

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



Institut national
de la recherche
scientifique

INRS.CA

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

ISBN : 978-2-89146-987-6 (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 synthèse

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 R2062

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* ».

Une revue de littérature a d'abord permis de répertorier plusieurs indicateurs de stress hydrique, dont cinq (5) 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. Sur la base de données disponibles, 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.

L'indicateur de stress hydrique de base présente des difficultés considérables au niveau des données à utiliser, pour distinguer la consommation de l'usage de l'eau, ainsi que par sa faible résolution spatiale. Nous ne recommandons donc pas de produire cet indicateur. L'indicateur de stress sur l'eau souterraine représente le rapport entre les prélèvements totaux d'eau souterraine et la recharge. Cet indicateur est simple et rapide à produire et peut être mis-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, équivalent au *Standard Precipitation Index* (SPI), ainsi qu'un indicateur similaire basé sur les niveaux piézométriques, correspondant au *Standard Piezometric Level Index* (SPLI), ont été testés. Ensemble, ces indicateurs pourraient permettre d'expliquer la variabilité des niveaux d'eau souterraine ainsi que de variables hydrologiques. 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 dont les conditions météorologiques et hydrogéologiques sont distinctes et qui respectent les limites des grands bassins hydrologiques. Pour une région de 36 000 km² au sud du Québec, douze (12) secteurs hydroclimatiques ont ainsi été définis.

Un indicateur intramunicipal de l'usage de l'eau souterraine a été produit pour distinguer les types d'usage ainsi que l'usage total de l'eau souterraine à l'intérieur des municipalités. Cet indicateur permet d'identifier les zones sous stress au sein des municipalités et de différencier les usages et donc les potentiels conflits. Cet indicateur a aussi été testé en Montérégie Est et sur une région spécifique en Montérégie Ouest avec des résultats très probants. L'indicateur intramunicipal 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 en Montérégie Est ont ainsi été utilisés pour 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).

Nous recommandons la production de l'indicateur de stress sur l'eau souterraine à l'échelle municipale ainsi que des quatre indicateurs basés sur l'indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine sur l'ensemble du Québec municipalisé. Toutefois, cela nécessiterait que la recharge et l'usage de l'eau souterraine aient été estimés avec des méthodes produisant des résultats similaires. Toutefois, notre revue des différents projets régionaux (PACES et autre) réalisés au Québec a montré que des approches très différentes ont été utilisées pour faire ces estimations. Il est donc recommandé que le MELCC obtienne une estimation uniforme de la recharge historique et en climat futur avec la même méthode pour toutes les régions ayant fait l'objet de projets régionaux de caractérisation hydrogéologique. Le MELCC devrait aussi se doter des capacités de produire régulièrement à l'interne une estimation de l'usage de l'eau (de surface et souterraine).

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	1
2	INDICATEURS DE GESTION DURABLE DES EAUX SOUTERRAINES	3
3	INDICATEURS DE STRESS HYDRIQUE.....	5
4	APPLICATION DES INDICATEURS DE STRESS HYDRIQUE	8
5	STRESS HYDRIQUE DE BASE (USAGE/DÉBIT)	10
6	STRESS SUR L'EAU SOUTERRAINE (USAGE/RECHARGE).....	12
7	INDICATEURS CLIMATIQUE ET PIÉZOMÉTRIQUE	16
8	DÉFINITION DES SECTEURS HYDROCLIMATIQUES	21
9	USAGE DE L'EAU SOUTERRAINE INTRAMUNICIPAL.....	26
10	STRESS SUR L'EAU SOUTERRAINE PAR SOUS-BASSIN HYDROGÉOLOGIQUE	32
11	APPLICABILITÉ À L'ENSEMBLE DU QUÉBEC MUNICIPALISÉ.....	41
12	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	48
13	BIBLIOGRAPHIE	50

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Grille de critères pour sélectionner les indicateurs à produire au Québec	5
Tableau 3.2 : Informations d'intérêt pour évaluer le stress hydrique d'après Martin et al. (2013) et le PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013a).....	6
Tableau 3.3 : Indicateurs de stress hydrique recommandés (voir les sections précédentes pour la définition des indicateurs).....	7
Tableau 5.1 : Stations hydrométriques et tronçons de l'Atlas hydroclimatique sélectionnés pour le calcul de l'indicateur hydrologique	10
Tableau 10.1 : Synthèse des ressources en eau souterraine en Montérégie Est dans les bassins hydrogéologiques de niveau 1 (1/2)	37
Tableau 10.2 : Synthèse des ressources en eau souterraine en Montérégie Est dans les bassins hydrogéologiques de niveau 1 (2/2)	38
Tableau 10.3 : Quantité de ressource disponible (recharge de l'eau souterraine) en Montérégie Est pour les bassins hydrogéologiques de niveau 2	39
Tableau 10.4 : Niveau d'usage (usage absolu de l'eau souterraine) en Montérégie Est pour les bassins hydrogéologiques de niveau 2.....	39
Tableau 10.5 : Aspect durable de l'exploitation des eaux souterraines (ratio usage/recharge) en Montérégie Est pour les bassins hydrogéologiques de niveau 2.....	39
Tableau 10.6 : Niveau des ressources en eau souterraine après exploitation (recharge effective) en Montérégie Est pour les bassins hydrogéologiques de niveau 2	39
Tableau 11.1 : Synthèse des estimées de recharge produits par les projets régionaux antérieurs	42
Tableau 11.2 : Synthèse des estimés d'usage de l'eau produits par les projets régionaux antérieurs (1/2)	46
Tableau 11.3 : Synthèse des estimés d'usage de l'eau produits par les projets régionaux antérieurs (2/2)	47

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Démarche de production et d’usage des indicateurs proposée par Martin et al. (2013)	4
Figure 4.1 : Planche cartographique formatée pour visualiser les indicateurs de stress hydrique – Cas de la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu.....	9
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)	10
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	13
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	17
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	18
Figure 7.3 : Tendence temporelle des niveaux d’eau moyens annuels au puits de Saint-Rémi.....	18
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).....	19
Figure 8.1 : Étapes de la définition des secteurs hydroclimatiques.....	22
Figure 8.2 : Secteurs hydroclimatiques et leurs regroupements définis dans le sud du Québec	23
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).....	25
Figure 9.1 : Processus de production de l’indicateur intramunicipal	28
Figure 9.2 : Indicateur intramunicipal du stress sur l’eau souterraine en Montérégie Est	29
Figure 9.3 : Usage total de l’eau souterraine en Montérégie Est.....	30
Figure 10.1 : Recharge (mm/an) dans les sous-bassins versants hydrogéologiques en Montérégie Est	33
Figure 10.2 : Usage de l’eau souterraine (mm/an) dans les sous-bassins versants hydrogéologiques en Montérégie Est	34
Figure 10.3 : Indicateurs de stress sur l’eau souterraine (usage/recharge) dans les sous-bassins versants hydrogéologiques en Montérégie Est	35
Figure 10.4 : Recharge effective (recharge – usage; mm/an) dans les sous-bassins versants hydrogéologiques en Montérégie Est	36
Figure 11.1 : Données de recharge disponibles en 2021 pour les secteurs couverts par les projets régionaux antérieurs	43

1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

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, 2019) 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-économiques) 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.

