haute - c) », c'est essentiellement l'usage municipal qui est d'importance (et dans une moindre mesure l'usage ICI). Pour le sous-bassin « Noire (basse - b) », c'est à la fois l'usage ICI et municipal mais également une forte densité de puits résidentiels qui entraîne ce niveau d'usage. Quant au bassin « Acadie (c) », c'est le cumul de nombreux points de prélèvements des eaux souterraines des trois catégories (agricole, ICI et municipal) qui induit cet usage modéré de la ressource. Le niveau d'usage absolu est élevé (20-40 mm/an) sur le sous-bassin « Aux Brochets (g) » et même très élevé (≥ 40 mm/an) sur le bassin de niveau 2 « Saint-Jacques (section 02) ». Pour ces deux bassins versants hydrogéologiques de niveau 2, cet usage est relié à la présence de points de captage ICI.

La carte de l'indicateur de stress sur l'eau souterraine basé sur le rapport « usage/recharge » (figure 10.5) permet de juger si le niveau d'exploitation de l'eau souterraine est fait de manière durable dans les sous-bassins hydrogéologiques. Comme indiqué dans la section 6 (se référer aussi à Raskin, 1997), le niveau d'exploitation est non significatif lorsqu'il est inférieur à 10% soit dans 83% des bassins versants hydrogéologiques de niveau 2 définis en Montérégie Est (tableau 10.10). Toujours selon Raskin (1997), le niveau d'exploitation de la recharge n'est plus durable lorsque le ratio « usage/recharge » dépasse les 20%. Cela ne concerne aucun bassin versant hydrogéologique de niveau 2 en Montérégie Est. Par contre, il y a surexploitation de la ressource (ratio supérieur à 40%) pour trois sous-bassins. Toutefois, deux de ces trois sous-bassins sont entièrement inclus dans la zone d'eau saumâtre là où l'aquifère rocheux ne constitue pas la ressource en eau principale. L'un de ces deux sous-bassins est même concerné par une ressource dite « marginale », c'est-à-dire caractérisée par une recharge très faible (0-20 mm/an) et un niveau d'usage également très faible (0-5 mm/an). Les quelques bassins où la ressource est qualifiée de marginale ou majoritairement inclus dans la zone d'eau saumâtre ne doivent pas être considérée comme problématique lors de l'analyse du niveau de stress sur l'eau souterraine de l'aquifère régional rocheux.

Tableau 10.8 : Quantité de ressource disponible (recharge de l'eau souterraine) en Montérégie Est pour les bassins hydrogéologiques de niveau 2

Recharge (mm/an)	Ressource renouvelable	Nombre de bassins	Ratio (%)
0 - 20	Très faible	17	22.1
20 - 50	Limitée	6	7.8
50 - 100	Modérée	15	19.5
100 - 200	Bonne	38	49.4
≥ 200	Élevée	1	1.3

Tableau 10.9 : Niveau d'usage (usage absolu de l'eau souterraine) en Montérégie Est pour les bassins hydrogéologiques de niveau 2

Usage (mm/an)	Niveau d'exploitation	Nombre de bassins	Ratio (%)
0 - 5	Très faible	61	79.2
5 - 10	Faible	10	13.0
10 - 20	Modéré	4	5.2
20 - 40	Élevé	1	1.3
≥ 40	Très élevé	1	1.3

Tableau 10.10 : Aspect durable de l'exploitation des eaux souterraines (ratio usage/recharge) en Montérégie Est pour les bassins hydrogéologiques de niveau 2

Ratio usage/recharge (%)	Niveau relatif d'exploitation	Nombre de bassins ¹	Ratio (%)
0 - 5	Faible	53 (12)	68.8
5 - 10	Modéré	11 (2)	14.3
10 - 20	Élevé	10 (1)	13.0
20 - 40	Non durable	0	0.0
≥ 40	Surexploitation	3 (1)	3.9

1 : le nombre de bassins où la ressource est considérée comme marginale est indiqué entre parenthèses.

Tableau 10.11 : Niveau des ressources en eau souterraine après exploitation (recharge effective) en Montérégie Est pour les bassins hydrogéologiques de niveau 2

Recharge effective (mm/an)	Contribution aux rivières et aux écosystèmes	Nombre de bassins ¹	Ratio (%)
≤ 0	Nulle	2 (+2)	2.6
0 - 20	Très faible	16 (-1)	20.8
20 - 50	Limitée	7 (+1)	9.1
50 - 100	Modérée	15 (0)	19.5
100 - 200	Bonne	36 (-2)	46.8
≥ 200	Élevée	1 (0)	1.3

1 : la différence avec la ressource renouvelable (recharge du tableau 10.8) est indiquée entre parenthèses.

Note : il est possible de convertir les données ici en mm/an vers les m³/an/km² en appliquant la formule suivante :
 $[m^3/an/km^2] = [mm/an] * 1\,000$

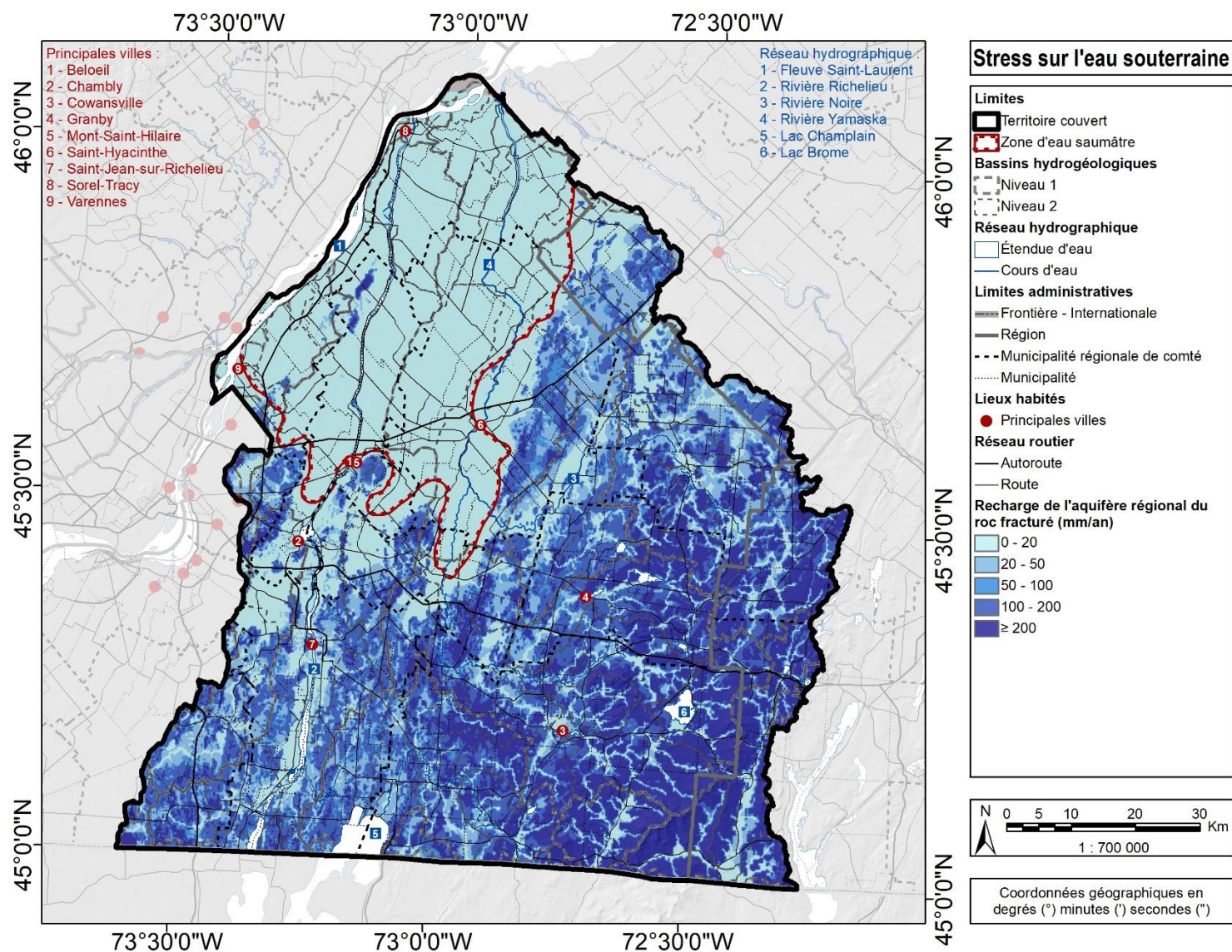


Figure 10.1 : Carte de la recharge utilisée pour produire l'indicateur de quantité de ressource disponible en Montérégie Est (voir figure 10.3)

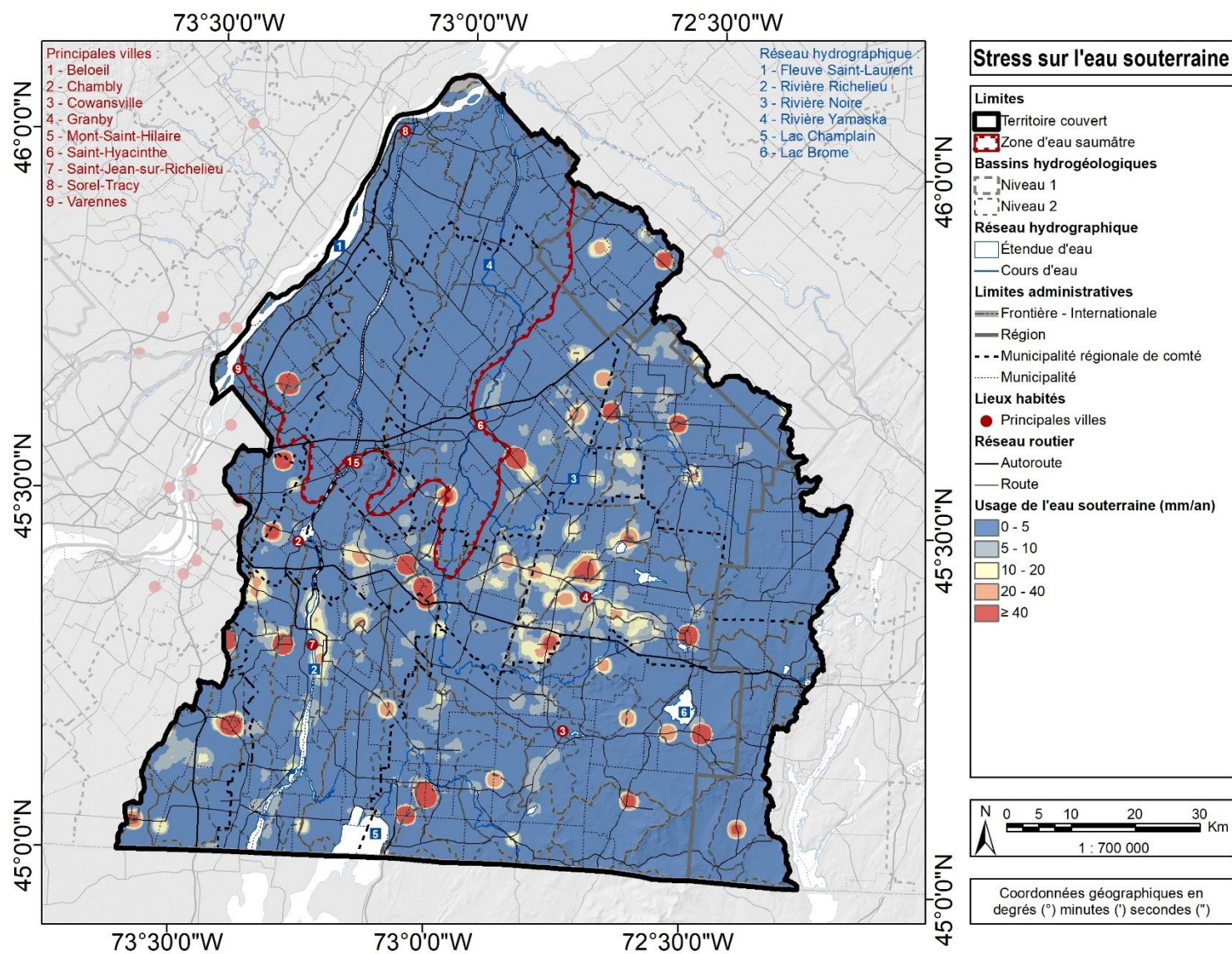


Figure 10.2 : Carte de l'usage total lissé utilisée pour produire l'indicateur de niveau d'usage absolu en Montérégie Est (voir figure 10.4)