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).

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).

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). 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 évaluent 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 décrivant la méthodologie proposée et ses avantages et ses inconvénients dans le but d'une application des indicateurs pour d'autres régions du Québec.

2 INDICATEURS DE GESTION DURABLE DES EAUX SOUTERRAINES

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. 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 faut 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).

L'UNESCO (2007) a proposé dix indicateurs de gestion durable 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 considérés dans le projet pilote du CCME (2017) ont été établis sur la base des objectifs de gestion durable (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).

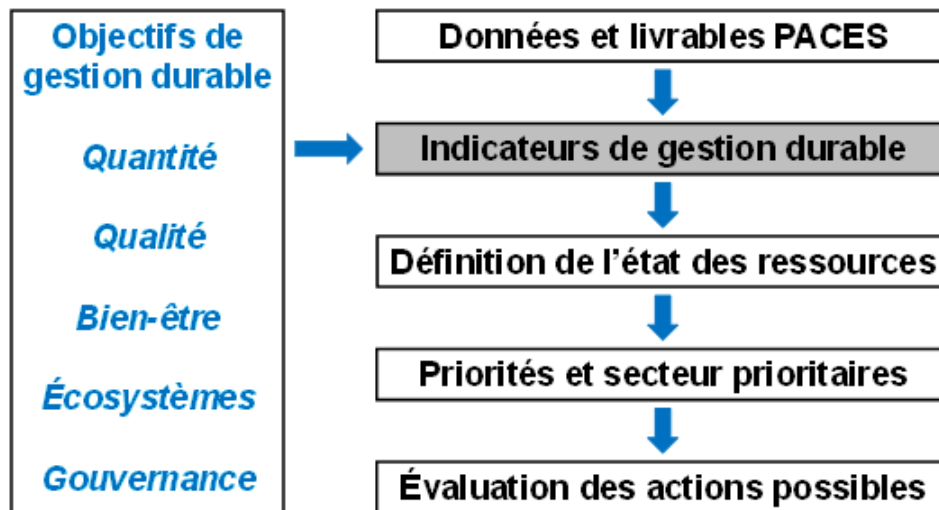


Figure 2.1 : Démarche de production et d'usage des indicateurs proposée par Martin et al. (2013)

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.

Le rapport final du projet fait l'inventaire d'un grand nombre d'indicateurs de gestion durable (Huchet et al., 2021). Les indicateurs retenus par Martin et al. (2013) ne sont qu'un sous-ensemble des indicateurs répertoriés dans le rapport final. 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. Le présent rapport synthèse ne va discuter que des indicateurs de stress hydrique.

3 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 rapport final fait l'inventaire de 34 indicateurs qui ont été répertoriés (Huchet et al., 2021 ; voir tableau 3.1). Ces indicateurs ont dû faire l'objet d'une sélection afin d'identifier ceux qui pourraient être produits au Québec (tableau 3.1).

Tableau 3.1 : 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 ?

En plus de ces critères de sélection des indicateurs, il est nécessaire de considérer les données disponibles qui pourraient être utilisées pour la production des indicateurs. Les tableaux suivants (tableaux 3.2 et 3.3) résument respectivement les informations de base qui sont pertinentes pour évaluer le stress hydrique et les indicateurs de stress dont la production pourrait être testée afin de mieux évaluer leur intérêt.

Sur la base de cette analyse, les indicateurs de stress hydrique suivants ont été jugés être les plus intéressants : 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. Dans le cadre de nos travaux, les trois premiers indicateurs ont été produits sur la base des données déjà 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. Il a été jugé qu'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 PACES ou antérieurs. Quant à un indicateur sur les problèmes d'approvisionnement, sa production nécessiterait que ces problèmes soient répertoriés de façon uniforme et systématique au Québec, ce qui n'est pas le cas présentement. De plus, la compilation du MELCC (2020) des problématiques prioritaires des OBV fait peu mention de l'eau souterraine.

Cela n'a pas été fait dans le cadre de nos travaux, mais le comité du MELCC sur les indicateurs de gestion durable a aussi évalué l'usage d'une combinaison d'indicateur pour élaborer des « seuils d'alerte » permettant d'identifier les secteurs ou les périodes avec des niveaux de stress jugés importants ou même qui nécessiteraient des mesures de mitigation ou l'amorce d'une gestion active. Le *World Resources Institute* (WRI) a 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., 2013). La Californie (2019) fournit aussi un exemple intéressant d'un processus de classement des bassins. Ce processus considère huit conditions présentes dans le bassin afin de le classer dans l'un des 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).

Tableau 3.2 : 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 3.3 : Indicateurs de stress hydrique recommandés (voir les sections précédentes pour la définition des indicateurs)

Indicateur	Pertinence et limites	Données requises
Indicateurs climatiques	▪ 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	▪ 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	▪ 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	▪ 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

4 APPLICATION DES INDICATEURS DE STRESS HYDRIQUE

Afin de tester l'application des indicateurs de stress hydrique, il était nécessaire de sélectionner une région pour laquelle une caractérisation régionale de la ressource en eau souterraine avait déjà été faite dans le cadre du Programme de connaissance sur les eaux souterraines (PACES) du Québec. La région de la Montérégie Est a été retenue parce qu'on y trouve une diversité de conditions hydrogéologiques et de niveaux d'utilisation de l'eau souterraine. L'usage des données de cette région était aussi facilité par le fait que le PACES Montérégie Est a été réalisé par l'INRS (Carrier et al., 2013a).

À partir des données du PACES Montérégie Est, une base de données spatialisées sur grille a été produite afin de faciliter le travail de production des indicateurs spatialisés. 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. Le rapport final donne des détails sur la production de cette grille (Huchet et al., 2021 ; annexe 1).

De plus, afin de faciliter l'usage des indicateurs spatialisés, notamment pour les analystes du MELCC, un format de planches cartographiques uniforme a été développé (figure 4.1). 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. 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.

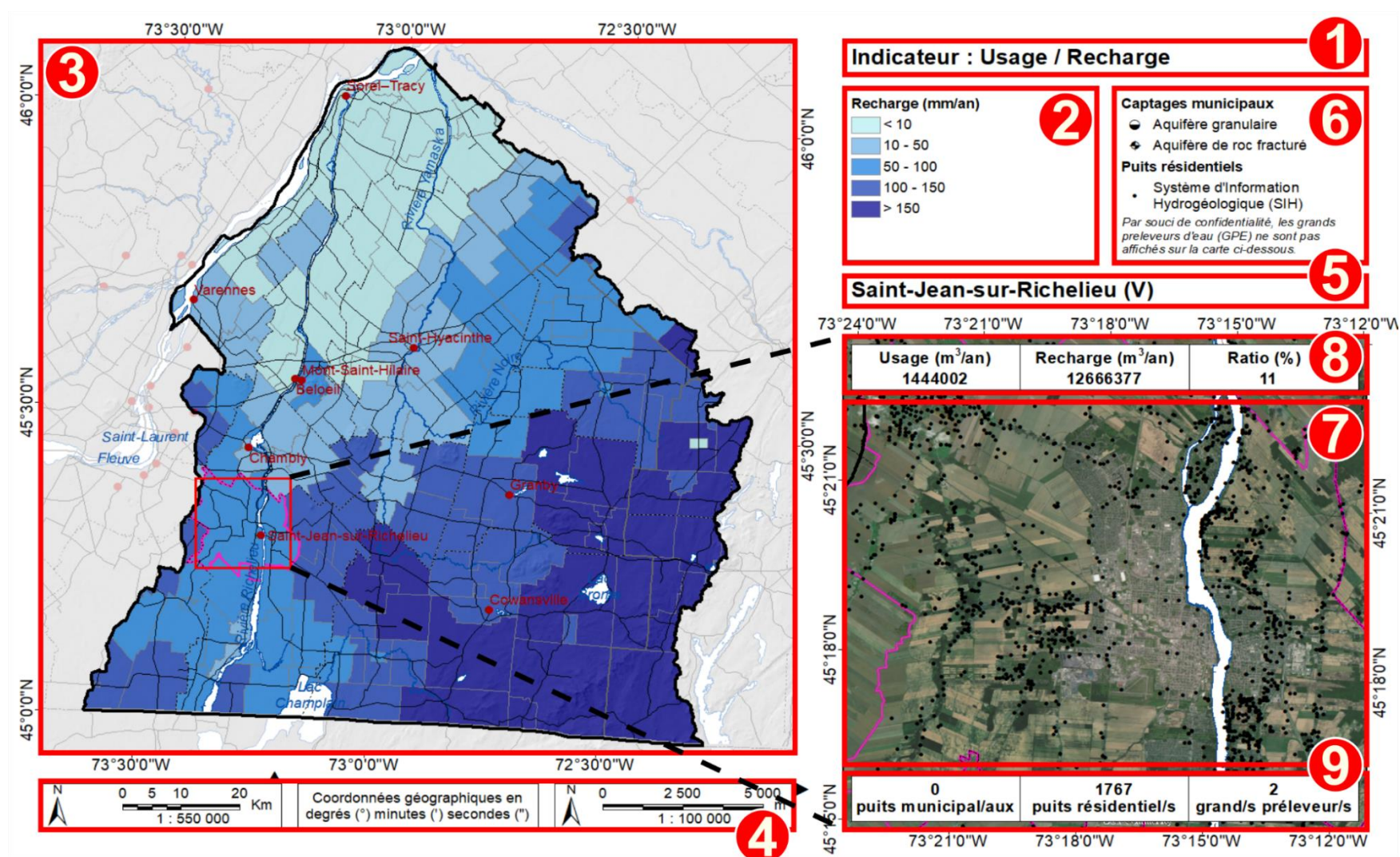


Figure 4.1 : Planche cartographique formatée pour visualiser les indicateurs de stress hydrique – Cas de la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu

5 STRESS HYDRIQUE DE BASE (USAGE/DÉBIT)

L'indicateur de stress hydrique de base estime le rapport entre la somme de l'utilisation totale des ressources en eau (de surface et souterraine) avec le débit de base ou le débit total du cours d'eau d'un bassin. Cet indicateur peut donc être produit à l'échelle des grands bassins ou de sous-bassins versants en fonction des données de débit disponibles. Les données d'utilisation totale de l'eau (souterraine et surface) proviennent du projet PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013b). Puisque les données d'usage correspondent à 2010, l'indicateur représente la même année. 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).

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.