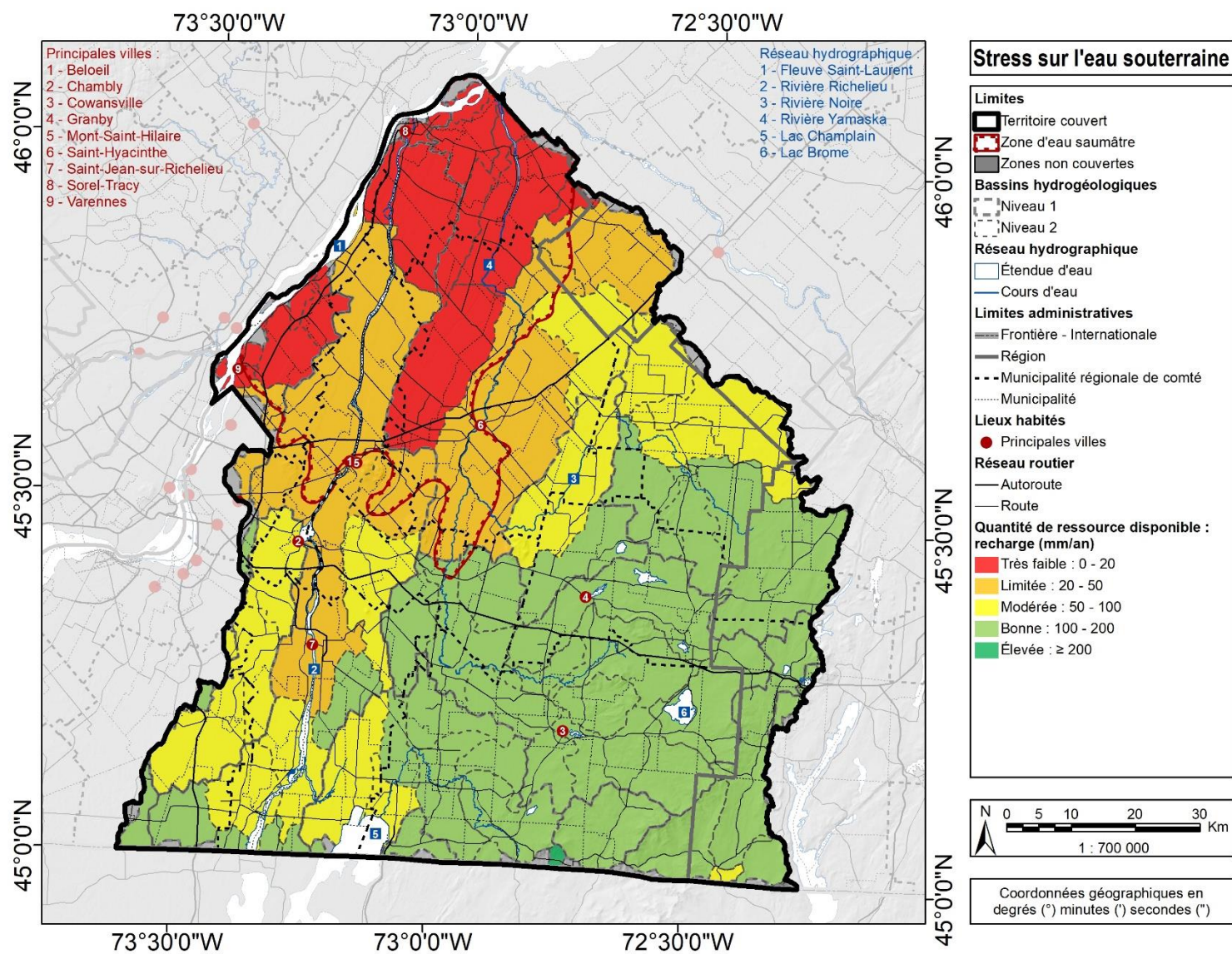


Figure 10.3 : Quantité de ressource disponible (recharge) par bassin hydrogéologique de niveau 2 en Montérégie Est

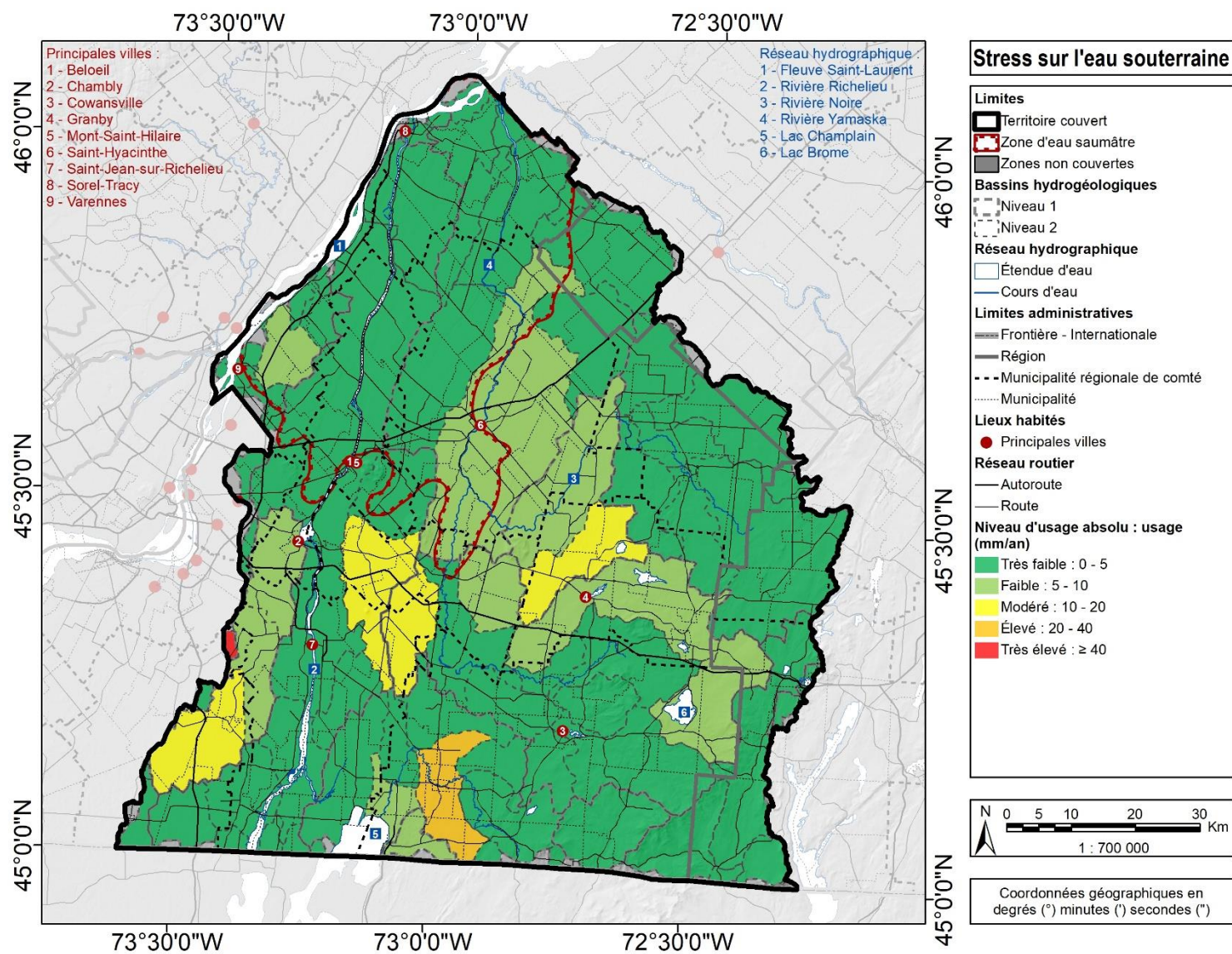


Figure 10.4 : Niveau d'usage absolu (usage) par bassin hydrogéologique de niveau 2 en Montérégie Est

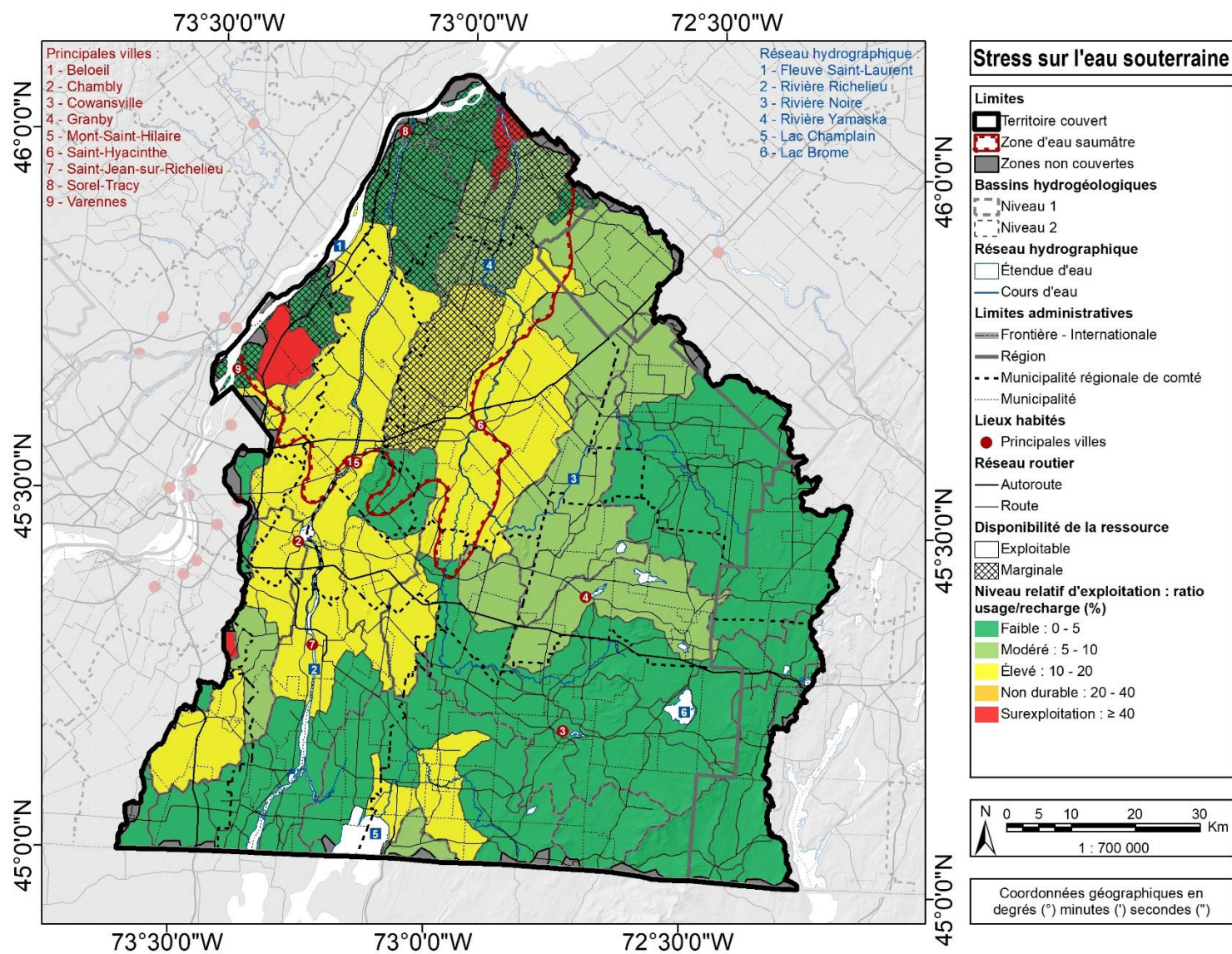


Figure 10.5 : Niveau relatif d'exploitation (ratio usage/recharge) par bassin hydrogéologique de niveau 2 en Montérégie Est

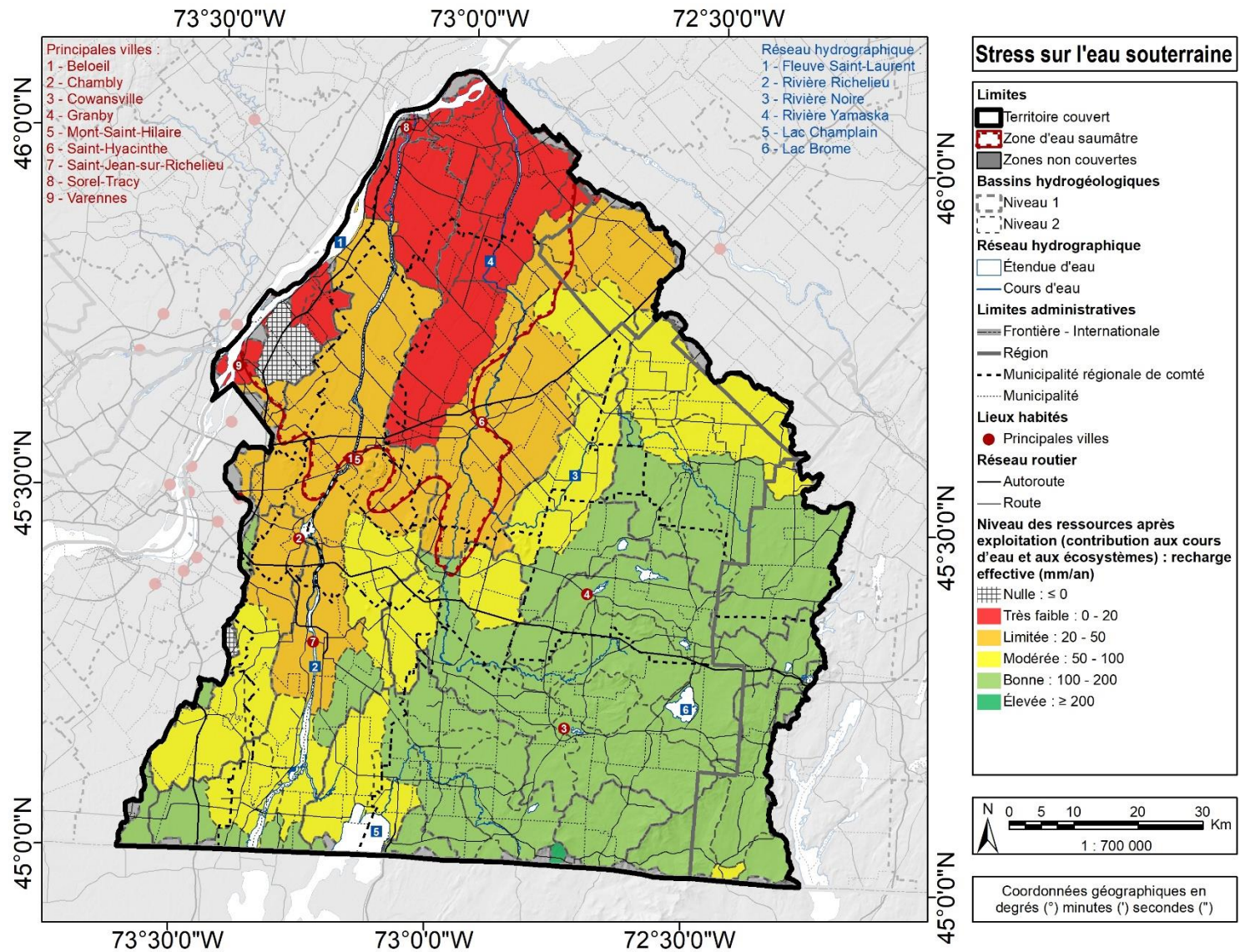


Figure 10.6 : Niveau des ressources après exploitation (recharge effective) par bassin hydrogéologique de niveau 2 en Montérégie Est

Toujours en considérant l'indicateur de stress sur l'eau souterraine (carte de la figure 10.5), un seul bassin versant hydrogéologique de niveau 2 peut être effectivement considéré en surexploitation (usage supérieur à 40 mm/an) localisé sur la limite ouest de la région d'étude. Il s'agit du sous-bassin « Saint-Jacques (section 02) » (voir tableau A.12.4 de l'annexe 12) de faible étendue (8 km²) qui comprend deux GPE ICI correspondant à des carrières. Ces deux GPE contribuent à un niveau d'exploitation très élevé (164 mm/an) excédant alors la recharge modérée (93 mm/an) sur ce sous-bassin. Comme ce sous-bassin est de petite taille et localisé en bordure du territoire cartographié, il est nécessaire de faire une évaluation plus détaillée de ce sous-bassin. Il serait d'ailleurs préférable de refaire l'exercice de production de la carte piézométrique à plus large échelle, soit en dépassant les limites du projet pour éviter les effets de bordure, pour s'assurer de la bonne représentativité des limites des bassins souterrains (voir section 11.3).