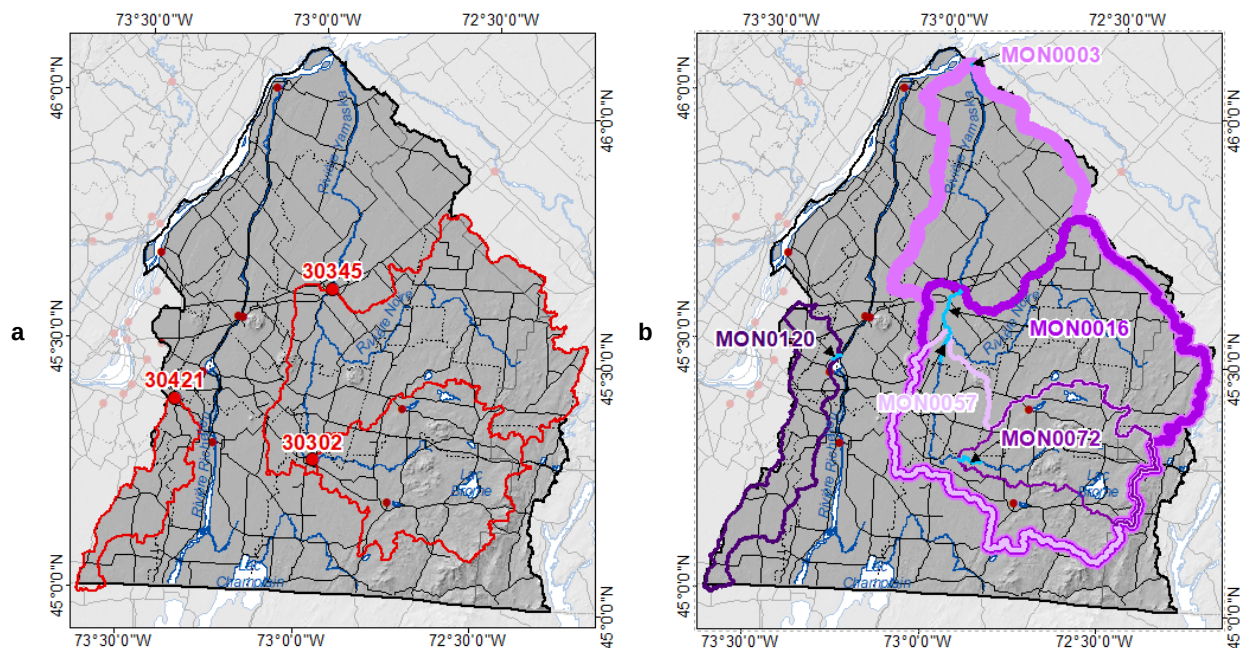


Figure 5.1 : Position des sources de données de débit sélectionnées et des bassins drainés : (a) stations de jaugeage (cercle rouge) et bassins drainés (polygone rouge) et (b) tronçons de l'Atlas hydroclimatique 2018 (ligne bleue) et bassins drainés (polygone violet)

Le traitement des données hydrologiques consiste à transformer le 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). D'autres filtres, menant à des débits de base différents, ont été considérés. Ceci 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 ont d'abord été produits par bassin versant : usage total de l'eau, débit total, débit de base, stress hydrique de base par rapport au débit total, et stress hydrique de base par rapport au débit de base. La taille des bassins étant très variable (tableau 5.1 et figure 5.1), il s'est avéré difficile de présenter des gammes d'utilisation de l'eau qui peuvent être comparable d'un bassin à l'autre pour toutes les cartes.

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. Récemment, Berthot et al. (2020) ont montré qu'il n'est pas simple de définir un débit environnemental assurant la préservation des cours d'eau sur la base d'une étude portant sur les cours d'eau du sud du Québec.

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. Tel que montré à la section sur l'indicateur de stress sur l'eau souterraine, les forts stress sont clairement visibles à l'échelle municipale, mais ils ne sont plus aussi apparents à l'échelle des MRC ou des bassins versants. 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.

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, 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.

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.

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). Dans le rapport final, cet indicateur a été produit à quatre échelles différentes : (1) les municipalités (figure 6.1), (2) les MRC, (3) les bassins versants de niveau 1 et, (4) les bassins versants de niveau 2. Toutefois, il s'est avéré que les échelles de présentation de cet indicateur au-delà de l'échelle municipale n'offraient pas la résolution spatiale requise pour identifier les secteurs sous de forts niveaux de stress. La section 9 va montrer les développements qui ont été faits pour définir la distribution spatiale de l'usage de l'eau souterraine à une échelle intramunicipale. Ces développements ont permis d'estimer et de présenter l'indicateur de stress sur l'eau souterraine à l'intérieur de limites naturelles qui s'avèrent plus adéquates que les limites municipales (section 10).

La figure 6.1 montre les trois cartes qui sont nécessaires à l'analyse de l'indicateur de stress sur l'eau souterraine : (a) l'utilisation totale de l'eau souterraine, (b) la recharge de l'aquifère rocheux et (c) le rapport « usage/recharge ». 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, rendant ainsi impropre à la consommation l'eau souterraine dans le nord de la Plate-forme du Saint-Laurent (livrable PACES no. 24A – Carrier et al., 2013b ; Beaudry et al., 2018). 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.

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 convertie en m³/an afin de pouvoir être aisément comparée à l'usage de l'eau souterraine. 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 mm/an (Carrier et al., 2013a), représentant un volume total proche des 847 Mm³/an. Néanmoins, la recharge 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).

Finalement, la combinaison de ces premières cartes (usage et recharge) permet d'établir la carte finale de l'indicateur « usage/recharge » (figure 6.1.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. La majorité des municipalités de Montérégie Est (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%). Dix (10) municipalités souffrent le plus de stress sur l'eau souterraine. Pour plusieurs municipalités, 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. Pour les petites municipalités, il est donc nécessaire d'utiliser l'indicateur « usage/recharge » avec précaution. 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).