La carte de la figure 10.6 montre la recharge effective obtenue par soustraction de l'usage à la recharge totale. Cette dernière carte indique alors le niveau des ressources en eau souterraine après exploitation pouvant être assimilé à la contribution aux cours d'eau et aux écosystèmes. Cet indicateur a d'ailleurs déjà été appliqué en Montérégie Ouest (Ballard et al., 2021). Cette carte est assez semblable à la carte initiale de recharge de l'aquifère rocheux (voir figure 10.3). Cependant, plusieurs bassins versants hydrogéologiques de niveau 2 ont été « déclassés » (tableau 10.11) par rapport à leurs classes initiales (voir tableau 10.8). Il y a évidemment le sous-bassin « Saint-Jacques (section 02) » dont la ressource disponible hors usage (93 mm/an) est passée de modérée à nulle après considération de la quantité d'eau extraite (164 mm/an). Pour les quatre autres sous-bassins en bordure du fleuve, un autre sous-bassin nommé « Fleuve – section 02 – f) » (voir tableau A.12.2 de l'annexe 12) a une recharge effective « nulle » mais ce dernier est intégralement situé dans la zone d'eau saumâtre. Deux sous-bassins sont passés d'une bonne recharge (100-200 mm/an) à une recharge effective modérée (50-100 mm/an) : « Yamaska (haute – À la Barbutte) » et « Yamaska (haute – c) ». Finalement, le bassin versant hydrogéologique de niveau 2 « Acadie (a) » a été reclassé dans la catégorie de recharge limitée (20-50 mm/an) alors qu'il était initialement dans la classe de recharge modérée (50-100 mm/an).

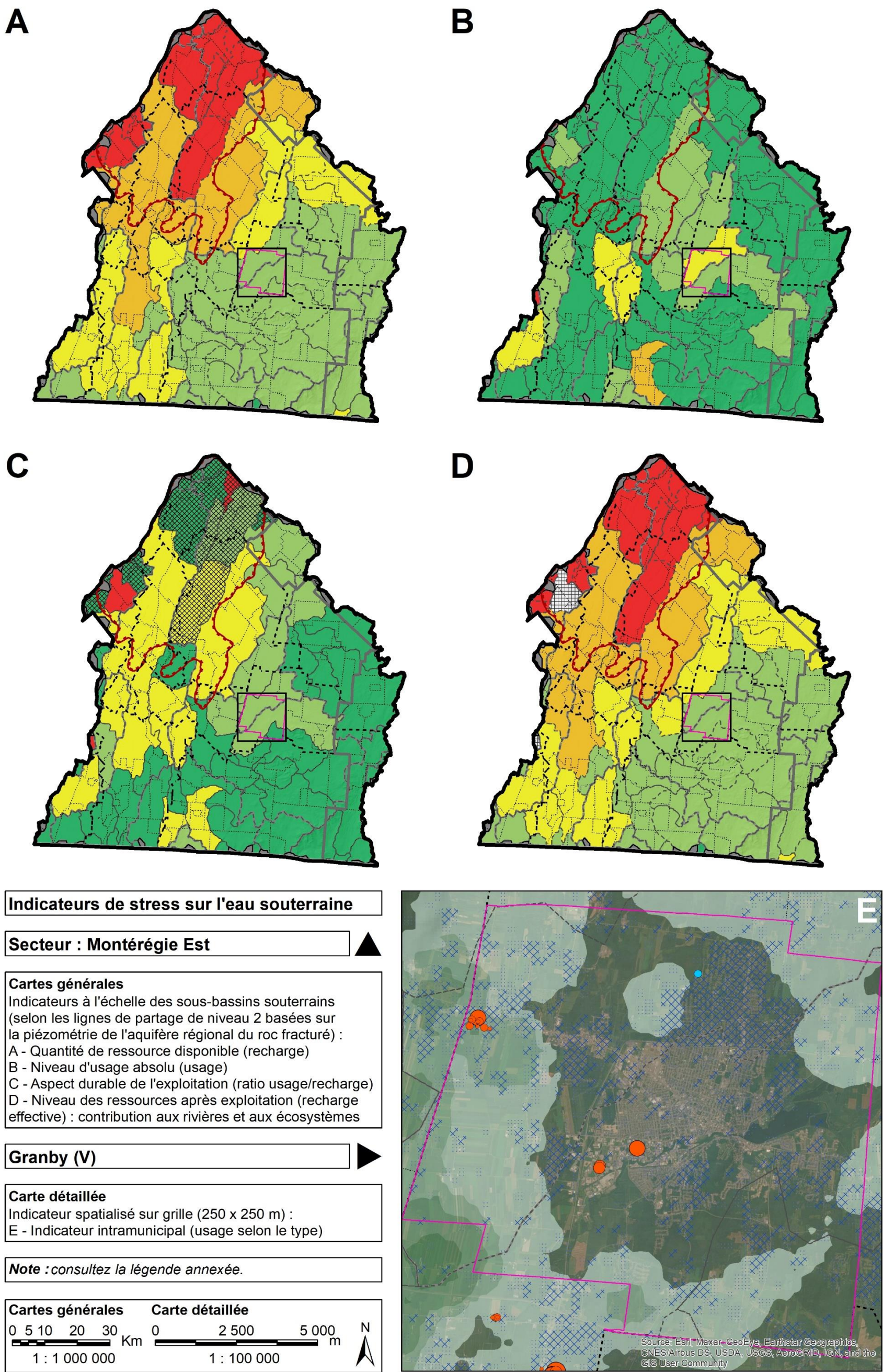
10.3 Planche cartographique pour l'analyse des indicateurs de stress sur l'eau souterraine

Les conditions très variées retrouvées en Montérégie Est montrent que l'ensemble des indicateurs doivent être consultés pour définir les conditions d'exploitation et que l'indicateur de stress sur l'eau souterraine ne permet pas à lui seul d'identifier correctement les secteurs problématiques (voir section 10.2).

La planche cartographique proposée (figure 10.7) permet de visualiser les quatre indicateurs sur des cartes générales (échelle au 1/1 000 000) : la quantité de ressource disponible (carte A), le niveau d'usage absolu (carte B), l'aspect durable de l'exploitation (encart C) et le niveau des ressources après exploitation (encart D). Ces quatre cartes de l'ensemble du territoire offrent une vue globale du niveau de stress sur la ressource en eau souterraine dans chaque bassin versant hydrogéologique de niveau 2, soit dans les limites naturelles les plus représentatives correspondant aux eaux souterraines dans l'aquifère rocheux.

Avec ArcGIS, il est ensuite possible de cibler de façon automatisée chaque municipalité d'un territoire donnée (ici la Montérégie Est) afin d'obtenir un regard sur le niveau de stress à l'échelle municipale (échelle au 1/100 000). Cette carte détaillée (encart E - figure 10.7) correspond en fait à l'indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine défini dans la section 9. Cela permet alors de recenser les principaux préleveurs d'eau souterraine et d'identifier les potentiels conflits d'usage dans une municipalité incluse dans un bassin versant hydrogéologique où le niveau d'exploitation (usage) est problématique par rapport aux volumes d'eau disponible annuellement (recharge).

Le protocole complet de production des cartes d'indicateurs de stress sur l'eau souterraine est décrit dans l'annexe 13 tandis que la légende de cette planche cartographique est jointe à l'annexe 14.



11 APPLICABILITÉ À L'ENSEMBLE DU QUÉBEC MUNICIPALISÉ

Les indicateurs produits dans les sections précédentes (indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine - section 9 - et indicateur de stress sur l'eau souterraine – section 10) nécessitent d'obtenir les données d'usage de l'eau souterraine à l'échelle municipale et de recharge spatialement distribuée. La possibilité de définir ces indicateurs sur des territoires autres que la Montérégie Est (cas du présent rapport) et la région de Mercier (Ballard et al., 2021) doit donc être évaluée. Ainsi, pour vérifier si ces indicateurs pourraient être mise en œuvre sur le reste du Québec municipalisé afin de caractériser la ressource en eau souterraine et son exploitation, une revue des approches employées durant les projets de caractérisation hydrogéologique régionaux a été faite pour l'usage (section 11.1) et pour la recharge (section 11.2).

Ce comparatif a donc concerné les 13 projets PACES réalisés entre 2013 et 2015 par plusieurs universités québécoises : Abitibi-Témiscamingue Est (UQAT – 2013), Abitibi-Témiscamingue Ouest (UQAT – 2015), Bécancour (UQAM – 2013), Charlevoix-Haute-Côte-Nord (UQAC – 2015), Chaudière-Appalaches (INRS – 2015), Communauté métropolitaine de Québec (UL – 2013), Mauricie (UQTR – 2013), Montérégie Est (INRS – 2013), Nicolet-Saint-François (UQAM – 2015), Nord-Est du Bas-Saint-Laurent (UQAR – 2015), Outaouais (UL – 2013), Saguenay-Lac-Saint-Jean (UQAC – 2013) et Vaudreuil-Soulanges (UQAM – 2015). Pour compléter la revue, un projet régional réalisé conjointement par la CGC, le MELCC et l'INRS et complété en 2006 sur le bassin versant de la rivière Châteauguay a aussi été considéré.

Le portrait des ressources en eau souterraine de tout le territoire municipalisé du Québec sera complété par six autres projets qui devraient être finalisés en 2022 : Bas-Saint-Laurent (UQAR), Côte-Nord, Mauricie et Lanaudière (UQAC), Estrie (INRS), Îles-de-la-Madeleine (UL), Laurentides (UQAM) et Territoire crie d'Eastmain (UQAT) (consulter le site internet suivant pour plus d'informations : <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/programmes/acquisition-connaissance.htm>).

11.1 Estimation de l'usage de l'eau souterraine par les projets régionaux antérieurs

Les approches utilisées pour estimer les usages de l'eau (souterraine ou de surface) ont été analysées et comparées dans le détail pour tous les projets régionaux antérieurs. Ce travail est disponible à l'annexe 15 pour les projets situés au sud du fleuve Saint-Laurent (tableaux A.15.1 et A.15.2) et en dehors de ce secteur (tableaux A.15.3 à A.15.5). Les tableaux 11.1 et 11.2 offrent une synthèse des principales caractéristiques des méthodes d'estimation des usages par ces 14 projets. L'analyse et la comparaison de ces caractéristiques montre des différences importantes entre les projets régionaux à plusieurs niveaux : (1) disponibilité des résultats produits (public ou à l'interne), (3) documentation des démarches utilisées (détaillée ou non), (2) méthodologies employées pour estimer les usages (hypothèses de travail, catégories d'usages considérées, considérations ou non des pertes sur les réseaux, approches d'estimation des usages agricoles et ICI, etc.) et (4) niveau de détail des résultats (provenance de l'eau, échelle et catégories d'usages).

La description des approches spécifiquement employées dans chacun des projets est souvent peu documentée (tableau 11.2). En effet, l'information reliée à l'approche utilisée est incomplète pour deux projets (Abitibi-Témiscamingue Est et Mauricie) et partielle pour cinq autres (Abitibi-Témiscamingue Ouest, Châteauguay, CMQ, Nord-Est du Bas Saint-Laurent et Saguenay-Lac-Saint-Jean). Il n'est donc pas toujours évident de connaître les hypothèses posées pour estimer les usages de l'eau, particulièrement à l'échelle municipale. Dans plusieurs projets PACES, le protocole d'utilisation de l'eau (Ballard et al., 2012) est simplement joint au rapport sans qu'aucune information spécifique n'y soit ajoutée. Le niveau de détail fourni est, à l'inverse, plutôt complet pour sept des 14 projets régionaux.

En plus des précisions apportées dans la description des approches utilisées, l'accès aux documents est également un élément problématique. À l'exception du projet Châteauguay, l'ensemble des rapports finaux et des cartes des projets PACES sont disponibles sur le portail du ministère (Données Québec ; <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/projets-d-acquisition-de-connaissances-sur-les-eaux-souterraines-paces>). Toutefois, les annexes ne sont pas toujours intégrées dans ces rapports finaux et les annexes électroniques des projets ne sont pas disponibles sur le site Données Québec. Dans plusieurs cas, ces annexes sont disponibles via les sites internet des universités ou des OBV responsables ou partenaires. Dans d'autres cas, il a été nécessaire de contacter les équipes universitaires pour obtenir le contenu des annexes. Avec le temps, il va devenir de plus en plus difficile de retrouver ces informations. Il serait donc nécessaire de les récupérer et de les rendre disponibles publiquement avec les rapports. En plus des résultats et des protocoles utilisés par chaque université, il serait également pertinent, voir essentiel, de disposer des données d'entrées (et des sources) utilisées pour faire les estimations d'usage car ces données de base ne sont actuellement pas disponibles en ligne. Cela pourrait prendre la forme d'une annexe électronique (tableur Excel par exemple) dans laquelle les résultats seraient détaillés comme c'est le cas pour les projets réalisés par l'INRS (voir l'annexe 6 des PACES Montérégie Est et Chaudière-Appalaches que le MELCC doit avoir en main propre). Pour le projet Châteauguay, la méthode et les résultats sont surtout documentés dans l'annexe C du mémoire de Lavigne (2006), disponible sur le site internet de l'INRS.

Dans la majorité des projets (12 sur 14), la démarche a considéré trois catégories d'usage : (1) résidentiel, (2) agricole et (3) ICI (institutionnel, commercial et industriel). Le projet de la CMQ a réparti les usages selon le type de puits : (1) municipaux, (2) privés et (3) ICI. C'est aussi le cas pour le projet Châteauguay qui considère en plus l'usage agricole (tableau 11.1).

Hormis pour le PACES Saguenay-Lac-Saint-Jean dans lequel les pertes sur le réseau de distribution ne sont pas explicitement évoquées, ces pertes sont gérées de manière différente selon les projets (tableau 11.1). En effet, pour les projets menés par l'UQAM (Bécancour, Nicolet-Saint-François et Vaudreuil-Soulanges), les pertes sur le réseau sont considérées comme équivalentes à 10% des volumes distribués par les réseaux d'aqueduc. Le projet Charlevoix-Haute-Côte-Nord de l'UQAC utilise une approche similaire mais considère un seuil à 20% de pertes. La moitié des projets (7 sur 14) intègrent plutôt ces pertes dans les volumes d'eau des usages ICI desservis par un réseau. Toutefois, cela est explicitement indiqué pour cinq projets (Abitibi-Témiscamingue Est, Abitibi-Témiscamingue Ouest, Chaudière-Appalaches, Montérégie Est et Outaouais) et seulement supposé pour deux autres (Mauricie et Nord-Est du Bas Saint-Laurent) sur la base des détails fournis dans les rapports de ces deux projets (tableau 11.2).

À l'exception du PACES de la CMQ où l'usage agricole n'a pas été considéré, cette catégorie d'usage a été traitée de diverses façons entre les 13 autres projets (tableau 11.1). Pour certains projets (Abitibi-Témiscamingue Est, Abitibi-Témiscamingue Ouest, Charlevoix-Haute-Côte-Nord et Saguenay-Lac-Saint-Jean), l'usage agricole attribuable aux cultures végétales a été complètement négligé dans les calculs. Pour ces quatre projets, les prélèvements d'eau associés au secteur agricole sont donc supposés être uniquement reliés à l'alimentation du bétail. Pour le reste des projets (9 au total), l'usage agricole a été considéré à la fois les cultures et l'élevage du bétail ; le PACES Bécancour a même distingué l'usage spécifiquement relié aux cultures de canneberges grâce à un exercice de photo-interprétation d'images aériennes. La méthodologie suivie pour calculer les quantités d'eau prélevées par le secteur agricole est relativement similaire d'un projet à un autre. En effet, les données fournies par le MAPAQ ou par Statistiques Canada ont généralement été utilisées pour évaluer le nombre de têtes de bétail pour la production animale et les superficies de culture par municipalité ou par MRC pour la production végétale lorsque que cette dernière a été considérée (voir annexe 15). Les volumes d'eau prélevés ont ensuite été déterminés à partir de la charte de consommation de l'eau pour chaque type de bétail ou chaque type de culture. Le type d'eau (surface ou souterraine) prélevée pour la production agricole a généralement été estimée à partir des pourcentages provenant de Statistiques Canada (voir annexe 15). Toutefois, pour le PACES en Outaouais, la répartition a été déterminée selon les pourcentages définis en concertation avec la direction régionale du MAPAQ de l'Outaouais. Pour les projets de l'UQAC (Charlevoix-Haute-Côte-Nord et Saguenay-Lac-Saint-Jean), l'usage d'eau souterraine relié aux activités agricoles est supposé être issu de puits individuels.

Pour estimer l'usage résidentiel, 12 des 14 projets ont considéré une consommation moyenne journalière de 250 litres par habitant (tableau 11.1). Le PACES en Outaouais fait une distinction entre les résidents permanents pour lesquels la consommation est supposée égale à 250 L/personne/jour et les résidents saisonniers pour lesquels la consommation est présumée équivalente à 25% de la consommation permanente, soit 62.5 L/personne/jour. Quant au projet Châteauguay, une consommation moindre de 200 L/personne/jour a été affiliée à chaque résident ; sans doute du fait de l'ancienneté du projet (2006).

Selon les projets, la gestion et le calcul des usages reliés aux industries, aux commerces et aux institutions (ICI) a été faite de manière très diverse. L'usage ICI réseau et hors réseau est généralement distingué (tableau 11.2), excepté pour le PACES Saguenay-Lac-Saint-Jean où seul l'usage ICI hors réseau a été évalué à partir du registre des grands préleveurs d'eau (RGP), soit ceux consommant plus de 75 m³/jour et d'un registre de petits préleveurs (< 75 m³/jour). Les approches divergent donc dans le calcul de cet usage ICI.

Pour plusieurs projets (8 sur 14), l'usage ICI desservi par un réseau de distribution est évalué comme équivalent au volume d'eau restant après estimation des autres usages (i.e. résidentiel et agricole) en retirant du volume d'eau distribuée par les réseaux de distribution les volumes d'eau utilisés pour les usages résidentiel et agricole (tableau 11.2). Pour le PACES CMQ et le projet Châteauguay, cet usage ICI sur le réseau est implicitement considéré comme inclus dans l'usage des puits municipaux.

Pour l'usage ICI hors réseau, les déclarations des grands préleveurs d'eau (GPE) extraites du répertoire des grands préleveurs (RGP) du MELCC ont été utilisées pour l'ensemble des 14 projets (tableau 11.2). Le RGP a d'ailleurs constitué la source principale de données pour la majorité de ces projets, à l'exception du projet PACES du Nord-Est du Bas Saint-Laurent. Plusieurs projets ont complété cette information avec d'autres éléments. Par exemple le projet Châteauguay a intégré des résultats de sondage, le PACES en Outaouais a aussi considéré les piscicultures, le PACES Saguenay-Lac-Saint-Jean a également compilé les données de petits préleveurs (< 75 m³/jour), les PACES Montérégie est et Chaudière-Appalaches ont aussi utilisé des informations provenant des registres municipaux ou obtenues auprès des entreprises par sondage tandis que les trois projets réalisés par l'UQAM (Bécancour, Nicolet-Saint-François et Vaudreuil-Soulanges) ont utilisés le Guide de conception des installations de production d'eau potable du MELCC (MELCC, 2021d). Quant au PACES du Nord-Est du Bas-Saint-Laurent, ce dernier a considéré principalement les résultats de sondages pour évaluer l'usage ICI hors réseau et a apparemment complété cette information avec les données du RGP. Pour ce projet, il n'est d'ailleurs pas évident d'évaluer si les usages ICI réseau et hors réseau ont été traités de façon distincte mais il est toutefois supposé que le protocole de Ballard et al. (2012) a été suivi car il est joint au rapport.

Pour les trois projets réalisés par l'UQAM (Bécancour, Nicolet-Saint-François et Vaudreuil-Soulanges), l'usage des ICI a été estimé en utilisant une approche substantiellement différente (tableau 11.2). L'usage de l'eau relié aux industries a été évalué en se basant sur les données du répertoire des grands préleveurs (> 75 m³/jour) transmis par le MELCC. Pour l'usage commercial et institutionnel, le Guide de conception des installations de production d'eau potable du MELCC (2021) a été utilisé. Ainsi, un usage d'eau moyen quotidien a été attribué selon la taille des municipalités : 32 L/personne (< 5 000 habitants), 65 L/personne (5 000 à 50 000 habitants) et 117 L/personne (> 50 000 habitants).

Enfin, la présentation des résultats est très hétérogène d'un projet l'autre (tableau 11.2). Selon les données disponibles, il n'est pas possible de dresser un portrait complet de l'usage de l'eau souterraine par municipalité et par catégorie d'usage sur l'ensemble du territoire couvert. L'usage de l'eau est compilé par MRC pour certains projets et par municipalité pour d'autres. De plus, la provenance de l'eau (réseau ou hors réseau) est seulement présentée pour un nombre restreint de projets (Abitibi-Témiscamingue Ouest, Chaudière-Appalaches, Mauricie, Montérégie Est et Outaouais). Enfin, l'usage de l'eau de surface n'est pas systématiquement distingué alors que l'usage de l'eau souterraine est la plupart du temps détaillé. En effet, pour le PACES Charlevoix-Haute-Côte-Nord, seul l'usage total d'eau de surface a été comptabilisé sans distinction des catégories d'usage ni de la provenance de l'eau. C'est aussi le cas pour le PACES CMQ et le projet Châteauguay dans lesquels le bilan de l'eau de surface utilisée n'a tout simplement pas été fait.

Tableau 11.1 : Synthèse des estimés d'usage produits par les projets régionaux antérieurs (1/2)

Projet	An ⁽¹⁾	Resp. ⁽²⁾	Catégories d'usage considérées						Gestion des pertes sur le réseau dans les calculs		Usage résidentiel moyen (L/pers/jour)		Catégories d'usage agricole considérées		
			Résidentiel	Agricole	ICI	Puits			Incluses	Méthode	250	Autres	Élevage	Cultures	Autres
						Municipaux	Privés	ICI							
Abitibi-Témiscamingue Est	2013	UQAT	X	X	X	-	-	-	X	Incluses dans ICI desservis	X	-	X	-	-
Abitibi-Témiscamingue Ouest	2015	UQAT	X	X	X	-	-	-	X	Incluses dans ICI desservis	X	-	X	-	-
Bécancour	2013	UQAM	X	X	X	-	-	-	X	10% des volumes desservis	X	-	X	X	X ⁽⁵⁾
Charlevoix-Haute-Côte-Nord	2015	UQAC	X	X	X	-	-	-	X	20% des volumes desservis	X	-	X	-	-
Châteauguay	2006	CGC / INRS	-	X	-	X	X	X	X	Incluses dans puits municipaux	-	X ⁽³⁾	X	X	-
Chaudière-Appalaches	2015	INRS	X	X	X	-	-	-	X	Incluses dans ICI desservis	X	-	X	X	-
CMQ	2013	UL	-	-	-	X	X	X	X	Incluses dans puits municipaux	X	-	-	-	-
Mauricie	2013	UQTR	X	X	X	-	-	-	X	Incluses dans ICI desservis	X	-	X	X	-
Montréal Est	2013	INRS	X	X	X	-	-	-	X	Incluses dans ICI desservis	X	-	X	X	-
Nicolet-Saint-François	2015	UQAM	X	X	X	-	-	-	X	10% des volumes desservis	X	-	X	X	-
Nord-Est du Bas Saint-Laurent	2015	UQAR	X	X	X	-	-	-	X	Incluses dans ICI desservis	X	-	X	X	-
Outaouais	2013	UL	X	X	X	-	-	-	X	Incluses dans ICI desservis	-	X ⁽⁴⁾	X	X	-
Saguenay-Lac-Saint-Jean	2013	UQAC	X	X	X	-	-	-	-	-	X	-	X	-	-
Vaudreuil-Soulanges	2015	UQAM	X	X	X	-	-	-	X	10% des volumes desservis	X	-	X	X	-
Total	-	-	12	13	12	2	2	2	13	-	12	2	13	9	1

1 : année de finalisation du projet ;

2 : responsable du projet ;

3 : pour le projet Châteauguay (Côté et al., 2006), la consommation résidentielle moyenne considérée est de 200 L/pers/jour ;

4 : pour le projet en Outaouais (Comeau et al., 2013), l'usage résidentiel moyen est de 250 L/pers/jour pour le permanent et 62.5 L/pers/jour pour le saisonnier ;

5 : pour le projet Bécancour (Larocque et al., 2013), la culture de canneberges est aussi considérée.

Tableau 11.2 : Synthèse des estimés d'usage produits par les projets régionaux antérieurs (2/2)

Projet	An ⁽¹⁾	Resp. ⁽²⁾	Gestion des usages ICI				Documentation			Échelle des usages de l'eau ⁽⁵⁾					
			Réseau		Hors réseau		Complète	Partielle	Incomplète	Surface		Souterraine		Total	
			Inclus	Méthode	Inclus	Méthode				Municipale	MRC	Municipale	MRC	Municipale	MRC
Abitibi-Témiscamingue Est	2013	UQAT	X	Égal au volume résiduel municipal	X	RGP	-	-	X	-	X	-	X	-	-
Abitibi-Témiscamingue Ouest	2015	UQAT	X	Égal au volume résiduel municipal	X	RGP	-	X	-	-	X	-	X	-	X
Bécancour	2013	UQAM	X	RGP et guide ⁽³⁾	X	RGP et guide ⁽³⁾	X	-	-	X	-	X	-	-	-
Charlevoix-Haute-Côte-Nord	2015	UQAC	X	Égal au volume résiduel municipal	X	RGP	X	-	-	-	-	-	X	-	-
Châteauguay	2006	CGC / INRS	X	Inclus dans puits municipaux	X	RGP et sondage	-	X	-	-	-	-	X	-	-
Chaudière-Appalaches	2015	INRS	X	Égal au volume résiduel municipal	X	RGP	X	-	-	-	-	-	-	-	X ⁽⁶⁾
CMQ	2013	UL	X	Inclus dans puits municipaux	X	RGP	-	X	-	-	-	X	X	-	-
Mauricie	2013	UQTR	X	Égal au volume résiduel municipal	X	RGP	-	-	X	X	-	X	-	X	-
Montréal Est	2013	INRS	X	Égal au volume résiduel municipal	X	RGP	X	-	-	-	-	-	-	-	X ⁽⁶⁾
Nicolet-Saint-François	2015	UQAM	X	RGP et guide ⁽³⁾	X	RGP et guide ⁽³⁾	X	-	-	X	-	X	-	-	X
Nord-Est du Bas Saint-Laurent	2015	UQAR	X	Égal au volume résiduel municipal	X	Sondage	-	X	-	X	-	X	X	-	-
Outaouais	2013	UL	X	Égal au volume résiduel municipal	X	RGP et répertoire des piscicultures ⁽⁴⁾	X	-	-	-	X	-	X	-	-
Saguenay-Lac-Saint-Jean	2013	UQAC	-	-	X	Petits préleveurs (< 75 m ³ /jour) et RGP	-	X	-	X	-	X	-	-	-
Vaudreuil-Soulanges	2015	UQAM	X	RGP et guide ⁽³⁾	X	RGP et guide ⁽³⁾	X	-	-	-	X	X	X	-	-
Total	-	-	13	-	14	-	7	5	2	5	4	7	8	1	4

1 : année de finalisation du projet ;

2 : responsable du projet ;

3 : il s'agit du Guide de conception des installations de production d'eau potable du MELCC dont la dernière version a été éditée en mai 2021 (MELCC, 2021d) ;

4 : pour le projet en Outaouais (Comeau et al., 2013), le répertoire des piscicultures a été utilisé (MAPAQ, 2011b) ;

5 : catégories d'usage détaillées (X), provenance de l'eau détaillée (X), provenance de l'eau et catégories d'usage détaillées (X) et aucun détail fourni (X) ;

6 : pour les projets en Montréal Est (Carrier et al., 2013) et en Chaudière-Appalaches (Lefebvre et al., 2015), les données sont disponibles mais pas publiquement.