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

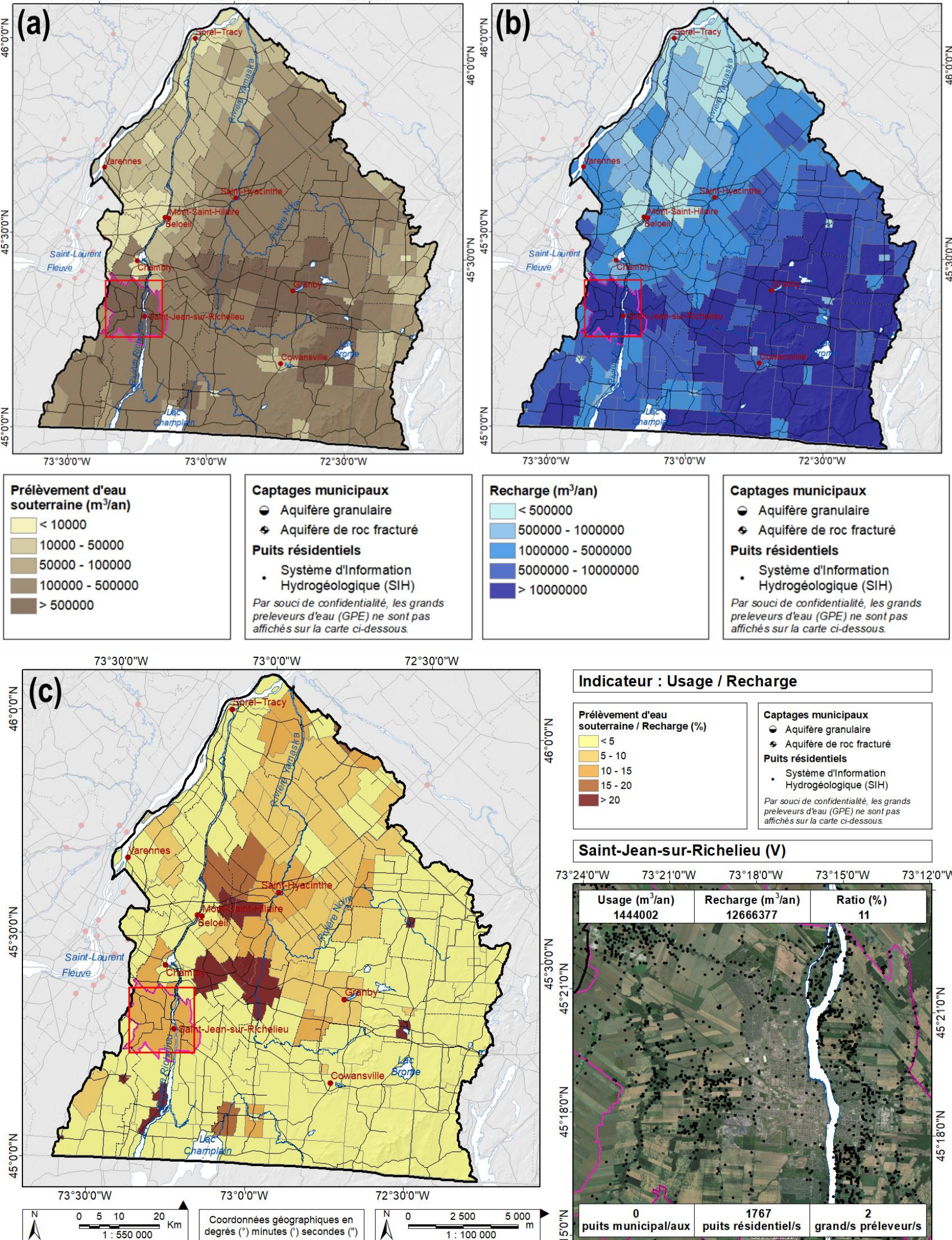


Figure 6.1 : Indicateur de stress sur l'eau souterraine par municipalité : (a) Exploitation de l'eau souterraine (m^3/an) ; (b) Recharge de l'aquifère rocheux régional (m^3/an) ; (c) Indicateur de la proportion de recharge utilisée (%) – Cas particulier de la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu

L'indicateur de stress sur l'eau souterraine présente plusieurs avantages, notamment la rapidité de sa production. Cet indicateur permet, à l'aide de cartes et de tableurs, de cibler rapidement 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, 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 (Ageco, 2019).

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. Tel que décrit à la section 9, il est possible d'atteindre un niveau de détails plus fin que l'échelle municipale.

Il ne semble pas d'intérêt 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 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 ou des bassins versants de niveau 1. Il est donc recommandé de déterminer l'indicateur uniquement à l'échelle municipale.

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 %. Il est actuellement difficile de définir un seuil « d'alerte » ou traduisant une « surexploitation » de la ressource en eau souterraine. Toutefois, par précaution et en accord avec Raskin (1997), les ratios de 10 et 20 % pourraient être associés à deux seuils « d'alerte » alors que le seuil de 40% pourrait indiquer une « surexploitation ». Ces seuils ont d'ailleurs été aussi utilisés à l'échelle intramunicipale (section 10).

Cet indicateur présente également quelques limitations. En premier lieu, il n'aborde pas les variations saisonnières d'utilisation d'eau faute de données suffisantes. Les indicateurs climatique et piézométrique (section 7) pourraient alors apporter une information complémentaire sur l'état de la nappe à l'été. 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). 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 (voir section 11). 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.

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. L'évaluation de la répartition intramunicipale des usages de l'eau souterraine (section 9) et le calcul de l'indicateur de stress sur l'eau souterraine à l'intérieur de sous-bassins hydrogéologiques (section 10) permet d'éviter les incohérences de l'indicateur estimé à l'échelle municipale.

7 INDICATEURS CLIMATIQUE ET PIÉZOMÉTRIQUE

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), puis en calculant la moyenne des précipitations totales pour la période considérée (similaire aux données des hydrogrammes de puits), et 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).

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 :

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

Ce calcul produit des indicateurs qui sont identiques au *Standard Precipitation Index* (SPI) (OMM, 2012 ; NIDIS, 2020) pour les précipitations ainsi qu'au *Standard Piezometric Level Index* (SPLI) (BRGM, 2020) pour le niveau d'eau souterraine qui est déjà utilisé en France pour le suivi des nappes.