11.2 Estimation de la recharge de l'eau souterraine par les projets régionaux antérieurs

L'analyse complète des estimés de recharge à l'échelle régionale des projets de caractérisation hydrogéologique est disponible en annexe 16. Le tableau A.16.1 présente le détail du comparatif pour les projets antérieurs couvrant le sud du fleuve Saint-Laurent tandis que les tableaux A.16.2 et A.16.3 concernent le reste des projets de la province.

Cette comparaison a mis en exergue plusieurs différences majeures entre les projets antérieurs (tableau 11.3) : (1) des approches diverses (bilan hydrique ou modèle physique), (2) des résolutions différentes (100, 250 ou 500 m), (3) la présence ou l'absence de calage des estimations de recharge, (4) des périodes d'estimation variées, (5) plusieurs formats de livrables (raster ou couche polygone) et (6) des valeurs de recharge pouvant correspondre à la recharge nette ou à la recharge potentielle selon les projets. Ceci entraîne des disparités spatiales sur le Québec municipalisé visibles sur la carte de la figure 11.1.

Au niveau des approches employées pour définir la recharge, chaque université responsable d'un projet semble avoir adopté une méthode spécifique : (1) quatre d'entre-elles (UQAR, UQAR, UQAT et UQTR) ont utilisé un bilan hydrique et (2) deux autres (INRS – INRS/CGC pour le projet Châteauguay – et UQAM) ont évalué la recharge avec un modèle d'infiltration ; l'UQAM utilisant un modèle développé au sein même de l'université, maintenant appelé HydroBudget, tandis que l'INRS ou l'Université Laval ont travaillé en adaptant le modèle HELP (*Hydrologic Evaluation of Landfill Performance*; Schroeder et al., 1994; Croteau et al., 2010).

L'une des approximations principales du calcul de la recharge avec le bilan hydrique est de considérer la recharge de l'aquifère comme étant équivalente à l'infiltration, c'est-à-dire à la quantité d'eau précipitées déduite du ruissellement de surface et de l'évapotranspiration. Toutefois, une portion non négligeable de cette infiltration peut constituer l'écoulement souterrain (ou ruissellement hypodermique) et ne pas atteindre le toit de la nappe. Ainsi, les bilans hydriques estiment la recharge potentielle qu'il faut distinguer de la recharge nette (ou réelle) qui tient compte de cet écoulement latéral. C'est d'ailleurs l'un des avantages de l'utilisation d'un modèle tel que HELP puisque ce dernier tient compte des propriétés intrinsèques des sols et des dépôts meubles et permet alors de distinguer le ruissellement hypodermique au sein de chaque couche. Comme indiqué dans le tableau 11.3, les projets se basant sur ces bilans hydriques définissent la recharge potentielle qui est une approximation surestimant la recharge réelle des aquifères.

Pour les six projets basés sur le bilan hydrique (Abitibi-Témiscamingue Est, Abitibi-Témiscamingue Ouest, Nord-Est du Bas Saint-Laurent, Saguenay-Lac-Saint-Jean, Charlevoix-Haute-Côte-Nord et Mauricie), les données climatiques journalières fournies par le CEHQ (Poirier et al., 2012) correspondaient aux apports verticaux, c'est-à-dire aux précipitations efficaces. Les données climatiques de cette grille de 0.1° (maille de 10 x 10 km environ) ont ensuite été distribuées grâce aux polygones de Thiessen ou réinterpolées sur des grilles de meilleure résolution (100 ou 250 m selon les projets) pour être utilisées comme données d'entrée, ce qui constitue une limitation importante.

Comme il n'y a pas eu de concertation entre les organismes responsables des projets, les hypothèses de travail ont amené à des estimations de recharge variables même si ces universités se sont basées sur une démarche similaire : celle du bilan hydrique. L'évapotranspiration potentielle a été évaluée en utilisant des équations variées : Thornthwaite (1955), Bisson et Roberge (1983), Dingman, (2002) ou encore Poirier et al. (2012). L'évapotranspiration réelle a ensuite été généralement approchée en utilisant une relation linéaire avec l'évapotranspiration potentielle. Le ruissellement de surface a globalement été calculé avec la méthode du numéro de courbe qui considère l'occupation du sol, la pente de la surface du sol et les classes de sol (Monfet, 1979). Comme cette méthode considère plusieurs données d'entrée et que les projets ont été réalisés à des périodes différentes, ces données peuvent varier selon les projets et donc le coefficient de ruissellement résultant peut grandement changer d'un projet à un autre, entraînant alors des volumes d'eau ruisselés bien différents pour une même classe de sol.

Tableau 11.3 : Synthèse des estimés de recharge produits par les projets régionaux antérieurs

Projet	An ⁽¹⁾	Resp. ⁽²⁾	Méthode					Résolution			Calage		Période	Livrable		Recharge	
			Bilan hydrique	Modèle				100 m	250 m	500 m	Oui	Non		Raster	Polygone	Net. ⁽³⁾	Pot. ⁽⁴⁾
				Visual Basic	Hydro Bilan	Hydro Budget	HELP										
Abitibi-Témiscamingue Est	2013	UQAT	X	-	-	-	-	X	-	-	-	X	1981-2010 30 ans	X ⁽⁵⁾	X ⁽⁵⁾	-	X
Abitibi-Témiscamingue Ouest	2015	UQAT	X	-	-	-	-	X	-	-	-	X	1981-2010 30 ans	X	-	-	X
Bécancour	2013	UQAM	-	X	-	-	-	-	-	X	X	-	1990-2010 20 ans	X	-	X	-
Charlevoix-Haute-Côte-Nord	2015	UQAC	X	-	-	-	-	-	X	-	-	X	2005-2009 5 ans	-	X ⁽⁶⁾	-	X ⁽⁶⁾
Châteauguay	2006	CGC / INRS	-	-	-	-	X	-	X	-	X	-	1963-2001 39 ans	X	-	X	-
Chaudière-Appalaches	2015	INRS	-	-	-	-	X	-	X	-	X	-	1981-2012 32 ans	X	-	X	-
CMQ	2013	UL	-	-	-	-	X	-	X	-	X	-	1980-2009 30 ans	X	-	X	-
Mauricie	2013	UQTR	X	-	-	-	-	X	-	-	X	-	1970-2010 41 ans	X	-	-	X
Montérégie Est	2013	INRS	-	-	-	-	X	-	X	-	X	-	1979-2010 31 ans	X	-	X	-
Nicolet-Saint-François	2015	UQAM	-	-	X	-	-	-	-	X	X	-	1989-2009 21 ans	X	-	X	-
Nord-Est du Bas Saint-Laurent	2015	UQAR	X	-	-	-	-	-	X	-	-	X	1980-2010 31 ans	X	-	-	X
Outaouais	2013	UL	-	-	-	-	X	-	X	-	X	-	1980-2009 30 ans	X	-	X	-
Saguenay-Lac-Saint-Jean	2013	UQAC	X	-	-	-	-	-	X	-	-	X	2000-2009 10 ans	X	-	-	X
Vaudreuil-Soulanges	2015	UQAM	-	-	-	X	-	-	X	-	X	-	1989-2009 20 ans	X	-	X	-
Total	-	-	6	1	1	1	5	3	9	2	9	5	-	13	2	8	6

1 : année de finalisation du projet ;

2 : responsable du projet ;

3 : recharge nette (réelle) ;

4 : recharge potentielle (infiltration efficace) ;

5 : pour le projet en Abitibi-Témiscamingue Est (Cloutier et al., 2013), il y a à la fois une couche raster et une couche polygone dans les livrables ;

6 : pour le projet Charlevoix-Haute-Côte-Nord (CERM-PACES, 2015), la couche polygone fournie la recharge préférentielle.

Pour les autres projets (Bécancour, Châteauguay, Chaudière-Appalaches, Communauté métropolitaine de Québec, Montérégie Est, Nicolet-Saint-François Outaouais et Vaudreuil-Soulanges), généralement ceux situés sur la rive sud du fleuve, deux modèles ont été utilisés : (1) un modèle développé à l'interne par l'UQAM, appelé HydroBilan puis HydroBudget, et (2) HELP utilisé par l'INRS (conjointement avec la CGC dans le cadre du projet Châteauguay) ainsi que par l'Université Laval. Là aussi, des données climatiques diverses ont été utilisées selon les projets ; issues soient de stations météorologiques provinciales ou fédérales voir même localisées aux États-Unis ou encore des apports verticaux ou des précipitations fournies sur grille par le CEHQ. La conceptualisation du système hydrogéologique en plusieurs couches aux propriétés hydrauliques diverses considère aussi plusieurs hypothèses qui peuvent entraîner des variations importantes entre les estimés de recharge. L'avantage de HELP par rapport à HydroBudget est la prise en compte du ruissellement hypodermique qui permet, dans le cas d'un système aquifère multicouches (granulaire sur roc par exemple) de déterminer à la fois la recharge de l'aquifère granulaire et la recharge de l'aquifère rocheux. Pour HydroBudget, l'UQAM fournit toutefois un livrable qui correspond à la recharge nette de l'aquifère régional rocheux en se basant sur les conditions de confinement, ce qui ne tient pas totalement compte des propriétés hydrauliques de chaque couche. Il est important de noter que chaque modèle possède des limitations et qu'il n'y a pas de modèle parfait. Pour un même modèle, les estimations résultantes (livrables) peuvent grandement varier selon l'utilisateur et les suppositions faites lors du travail de modélisation. Ceci est visible sur la figure 11.1 où la recharge réelle estimée par l'Université Laval en Outaouais et dans la CMQ est plus importante que celle estimée par l'INRS en Chaudière-Appalaches et en Montérégie Est malgré l'usage du même modèle (HELP).

En plus des considérations propres à chaque méthode d'estimation de la recharge, d'autres différences d'importance ont été identifiées entre les projets. La première est la résolution des grilles de recharge : 100 m pour trois projets, 250 m pour neuf projets et 500 m pour deux projets (tableau 11.3). Il paraît donc difficile de concilier toutes ces grilles.

En outre, l'un des points fondamentaux est liés à l'utilisation de données hydrologiques pour caler les estimés de recharge (tableau 11.3). Pour les six projets se basant sur le bilan hydrique, seul le projet de l'UQTR mené en Mauricie (Leblanc et al., 2013) a utilisé les données de débits d'un cours d'eau pour valider le bilan estimé au sein d'un bassin versant en déterminant le débit de base qui correspond à la recharge potentielle. Pour les huit projets utilisant les modèles physiques (HELP ou HydroBudget), un calage systématique a été appliqué pour valider les estimées de recharge pour les bassins jaugés. Toutefois, comme le modèle conceptuel varie entre les projets, le ruissellement hypodermique est parfois associé au débit de base dans certains projets tandis qu'il est intégré au ruissellement de surface pour d'autres, ce qui peut avoir une influence sur les résultats de calage.

La période de temps considérée pour estimer la recharge de l'aquifère régional est également bien différente entre les projets (voir tableau 11.3). Il est donc difficile de comparer les régions entre-elles (figure 11.1) puisque les périodes varient de 5 à 41 ans selon les projets pour des années considérées allant de 1963 à 2012.

Généralement, les livrables fournis correspondent à des couches rasters facilement utilisables dans tout Système d'information géographique (voir tableau 11.3). Toutefois, l'UQAC a seulement fourni une couche polygone de recharge préférentielle pour le projet de Charlevoix-Haute-Côte-Nord (CERM-PACES, 2015). Il est sans doute possible de récupérer le fichier raster de recharge de l'aquifère rocheux auprès de l'université. L'un des projets de l'UQAT en Abitibi-Témiscamingue Est (Cloutier et al., 2013) a fourni à la fois une grille de recharge au format raster et une couche polygone correspondant à une plaine argileuse où une valeur de recharge doit être imposée. Cette valeur de recharge imposée est directement intégrée dans la couche raster pour le projet en Abitibi-Témiscamingue Ouest (Cloutier et al., 2015).