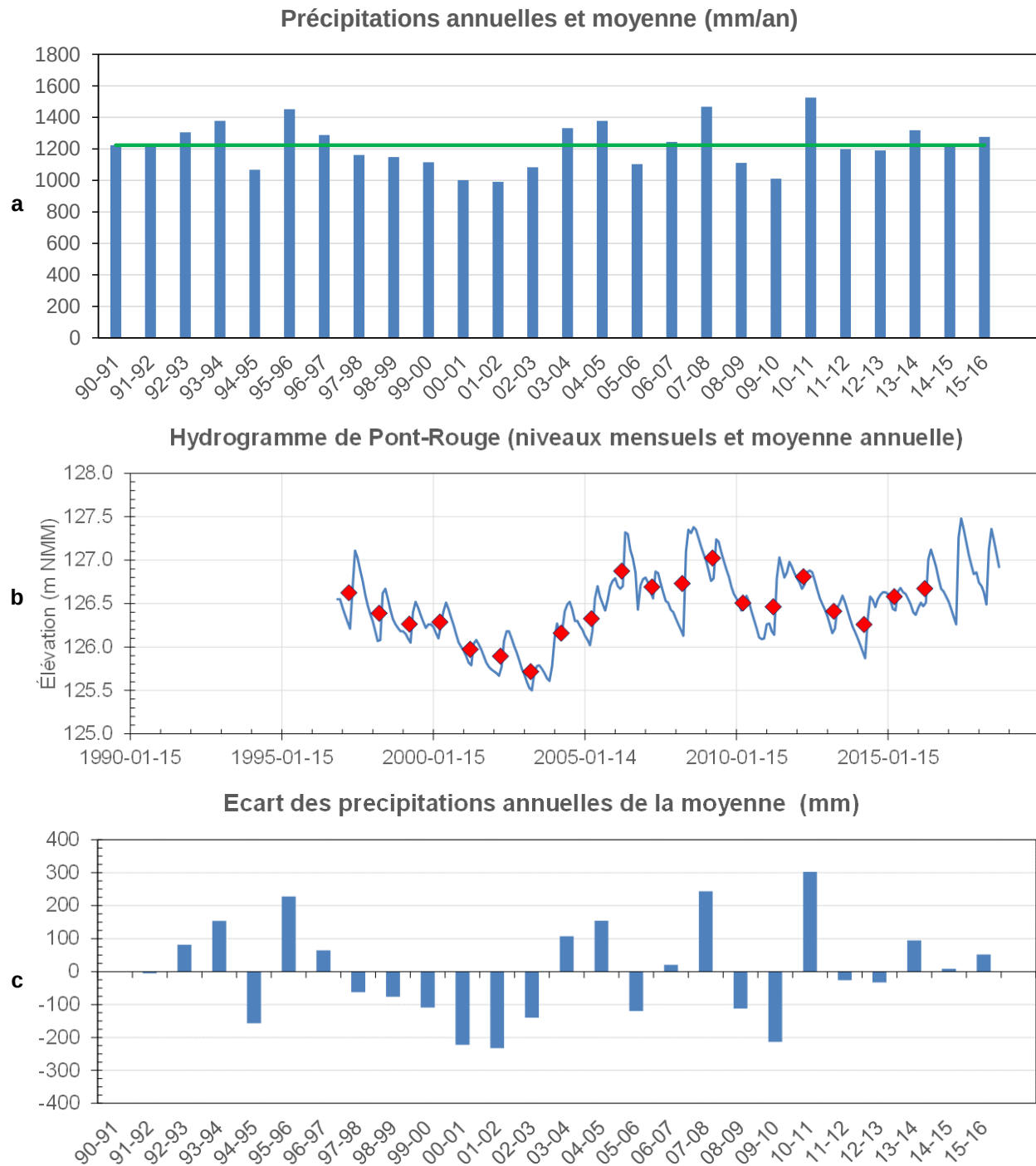


Figure 7.1 : Indicateur climatique et niveaux d'eau souterraine à Pont-Rouge : (a) Précipitations totales annuelles et leur moyenne (trait vert) ; (b) niveaux d'eau mensuels (trait bleu) et moyennes annuelles (losange rouge) ; (c) écart des précipitations totales par rapport à la moyenne

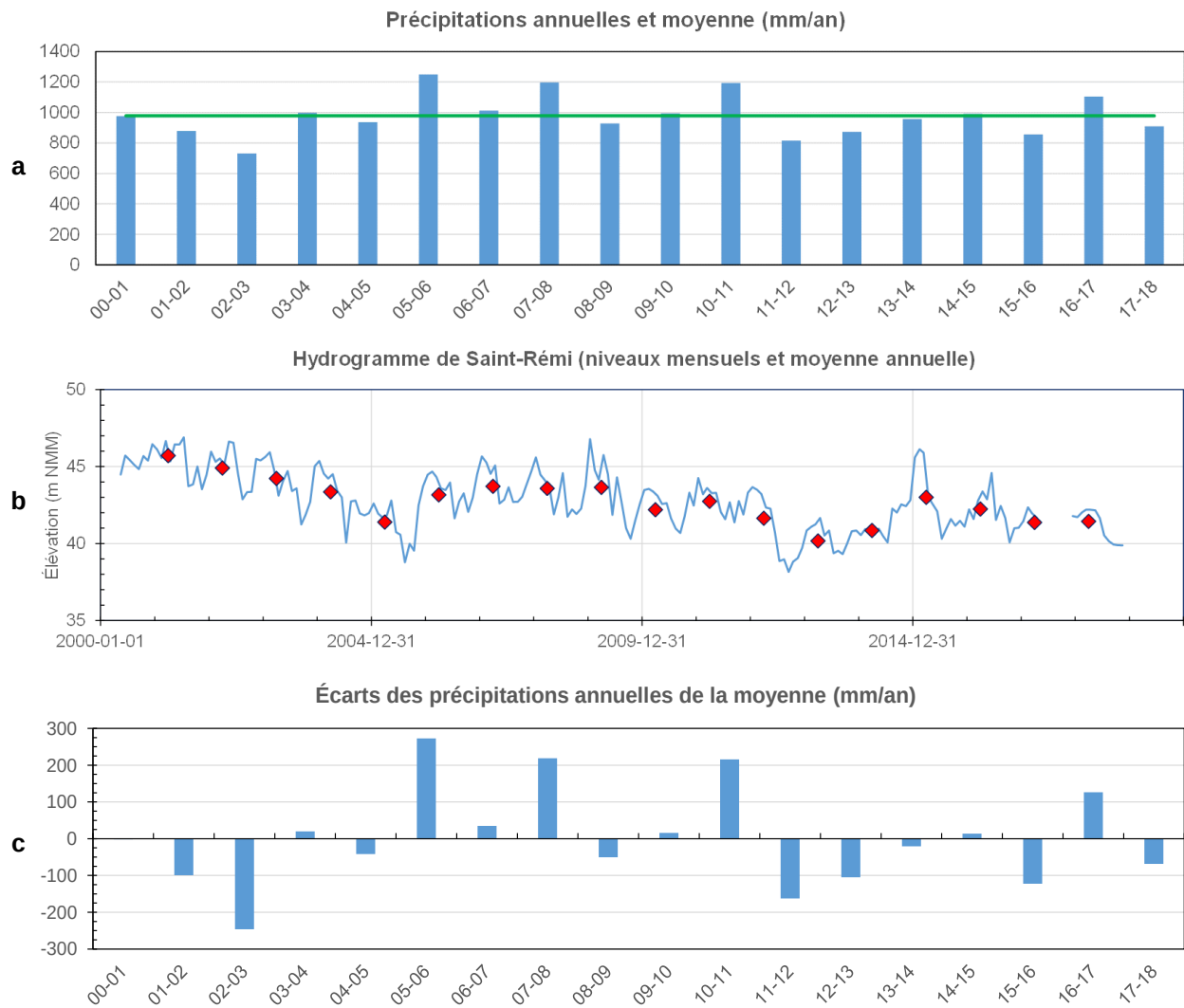


Figure 7.2 : Indicateur climatique et niveaux d'eau souterraine à Saint-Rémi : (a) Précipitations totales annuelles et leur moyenne (trait vert) ; (b) niveaux d'eau mensuels (trait bleu) et moyennes annuelles (losange rouge) ; (c) écart des précipitations totales par rapport à la moyenne

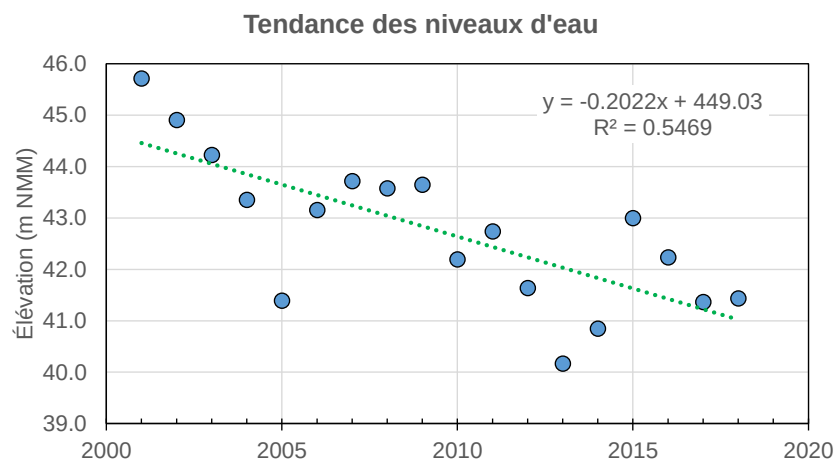


Figure 7.3 : Tendance temporelle des niveaux d'eau moyens annuels au puits de Saint-Rémi

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 la 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.