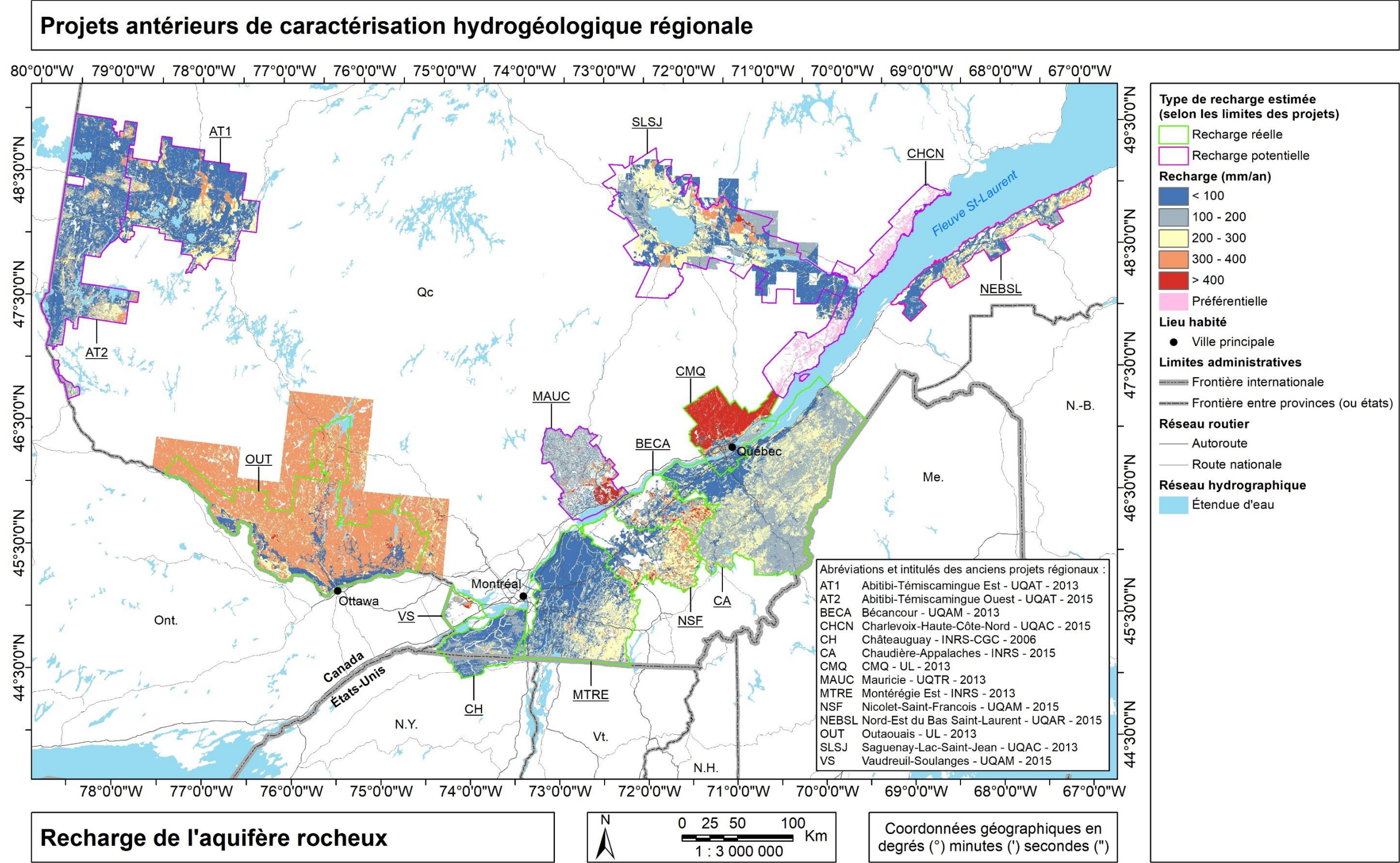


Figure 11.1 : Données de recharge disponibles en 2021 pour les secteurs couverts par les projets régionaux antérieurs

Comme indiqué plus haut, dans le cas des bilans hydriques (six projets), la donnée livrée correspond généralement à la recharge potentielle (voir figure 11.1), hormis pour le PACES du Nord-Est du Bas Saint-Laurent (Buffin-Bélanger et al., 2015). En effet, pour ce projet, le contenu du rapport indique que la recharge réelle du roc a été calculée en tenant compte des conditions de confinement (libre, semi-captif ou captif) mais les métadonnées du livrable suggèrent qu'il s'agit de la recharge potentielle. Il serait nécessaire de voir avec l'université (UQAR) si la couche d'information fournie correspond bien à la recharge réelle de l'aquifère rocheux. Pour les huit autres projets, le livrable correspond bel et bien à la recharge de l'aquifère régional rocheux (voir figure 11.1). Néanmoins, les deux projets menés par l'Université Laval en Outaouais (Comeau et al., 2013) et dans la CMQ (Talbot Poulin et al., 2013) tiennent compte du premier aquifère rencontré. Il est donc nécessaire de tenir compte des spécificités propres à chaque approche lors de l'utilisation des livrables.

Finalement, le niveau de détail décrivant la démarche utilisée pour estimer la recharge est très largement variable entre les projets. De plus, des lacunes spatiales sont identifiées entre les projets sur le territoire du Québec municipalisé. En plus des constats établis dans la présente section et de ces considérations, il est recommandé d'évaluer de nouveau la recharge sur le territoire du Québec municipalisé en se basant sur une approche homogène basée sur un modèle physique (voir section 11.3).

11.3 Recommandations pour la production d'indicateurs sur tout le Québec municipalisé

L'objectif ultime des développements réalisés dans le cadre de ce projet sur les indicateurs de stress hydrique et de pouvoir appliquer les indicateurs retenus sur l'ensemble du Québec municipalisé. Pour produire l'indicateur de stress sur l'eau souterraine (ratio « usage/recharge ») à l'échelle municipale (section 6), il est donc essentiel de disposer des données d'usage compilées par municipalité. Afin d'offrir un niveau de détail plus précis et de pouvoir définir l'indicateur de stress sur l'eau souterraine selon les limites naturelles (bassins versants hydrogéologiques – voir section 10) et donc plus représentatives, un indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine a été développé (section 9). En plus des données d'usage colligées par municipalité, la mise en œuvre de cet indicateur d'usage nécessite des informations sur (1) le type d'eau prélevée (surface ou souterraine), (2) la provenance de cette eau (réseau ou hors réseau) et (3) la répartition des volumes d'eau par catégorie d'usage (résidentiel, agricole et ICI). En plus de l'usage, il est aussi primordial d'avoir en main des estimés de recharge distribuée de l'aquifère régional rocheux et, le cas échéant, des aquifères granulaires lorsque ceux-ci constituent la ressource majoritairement exploitée.

Considérant donc le grand intérêt de l'indicateur intramunicipal de l'usage de l'eau souterraine ainsi que des quatre indicateurs de stress pouvant être produits à l'intérieur de sous-bassins hydrogéologiques ou des limites municipales, nous avons évalué la possibilité de produire ces indicateurs pour l'ensemble du Québec municipalisé. Ce travail d'analyse des estimés d'usage et de recharge est décrit dans les sections 11.1 et 11.2. Plus de détails sont disponibles dans les annexes 15 (usage) et 16 (recharge).

À la lumière de l'analyse et de la comparaison des approches utilisées pour estimer l'usage de l'eau dans le cadre des projets antérieurs (tableaux 11.1 et 11.2 de la section 11.1), il est clair qu'un nombre limité de projets offrent des résultats « complets » qui permettraient de faire l'estimation d'indicateurs de stress sur l'eau souterraine à l'échelle municipale. De même, les démarches suivies par les diverses universités sont très variées, rendant alors compliqué, voire impossible, la conciliation entre les projets. De plus, certaines estimations datent d'il y a plusieurs années (avant 2013) alors que le registre des grands préleveurs (RGP) n'était pas aussi complet que présentement. Ces estimations d'usage devraient donc faire l'objet d'une mise à jour régulière. Les présents travaux ont également montré que la banque de données des GPE a particulièrement besoin de vérifications détaillées pour assurer la cohérence de ses informations.

Devant ces constats, nous recommandons que le MELCC se dote des capacités de faire l'estimation de l'usage de l'eau de surface et souterraine. Le MELCC pourrait alors produire régulièrement (par exemple aux 5 ans) une mise à jour de l'usage de l'eau souterraine, en plus des indicateurs de stress sur l'eau souterraine aux échelles municipale et intramunicipale. Pour être « complets » et permettre la production de ces indicateurs, l'estimation de l'usage de l'eau souterraine devrait rencontrer les critères suivants : (1) considérer les sources d'approvisionnement en eau de surface et souterraine, (2) distinguer les approvisionnements à partir d'un réseau et hors réseau, (3) distinguer les usages résidentiel, agricole (pour les productions végétales et animales) et ICI, (4) définir et appliquer une approche valide pour considérer les pertes des réseaux, (5) produire les résultats à l'échelle municipale et (6) rendre facilement accessible les résultats et le protocole utilisé pour les obtenir. Afin de produire l'indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine, il faudra aussi garder à jour les autres données requises, soient la base de données des grands préleveurs d'eau (GPE), le SIH et les cartes d'utilisation du sol.

Au regard des résultats de recharge fournis par les anciens projets (tableau 11.3 de la section 11.2), le constat est comparable aux estimés d'usage. En effet, que ce soit pour les projets ayant estimé la recharge avec un bilan hydrique ou ceux ayant utilisé un modèle d'infiltration, des différences majeures ont été notées aux niveaux (1) des données météorologiques utilisées et de la période considérée, (2) des méthodes d'estimation des paramètres hydrologiques (évapotranspiration et ruissellement), (3) de la conceptualisation des matériaux entre la surface et l'aquifère, (4) du calage, ou non, des résultats avec des données hydrologiques, (5) de la résolution spatiale des estimations, (6) de l'estimation de l'infiltration potentielle ou de la recharge nette et (7) des formats de livrables (grille *raster* ou couche polygone). De même, selon la méthode utilisée et la prise en compte des conditions de confinement, c'est soit la recharge potentielle ou la recharge réelle qui a finalement été fournie. Ces différences importantes entraînent des disparités spatiales évidentes de la recharge estimée sur le Québec municipalisé en plus de lacunes spatiales identifiées entre les projets sur le territoire du Québec municipalisé. Finalement, le niveau de détail décrivant la démarche utilisée pour estimer la recharge est très variable entre les projets.

L'utilisation directe des résultats fournis par les projets antérieurs afin de produire l'indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine mènerait donc à des incohérences entre les régions. Il est donc recommandé que le MELCC obtienne une estimation uniforme de la recharge avec la même méthode pour toutes les régions ayant fait l'objet de projets régionaux de caractérisation hydrogéologique (PACES et autre). La méthode utilisée pour estimer la recharge devrait avoir un fondement physique et produire une estimation spatialement distribuée ainsi que permettre l'usage de simulations climatiques en plus des données météorologiques afin d'estimer la recharge historique ainsi qu'en climat futur.

L'actualisation régulière (de façon quinquennale par exemple) des estimés d'usage et de recharge puis la redistribution de ces données sur une grille régulière devraient alors faciliter la production des indicateurs précédemment évoqués sur tout le Québec municipalisé : (1) indicateur de stress sur l'eau souterraine à l'échelle municipale, (2) indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine et (3) indicateurs (recharge, usage, ratio « usage/recharge » et recharge effective) selon les limites naturelles (bassins versants hydrogéologiques de niveau 2). Pour disposer d'un indicateur qui tient compte des limites d'écoulement naturelles des eaux souterraines, il est suggéré de refaire une carte piézométrique à large échelle couvrant les territoires visés par ces indicateurs pour éviter les effets de bordure et ne plus avoir de lacunes spatiales. Le MELCC pourrait alors produire sur une base régulière ces indicateurs en y intégrant les simulations climatiques voire même de considérer des projections d'usage futures comme dans le cas du projet réalisé en Montérégie Ouest (Ballard et al., 2021).

12 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

La sélection d'indicateurs de stress sur l'eau souterraine a été faite sur la base de l'échelle d'application régionale, de la disponibilité actuelle ou future des données requises au Québec et sur la possibilité de garder ces données à jour afin de suivre l'évolution des indicateurs dans le temps. Les indicateurs de stress hydrique suivants ont été considérés pour une évaluation plus poussée : 1) stress hydrique de base produit à l'aide de données hydrologiques et des prélèvements totaux, 2) stress sur l'eau souterraine basé sur le rapport entre les prélèvements d'eau souterraine et la recharge, 3) indicateurs climatiques et piézométriques caractérisant la variabilité naturelle des conditions contrôlant les composantes du bilan hydrologique, 4) qualité de l'eau souterraine, et 5) problèmes d'approvisionnement. Les trois premiers indicateurs ont été produits sur la base des données disponibles afin d'illustrer ces indicateurs et de mieux juger de leur intérêt. Les deux derniers indicateurs n'ont toutefois pas été retenus pour une application.

Malgré son intérêt apparent, l'indicateur de stress hydrique de base implique des difficultés considérables qui sont liées à la fois aux données sur les débits et à celles sur l'exploitation d'eau. Les travaux montrent aussi que l'utilisation des prélèvements (ou usage) n'est peut-être pas appropriée en relation avec les eaux de surface. Considérant la faible résolution spatiale de l'indicateur de stress hydrique de base et la difficulté d'interprétation de l'impact des prélèvements d'eau souterraine par rapport à la consommation d'eau, nous ne recommandons pas de produire cet indicateur pour caractériser le stress sur les ressources en eau souterraine au Québec.

L'indicateur de stress sur l'eau souterraine représente le rapport entre les prélèvements totaux d'eau souterraine et la recharge. Cet indicateur présente plusieurs avantages, notamment la rapidité de sa production et la possibilité de le mettre à jour régulièrement. Par contre, il apparaît nécessaire pour l'analyste d'avoir une connaissance du contexte hydrogéologique de la région afin de pouvoir ensuite définir les facteurs de stress sur les municipalités d'intérêt et aussi pour reconnaître les situations où l'indicateur n'est pas représentatif. Il est recommandé de déterminer cet indicateur uniquement à l'échelle municipale, alors que les échelles des MRC ou des bassins-versants n'offrent pas la résolution spatiale requise à l'identification des secteurs sous un stress important sur l'eau souterraine.

Un indicateur climatique a été considéré pour évaluer si les précipitations exercent un contrôle dominant sur la recharge et le niveau de l'eau souterraine. Cet indicateur est équivalent au *Standard Precipitation Index* (SPI) communément utilisé en hydrologie. Un indicateur similaire a été produit pour les niveaux piézométriques, ce qui correspond au *Standard Piezometric Level Index* (SPLI). Ces indicateurs offrent la possibilité de définir l'état des nappes et le MELCC a déjà supporté l'amorce d'un nouveau projet de l'INRS ayant pour but de produire un *Bulletin sur l'état des nappes* pour la région du sud du Québec. Ces indicateurs seront produits à l'intérieur de « secteurs hydroclimatiques » qui correspondent à des zones géographiques du sud du Québec dont les conditions météorologiques sont distinctes, mais qui sont aussi reliées aux limites des grands bassins hydrologiques et reflètent des conditions hydrogéologiques distinctes. Nos travaux ont permis de définir 12 secteurs hydroclimatiques pour une région de 36 000 km² au sud de la province.

Bien que l'échelle municipale soit bien adaptée à la production de l'indicateur de stress sur l'eau souterraine, cette échelle ne permet pas d'identifier les secteurs à l'intérieur d'une municipalité faisant l'objet de pressions importantes sur l'eau souterraine ou de conflits d'usage potentiels. Un indicateur intramunicipal de l'usage de l'eau souterraine ayant une meilleure résolution spatiale a donc été produit. Cet indicateur permet de distinguer les types d'usage ainsi que l'usage total de l'eau souterraine à l'intérieur des municipalités. La répartition spatiale des types d'usage hors réseau a été faite à l'aide des puits du SIH pour répartir l'usage résidentiel, de la carte d'utilisation du sol pour répartir l'usage agricole et de la base de données des Grands préleveurs d'eau (GPE) pour localiser les usages ICI. Nous recommandons de produire cet indicateur pour l'ensemble du Québec municipalisé.

L'indicateur intramunicipal de l'usage de l'eau souterraine permet de montrer la distribution spatiale des usages de l'eau souterraine dans une région sans être contraint par les limites municipales. Il est alors possible de faire un bilan de la recharge et de l'usage de l'eau souterraine à l'intérieur de limites hydrologiques ou hydrogéologiques naturelles. Les sous-bassins hydrogéologiques définis par la carte piézométrique produite par le PACES Montérégie Est ont ainsi été utilisés pour produire quatre (4) indicateurs spatialement distribués : 1) la recharge moyenne annuelle (mm/an), 2) l'usage total annuel (mm/an), 3) le stress sur l'eau souterraine (% de la recharge exploitée ; usage/recharge), et 4) la recharge effective annuelle (mm/an ; recharge moins l'usage). Ces indicateurs se sont révélés capables de faire une caractérisation complète des ressources en eau souterraine et de leur exploitation dans une région aux conditions très variées et complexes. Nous recommandons donc de produire systématiquement ces quatre indicateurs à l'intérieur de limites naturelles pour l'ensemble du Québec municipalisé.

Considérant le grand intérêt de l'indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine ainsi que des quatre indicateurs produits à l'intérieur de sous-bassins, nous avons évalué la possibilité de produire cet indicateur pour l'ensemble du Québec municipalisé. La production de ces indicateurs nécessite de disposer de données sur la recharge et l'usage de l'eau souterraine ainsi que de limites hydrologiques ou hydrogéologiques. Une revue a donc été faite des méthodes utilisées pour estimer la recharge et l'usage de l'eau souterraine dans le cadre des projets antérieurs (PACES et projet Châteauguay). Les méthodes utilisées pour estimer la recharge n'ont pas toujours été calibrées. Il y a aussi eu différents niveaux de détail dans l'estimation de l'usage de l'eau souterraine, notamment par rapport aux usages agricoles. L'utilisation directe des résultats produits par ces projets mènerait donc à des incohérences entre les régions pour les indicateurs basés sur la recharge et l'usage. Il est donc recommandé que le MELCC obtienne une estimation uniforme de la recharge avec la même méthode pour toutes les régions où les données requises sont disponibles. Le MELCC devrait aussi se doter des capacités de produire régulièrement une estimation de l'usage de l'eau (de surface et souterraine). Pour les limites des sous-bassins, si le choix pouvait être fait d'utiliser des sous-bassins hydrogéologiques, cela nécessiterait de disposer d'une carte piézométrique produite de façon uniforme pour le Québec municipalisé. La réalisation de tels travaux va aussi nécessiter de garder à jour les autres données requises, soient la base de données des grands préleveurs d'eau (GPE), le SIH, les cartes d'utilisation du sol et la grille météorologique. Nos travaux ont montré que la base de données des GPE a particulièrement besoin de vérifications détaillées pour assurer la cohérence de ses informations.

Fautes de données adéquates, il n'a pas été possible de produire un indicateur basé sur les problématiques d'approvisionnement en eau souterraine. Un tel indicateur pourrait tout de même s'avérer très intéressant afin d'identifier les problématiques sur lesquelles dédier des efforts plus importants. Nous recommandons ainsi de développer une procédure qui permettrait de répertorier systématiquement et de façon standardisée les problématiques d'approvisionnement en eau souterraine. Il serait notamment intéressant d'identifier les problématiques d'exploitabilité de l'eau souterraine (faible productivité des puits), ce qui compléterait les indicateurs de stress sur l'eau souterraine qui reflètent plutôt l'exploitation durable (usage/recharge) de l'eau souterraine. Similairement, un indicateur de qualité de l'eau souterraine serait intéressant mais il n'a pas été produit parce qu'une réflexion plus poussée devra être faite afin de définir un tel indicateur.

Globalement, les travaux réalisés ont permis d'identifier une approche intéressante pour définir l'état des nappes ainsi que des indicateurs permettant de caractériser les ressources en eau souterraine et leur exploitation. L'application de ces outils sur tout le Québec municipalisé permettrait une meilleure gestion de ces ressources. Toutefois, nos travaux n'ont pas considéré l'ensemble des indicateurs de gestion durable de l'eau souterraine mais les travaux du comité du MELCC sur ces indicateurs a mené à une démarche utilisant un ensemble d'indicateurs afin d'identifier les secteurs problématiques au niveau de l'exploitation de l'eau souterraine.

13 BIBLIOGRAPHIE

Aller L, Bennett T, Lehr JH, Petty R et Hackett G (1987) DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. (United States Environmental Protection Agency, Chicago, IL), 622 p.

Ballard JM, Carrier MA, Lefebvre R, Bleser J, Beaudin I et Rivard C (2012) Protocole pour la préparation du Livrable 26 - Utilisation de l'eau. Par l'Institut national de la recherche scientifique, Centre - Eau Terre Environnement (INRS-ETE) en collaboration avec la Commission géologique du Canada (CGC), l'Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA) et l'organisme de bassin versant de la Yamaska (OBV Yamaska). Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec. 19 avril 2012, 10 p.

Ballard JM, Huchet F, Raynauld M, Gosselin JS et Lefebvre R (2021) Rapport final - 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. Rapport de recherche R2033, soumis au Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) en avril 2021, 88 p., 34 cartes et annexes électroniques.

Beaudry C, Lefebvre R, Rivard C et Cloutier V (2018) Conceptual model of regional groundwater flow in a fractured rock aquifer system based on hydrogeochemistry (Montérégie Est, Québec, Canada). Canadian Water Resources J., 43(2), 152-172. DOI: 10.1080/07011784.2018.1461579.

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.

Bisson J et Roberge F (1983) Préviation des apports naturels : Expérience d'Hydro-Québec, workshop on flow predictions. Toronto: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

Bondur R, Cloutier V, Rosa É et Roy M (2019) Synthèse géochimique. Rapport du Groupe de recherche sur l'eau souterraine. (Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, soumis au MELCC en mars 2019 (version préliminaire)), 34 p et base de données MS Excel.

BRGM (2020) État des nappes d'eau souterraine au 1er août 2020 – Notes d'information – 10.07.2020 [En ligne] <https://www.brgm.fr/sites/default/files/communiqu%C3%A9-nappes-eau-souterraine-2020-08-note.pdf> [accédé en août 2020].

Buffin-Bélanger T, Chaillou G, Cloutier C-A, Touchette M, Héty B et McCormack R (2015). Programme d'acquisition de connaissance sur les eaux souterraines du nord-est du Bas Saint-Laurent (PACES-NEBSL) : Rapport final. 199p.

CAC (2009) La gestion durable des eaux souterraines au Canada : le comité d'experts sur les eaux souterraines au Canada. 292 p.

CDWR (2017) Best Management Practices for the Sustainable Management of Groundwater – Sustainable Management Criteria (DRAFT), State of California, California Natural Resources Agency, Department of Water Resources, 36 p. https://water.ca.gov/-/media/DWR-Website/Web-Pages/Programs/Groundwater-Management/Sustainable-Groundwater-Management/Best-Management-Practices-and-Guidance-Documents/Files/BMP-6-Sustainable-Management-Criteria-DRAFT_ay_19.pdf

CDWR (2019) Sustainable Groundwater Management Act 2019 Basin Prioritization – Process and Results. State of California, California Natural Resources Agency, Department of Water Resources, Sustainable Groundwater Management Program, 43 p. et annexes. <https://water.ca.gov/Programs/Groundwater-Management/Basin-Prioritization>.

Carrier MA, Lefebvre R, Rivard C et al. (2013a) 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, Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau-Terre-Environnement, Québec, QC, rapport final INRS R1433) 318 p.

Carrier MA, Lefebvre R, Rivard C et al. (2013b) Atlas Hydrogéologique de la Montérégie Est, Québec, Canada. (Projet réalisé conjointement par l'INRS, la CGC, l'IRDA, l'OBV Yamaska et l'USGS dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines, Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau-Terre-Environnement, Québec, QC, Rapport de recherche R1432, Juin 2013) p 84.

CCME (2011) Initiative: Groundwater Assessment Approach Pilot Projects. (CCME, WMC Groundwater Project Team, 2012/13 Workplan Proposal).

CCME (2017) Démarche d'évaluation de la pérennité des eaux souterraines : guide d'application. PN 1569, ISBN 978-1-77202-039-7 PDF, 65 p.

CEHQ (2019) Historique des niveaux et des débits de différentes stations hydrométriques [En ligne] https://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/historique_donnees/default.asp [accédé en décembre 2019].

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

Chapman T (1999) A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. *Hydrological Processes*, 13(5), 701-714.

Cloutier V, Blanchette D, Dallaire P.-L, Nadeau S, Rosa E et Roy M (2013) Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines de l'Abitibi-Témiscamingue (partie 1). Rapport final déposé au Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec. Rapport de recherche P001. Groupe de recherche sur l'eau souterraine, Institut de recherche en mines et en environnement, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 135 p., 26 annexes, 25 cartes thématiques (1:100 000).

Cloutier V, Rosa E, Nadeau S, Dallaire P.-L, Blanchette D et Roy M (2015) Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines de l'Abitibi-Témiscamingue (partie 2). Rapport final déposé au Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec. Rapport de recherche P002.R3. Groupe de recherche sur l'eau souterraine, Institut de recherche en mines et en environnement, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 313 p., 15 annexes, 24 cartes thématiques (1:100 000).

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

Côté M-J, Lachance Y, Lamontagne C, Nastev M, Plamondon R et 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 et Lefebvre R (2010) Groundwater recharge assessment in the Chateauguay River watershed. *Canadian Water Resources Journal*, 35(4), 451-468, doi: 10.4296/cwrj3504451.

Dingman S.L (2002) *Physical hydrology*, Waveland Press, Inc. Deuxième édition, 646 p.

Delmotte S (2017) Projet RADEAU – Recherche participative d'alternatives durables pour la gestion de l'eau en milieu agricole dans un contexte de changement climatique. Présentation au Symposium d'Ouranos, 15 novembre 2017.

Domaine J (2019) Cadres de gestion. Rapport rédigé dans le cadre d'un stage Master 2 de l'Université de Rennes 1 réalisé à l'INRS sous la direction de R. Lefebvre, 51 p.

Domaine J, Lefebvre R, Huchet F, Raynauld M et Lahrarti S (2020) Indicateurs de stress hydrique à l'échelle régionale : revue et applicabilité au contexte québécois. 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 final de la phase 1. Soumis au Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau Terre Environnement, Rapport de recherche R1866, Février 2020, 96 p.

Eckhardt K (2008) A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods. *Journal of Hydrology*, 352(1-2), 168-173.

Gassert F, Landis M, Luck M, Reig P et Shiao T (2013a) *Aqueduct Global Maps 2.0*. Working Paper. Washington, DC: World Resources Institute. [En ligne] <https://www.wri.org/publication/aqueduct-metadata-global>.

Gassert FP, Reig P, Luo T et Maddocks A (2013b) *Aqueduct country and river basin rankings: a weighted aggregation of spatially distinct hydrological indicators*. Working paper. Washington, DC: World Resources Institute, November 2013. [En ligne] <https://www.wri.org/publication/aqueduct-country-and-river-basin-rankings>.

Gassert F, Landis M, Luck M, Reig P et Shiao T (2014) *Aqueduct Global Maps 2.1*. Working Paper. Washington, DC: World Resources Institute. Available online at <http://www.wri.org/publication/aqueduct-global-maps-21>.

Gosselin JS, Huchet F et Lefebvre R (2019) Indicateurs de l'état des ressources en eau souterraine sous l'effet du climat et de leur exploitation – Rapport intérimaire #2. Soumis au Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau Terre Environnement, Rapport de recherche R1857, Décembre 2019, 69 p.

Gosselin JS, Huchet F et Lefebvre R (2020) Indicateurs de l'état des ressources en eau souterraine sous l'effet du climat et de leur exploitation – Rapport final. Soumis au Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau Terre Environnement, Rapport de recherche R2039, Juin 2021, 226 p.