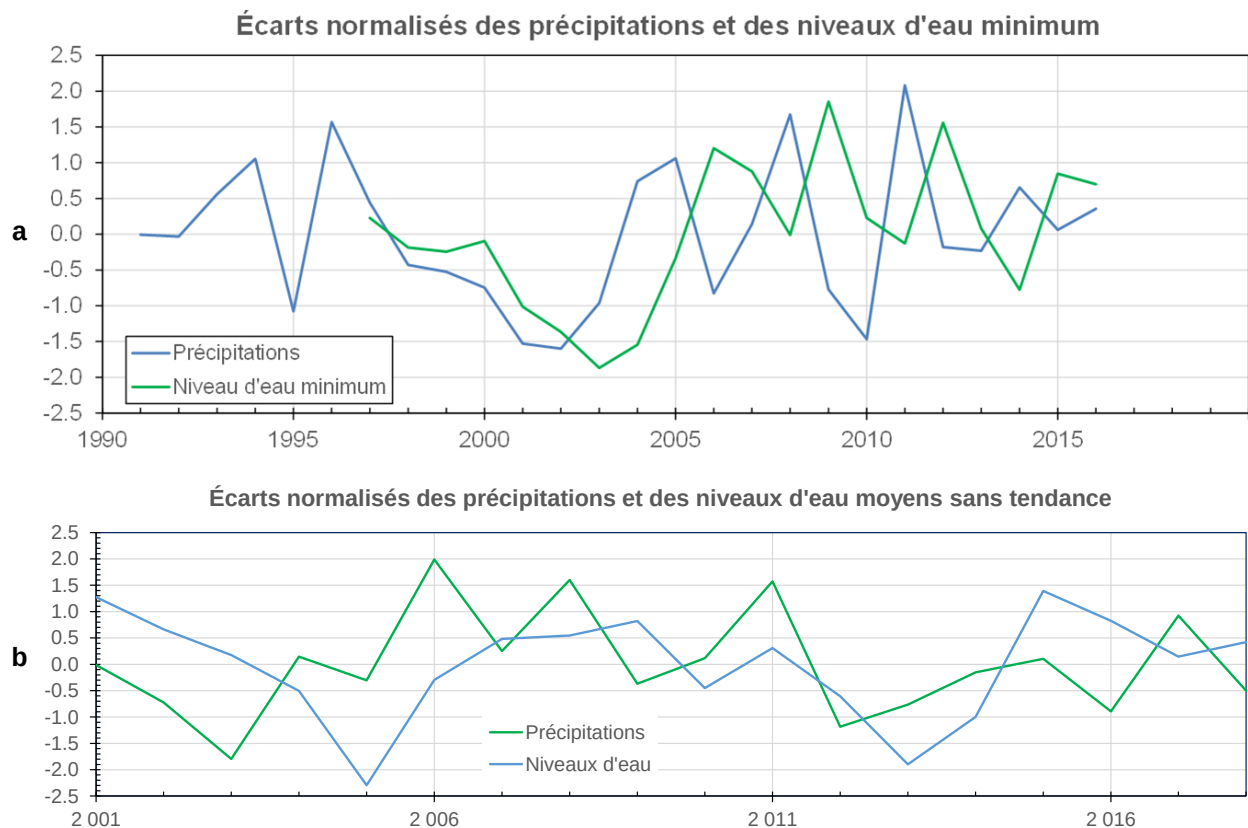


Figure 7.4 : Comparaison des écarts normalisés des précipitations et des niveaux d'eau pour les puits de Pont-Rouge (a) et de Saint-Rémi (b)

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 considérés dans le cadre de la présente étude.

En plus des niveaux d'eau souterraine, l'indicateur climatique peut aussi être mis en relation avec les données hydrologiques. Ces résultats sont illustrés dans le rapport final mais pas dans le présent rapport synthèse. Ces travaux ont montré 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.

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. 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 les précipitations moyennes afin d'utiliser directement les normales climatiques produites par le MELCC (<http://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/surveillance/index.asp>).

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 relative 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 sur une région donnée. 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. Un nouveau projet mandaté par le MELCC à l'INRS a été amorcé en 2021 pour produire un *Bulletin sur l'état des nappes* pour le sud du Québec avec les indicateurs climatiques et piézométriques à l'intérieur des 12 secteurs hydroclimatiques de cette région.

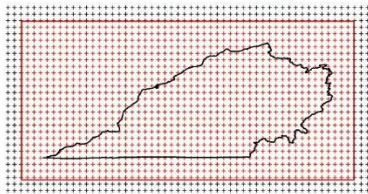
8 DÉFINITION DES SECTEURS HYDROCLIMATIQUES

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 sont distinctes, mais qui sont aussi reliées aux limites des grands bassins hydrologiques et reflètent des conditions hydrogéologiques particulières. Le rapport final présente en détail la démarche utilisée pour définir les secteurs hydroclimatiques (Huchet et al., 2021). Le présent rapport synthèse ne décrit que la démarche générale et les résultats obtenus.

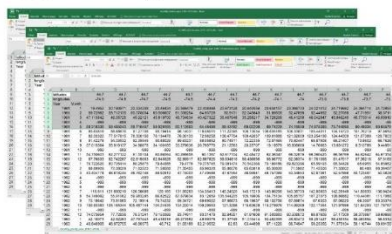
L'objectif est de définir des secteurs aux caractéristiques hydrogéologiques et climatiques distinctes et ce à une échelle adaptée. Dans le cadre d'un autre projet, les différents secteurs définis seront mis en relation avec un ou plusieurs puits du RSESQ afin de classer les puits de suivi en fonction de leur utilité (Gosselin et al., 2021). 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. Un nouveau projet de l'INRS mandaté par le MELCC a été entrepris en 2021 afin de produire un *Bulletin sur l'état des nappes* pour le sud du Québec en utilisant cette approche.