Gosselin JS, Lefebvre R, Vigneault H, Huchet F et Raynauld M (2021) Développement de méthodologies d'analyse des données du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ) – Rapport final. Soumis au Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau Terre Environnement, Rapport de recherche R1942, Décembre 2020, 93 p.

Herbert C et Döll P (2019) Global Assessment of Current and Future Groundwater Stress With a Focus on Transboundary Aquifers, *Water Resources Research*, First published: 14 May 2019 [En ligne] <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2018WR023321> [accédé en juin 2019].

Hofste R, Kuzma S, Walker S, Sutanudjaja EH et al. (2019) *Aqueduct 3.0: Updated Decision-Relevant Global Water Risk Indicators Technical Note*. Washington, DC: World Resources Institute. [En ligne] <https://www.wri.org/publication/aqueduct-30>.

Huchet F, Gosselin JS, Raynauld M, Domaine J et 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 synthèse. Rapport de recherche R2062, soumis au Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) en août 2021, 52 p.

ImaGeau (2020a) Cumul pluviométrique des 6 derniers mois. Info Sécheresse [En ligne] <https://info-secheresse.fr/indicator/resources> [accédé en août 2020].

ImaGeau (2020b) Indicateur sécheresse nappes phréatiques. Info Sécheresse [En ligne] <https://info-secheresse.fr/indicator/groundwater> [accédé en août 2020].

Jarvis A, Reuter HI, Nelson A et Guevara E (2008) Hole-filled SRTM for the globe Version 4 available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database (<http://srtm.csi.cgiar.org>), 15, 25-54.

Klinka T (2016) Note sur l'utilisation de l'IPS (Indicateur Piézométrique Standardisé) pour le Bulletin de Situation Hydrologique (BSH). Note technique, BRGM/RP-67249-FR, 35 p.

Konikow LF et Leake SA (2014) Depletion and capture: revisiting “the source of water derived from wells”. *Groundwater* 52 Focus Issue, 100–11.

Larocque M, Gagné S, Tremblay L et Meyzonnat G (2013) *Projet de connaissance des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour - Rapport final*. Rapport déposé au Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs. 219 p.

Lavigne MA (2006) *Modélisation numérique de l'écoulement régional de l'eau souterraine dans le bassin versant de la rivière Châteauguay*. Mémoire. Québec, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Maîtrise en sciences de la terre, 174 p.

Lavigne MA, Nastev M, Lefebvre R et Croteau A (2010) Regional sustainability of the Châteauguay River aquifers. *Canadian Water Resources Journal*, 35(4), 487-502.

Leblanc Y, Légaré G, Lacasse K, Parent M et Campeau S (2013) *Caractérisation hydrogéologique du sud-ouest de la Mauricie*. Rapport déposé au ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec. Département des sciences de l'environnement, Université du Québec à Trois-Rivières, 134 p., 15 annexes et 30 documents cartographiques (1:100 000).

Lefebvre R, Martin A, Carrier MA, Bleser J, Rivard C, Lavoie R, Bourque É et Ouellet M (2013) Sustainable groundwater resources indicators applied to the Montérégie Est regional aquifer system, Quebec, Canada. GéoMontréal 2013, 66th Canadian Geotechnical Conference and the 11th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference, Montreal, Quebec, Canada, Sept. 29 to Oct. 3, 2013.

Lefebvre R, Ballard JM, Carrier MA, et al. (2015) Portrait des ressources en eau souterraine en Chaudière-Appalaches, Québec, Canada. Projet réalisé conjointement par l'Institut national de la recherche scientifique (INRS), l'Institut de recherche et développement en agroenvironnement (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, Rivard C, Carrier MA, Parent M, Laurencelle M, Beaudry C, Martin A, Bleser J, Lavoie R, Bourque É et Ouellet M (2016) Conceptual models and sustainable groundwater resource indicators as transfer tools to stakeholders of the Lake Champlain transboundary aquifer. Abstract EGU2016-10464, EGU General Assembly 2016, Vienna, Austria, 17-22 April 2016.

Lefebvre R (2018) The southern Quebec water resources synthesis project (PSyRESQ). Presented at the Workshop on surface-ground water modeling for the Great Lakes basin, International Joint Commission - Canada and United States, April 4-5, 2018, NOAA Great Lakes Environmental Research Laboratory, Ann Arbor, MI, USA.

Lefebvre R, Ballard JM, Raynauld M, Huchet F, Colléau É et Laurencelle M (2019) Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES Estrie): Rapport d'étape de la phase 1. Rapport de recherche (R1851). INRS, Centre Eau Terre Environnement, Québec.

Li Q (2013) Groundwater Sustainability in Prince Edward Island. Ministère de l'Environnement, du Travail et de la Justice, Î.-P.-É., 32 p.

MAMROT (2010) Décret de population pour l'année 2011. Gouvernement du Québec, MAMROT, décembre 2010, URL : www.mamrot.gouv.qc.ca/organisationmunicipale/decret-de-population.

MAPAQ (2011a) Base de données sur les productions agricoles. Gouvernement du Québec, données tabulaires provenant du système de Gestion Intégrée des Ressources en Milieu Agricole (GIRMA) et distribuées en 2011.

MAPAQ (2011b) Répertoire des piscicultures. Gouvernement du Québec, Direction régionale de l'Outaouais, MAPAQ.

Margat J, Foster S et Droubi A (2006) Concept and Importance of Non-Renewable Resources. In: Foster S et Loucks DP (eds), Non-Renewable Groundwater Resources: A Guidebook on Socially-Sustainable Management for Water Policy-Makers. UNESCO, IHP-VI Series on Groundwater No. 10.

Martin A, Bleser J, Carrier MA, Rivard C et Lefebvre R (2013) Évaluation d'indicateurs de gestion durable des eaux souterraines. Rapport préliminaire, OBV Yamaska, CGC et INRS-ETE, projet CCME réalisé pour le MELCC, 8 février 2013, 29 p.

McKee TB, Doesken NJ et Kleist J (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, 17-22 January 1993, Anaheim, California, USA, 6 p.

M'Couezou J (2018) Caractérisation et indicateurs de gestion durable des eaux souterraines. Mémoire de stage, Étudiante de 2^{ème} année à l'École Nationale Supérieure en Environnement, Géoressources et Ingénierie du développement Durable (ENSEGID), 121 p.

MDDEFP (2011) Répertoire des réseaux municipaux de distribution d'eau potable. Gouvernement du Québec, URL : www.mddep.gouv.qc.ca/eau/potable/distribution.

MDDELCC (2016) Bilan de la qualité de l'eau potable au Québec 2010-2014, [En ligne] <http://www.mddecc.gouv.qc.ca/>, 80 p.

MDDELCC (2018) Atlas hydroclimatique du Québec méridional – Rapport technique. Québec, 2018, 65 pages. <http://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/CruesPrintanieres/Q1max2P.htm>.

MELCC (2017) Utilisation du territoire. [En ligne] <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/utilisation-du-territoire> [accédé en février 2021].

MELCC (2019a) Cadre général d'orientation de la future Politique sur la gestion de l'eau. [En ligne] <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/orientation/index.htm> [accédé en mai 2019].

MELCC (2019b) Politique Nationale de l'Eau. [En ligne] <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/politique/> [accédé en mai 2019].

MELCC (2019c) Eaux souterraines. [En ligne] <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/> [accédé en juillet 2019].

MELCC (2020) Zones de gestion intégrée de l'eau par bassins versants. Données Québec, Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques [En ligne] <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/zgiebv> [accédé en juillet 2020].

MELCC (2021a) Règlement sur la déclaration des prélèvements d'eau. [En ligne] <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/prelevements/declaration.htm> [accédé en février 2021].

MELCC (2021b) Installations municipales de distribution d'eau potable. [En ligne] <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/potable/distribution/resultats.asp> [accédé en février 2021].

MELCC (2021c) Système d'information hydrogéologique (SIH). [En ligne] <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/sih/index.htm> [accédé en février 2021].

MELCC (2021d) Guide de conception des installations de production d'eau potable. Gouvernement du Québec, MAPAQ, mai 2021, URL : <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/potable/guide/index.htm>.

Monfet J (1979) Évaluation du coefficient de ruissellement à l'aide de la méthode SCS modifiée. Ministère des Richesses naturelles, Service de l'hydrométrie, Gouvernement du Québec, 39 p.

MRC de la Haute-Yamaska (2017) Plan directeur de l'eau (2017-2021) – Pour des lacs et des cours d'eau en santé en Haute-Yamaska. [En ligne] <https://haute-yamaska.ca/pde/> [accédé en février 2021].

Nastev M, Lefebvre R, Rivera A et Martel R (2006) Quantitative assessment of regional rock aquifers, south-western Quebec, Canada. Water Resources Management, 20 (1), 1-18.

NDMC (2020) SPI Program. National Drought Mitigation Center [En ligne] <https://drought.unl.edu/droughtmonitoring/SPI/SPIProgram.aspx> [accédé en août 2020].

NIDIS (2020) SPI - Standardized Precipitation Index. National Integrated Drought Information System [En ligne] <https://www.drought.gov/drought/data/category/spi-standardized-precipitation-index> [accédé en août 2020].

OMM (2012) Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé. Organisation météorologique mondiale, Temps - Climat – Eau. OMM-N°1090. 17 p.

- Pétre MA, Rivera A et Lefebvre R (2019) Numerical modeling of a regional groundwater flow system to assess groundwater storage loss, capture and sustainable exploitation of the transboundary Milk River Aquifer (Canada – USA). *J. of Hydrology*, 575 (August 2019), 656-670, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.05.057.
- Poirier C (2012) Estimation préliminaire des débits de base à des sites de stations hydrométriques du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). Contribution au Programme d'acquisition des connaissances sur les eaux souterraines (PACES). Présentation power point faite aux équipes PACES, 2012-10-30. Données numériques identifiées sous la version beta_v2 2012-10-02, déposés sur le site ftp du PACES.
- Poirier C, Fortier Filion TC, Turcotte R et Lacombe P (2012) Apports verticaux journaliers estimés de 1900 à 2010 – version 2012. Contribution au Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES). Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), Direction de l'expertise hydrique, 112 p.
- 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).
- Seguin JJ et Willeumier A (2006) Exploitabilité des ressources en eaux souterraines en France. Résistance à la sécheresse des principaux aquifères à nappe libre. BRGM-55188-FR, 116 p.
- Seguin JJ (2015) Proposition d'un indicateur piézométrique standardisé pour le Bulletin de Situation Hydrologique « nappes ». Rapport final, BRGM/RP-64147-FR, 89 p.
- Schroeder PR, Aziz NM, Lloyd CM et Zappi PA (1994) The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model: Engineering documentation for version 3. EPA/600/R-94/168b, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, D.C., 126 p.
- Seguin JJ et Klinka T (2016) Index Piézométrique Standardisé (IPS) – Bilans et comparaisons avec l'Indicateur du BSH. Note technique, BRGM/RP-67251-FR, 49 p.
- Shilling F (2013) Water Sustainability Indicators Framework: Final Report. Rapport pour le California Department of Water Resources, 309 p.
- SIGÉOM (2020) Données vectorielles et services web – Téléchargement par thème [En ligne] <http://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/SIGEOM/TOUTQC/FRA/> [accédé en juillet 2020].
- Smail RA, Pruitt AH, Mitchell PD et Colquhoun JB (2019) Cumulative deviation from moving mean precipitation as a proxy for groundwater level variation in Wisconsin, *Journal of Hydrology X*, vol. 5 (nov. 2019), doi: 10.1016/j.hydroa.2019.100045.
- Stapinsky M (2021) Projet d'élaboration d'indicateurs comme outils d'aide à l'analyse des demandes de prélèvements d'eau souterraine. Direction de l'eau potable et des eaux souterraines, Direction générale des politiques de l'eau, Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. Réunion no. 6 du comité, 14 avril 2021.
- Statistiques Canada (2021) Le système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN) 2002 [En ligne] <https://www.statcan.gc.ca/fra/sujets/norme/scian/2002/scian-2002index> [accédé en février 2021].
- Talbot Poulin M., Comeau G, Tremblay Y, Therrien R, Nadeau MM, Lemieux JM, Molson J, Fortier R, Therrien P, Lamarche L, Donati-Daoust F et Bérubé S (2013) Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire de la Communauté métropolitaine de Québec, Rapport final. Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, mars 2013, 172 pages, 19 annexes, 28 cartes.

- Thomas BF (2019) Sustainability indices to evaluate groundwater adaptive management: a case study in California (USA) for the Sustainable Groundwater Management Act. *Hydrogeology Journal* 27:239–248, doi: 10.1007/s10040-018-1863-6.
- Thomas BF, Caineta J et Nanteza J (2017) Global assessment of groundwater sustainability based on storage anomalies. *Geophysical Research Letters*, 44, 11445–11455, doi: 10.1002/2017GL076005.
- Thornthwaite CW et Mather JR (1955) *The Water Balance*, Publications in Climatology VIII(1): 1-104, Drexel Institute of Climatology, Centerton, New Jersey.
- UNESCO (2007) *Groundwater Resources Sustainability Indicators*. Girman J, Van der J, Haie N, Hirata R, Lipponen A, Lopez-Gunn E, Neupane B, Shah T, Vrba J, Wallin B, UNESCO, IHP-VI, Series on Groundwater No.14, 123 p.
- Vernoux JF et Seguin JJ (2013) Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact u changement climatique sur les eaux souterraines (année 3) et essai de détermination d'un index piézométrique standardisé. *Rapport final*, BRGM/RP-61807-FR, 110 p.
- Vicente-Serrano SM, Beguería S et López-Moreno JI (2010) A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718.
- Vrba J et Zaporozec A (eds) (1994) *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*. IAH/UNESCO, vol. 16, Heise, Hannover.
- WESA (2013) *Assessment Report Analysis of Groundwater Pilot Projects*. Final report, PN 157. Water Management, Committee Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME), 116 p.
- WMO (1992) *International Glossary of Hydrology*, 2nd revised edn.
- WWAP (2006) *World Water Development Report 2: Water – A Shared Responsibility*. UN-WWAP.