La zone d'étude considérée s'étend du fleuve Saint-Laurent à la frontière américaine sur une superficie de l'ordre de 36 000 km² (Gosselin et al., 2021). La figure 8.1 résume la démarche qui a été suivie pour différencier des zones aux caractéristiques hydrogéologiques et climatiques distinctes afin de définir les secteurs hydroclimatiques. D'abord, pour définir les conditions météorologiques, les points de la grille d'Info-climat (Bergeron, 2017) couvrant la zone d'étude ont été sélectionnés (étape 1, figure 8.1). Cette grille contient les valeurs quotidiennes des précipitations totales ainsi que des températures minimales et maximales pour la période allant de 1961 à 2017. Ces données ont d'abord été converties en fichiers Excel (étape 2, figure 8.1), les valeurs mensuelles des trois variables météorologiques ont été calculées, en plus des températures moyennes (étape 3, figure 8.1), et finalement les valeurs des normales pour les précipitations totales et la température moyennes annuelles ont été calculées et mises en carte pour la période de référence 1981-2010 (étape 4, figure 8.1). Ces cartes ont montré que les précipitations sont généralement plus importantes au sud-est de la région où la topographie est plus élevée alors que les températures moyennes sont plus élevées au sud-ouest qu'au nord-est de la zone d'étude. Le contrôle général de la topographie sur les précipitations a été défini en lissant d'abord le modèle numérique de terrain (étape 5, figure 8.1). Il est ainsi apparu que la limite fixée à 200 m d'altitude par rapport au niveau moyen de la mer marque un seuil entre une zone de précipitations plus faibles (1 050 mm/an) 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) (étape 6, figure 8.1). Finalement, les limites des zones de gestion intégrée en eau des bassins versants (ZGIEBV) ont été superposées à la limite topographique afin que les secteurs hydroclimatiques puissent être associés aux grands bassins versants du sud du Québec (étape 7, figure 8.1). 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. L'ajout de cette limite permet de séparer le bassin versant de la rivière Saint-François en trois zones : nord, est et ouest. Initialement, cette approche avait permis de définir 14 secteurs au sud du fleuve Saint-Laurent. Toutefois, certains secteurs 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 Missisquoi. Finalement, seuls quatre ZGIEBV n'ont pas été séparées, à savoir : Chaudière, Richelieu, du Chêne et Châteauguay à cause de l'absence de contrastes de précipitations ou de températures sur ces territoires. La figure 8.2 montre les 12 secteurs hydroclimatiques qui ont été définis pour le sud du Québec avec la démarche utilisée.

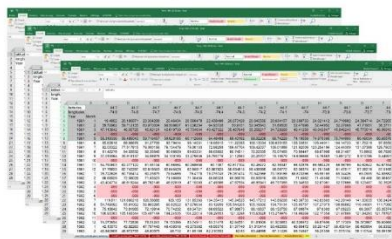
1 Sélection des mailles de la grille Info-climat



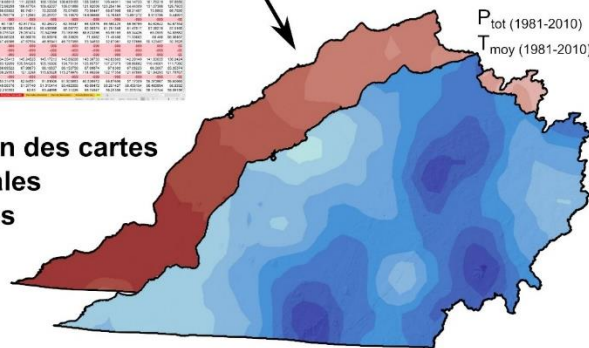
2 Conversion des fichiers de la grille Info-climat



3 Traitement des données climatiques mensuelles



4 Élaboration des cartes des normales climatiques



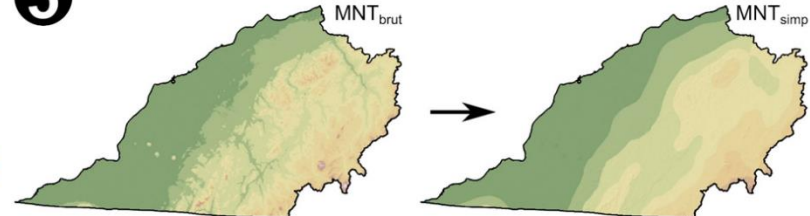
Données

P_{tot} (1961-2017)
 T_{min} (1961-2017)
 T_{max} (1961-2017)

Outils



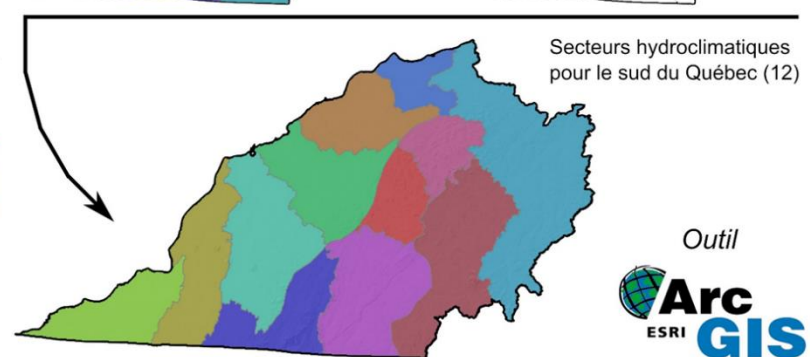
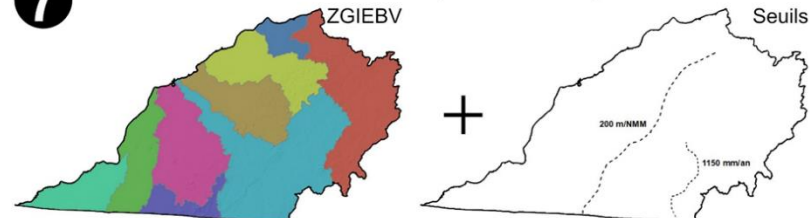
5 Simplification du modèle numérique de terrain



6 Extraction des seuils de séparation des contextes



7 Délimitation des secteurs hydroclimatiques finaux



Outil



Figure 8.1 : Étapes de la définition des secteurs hydroclimatiques

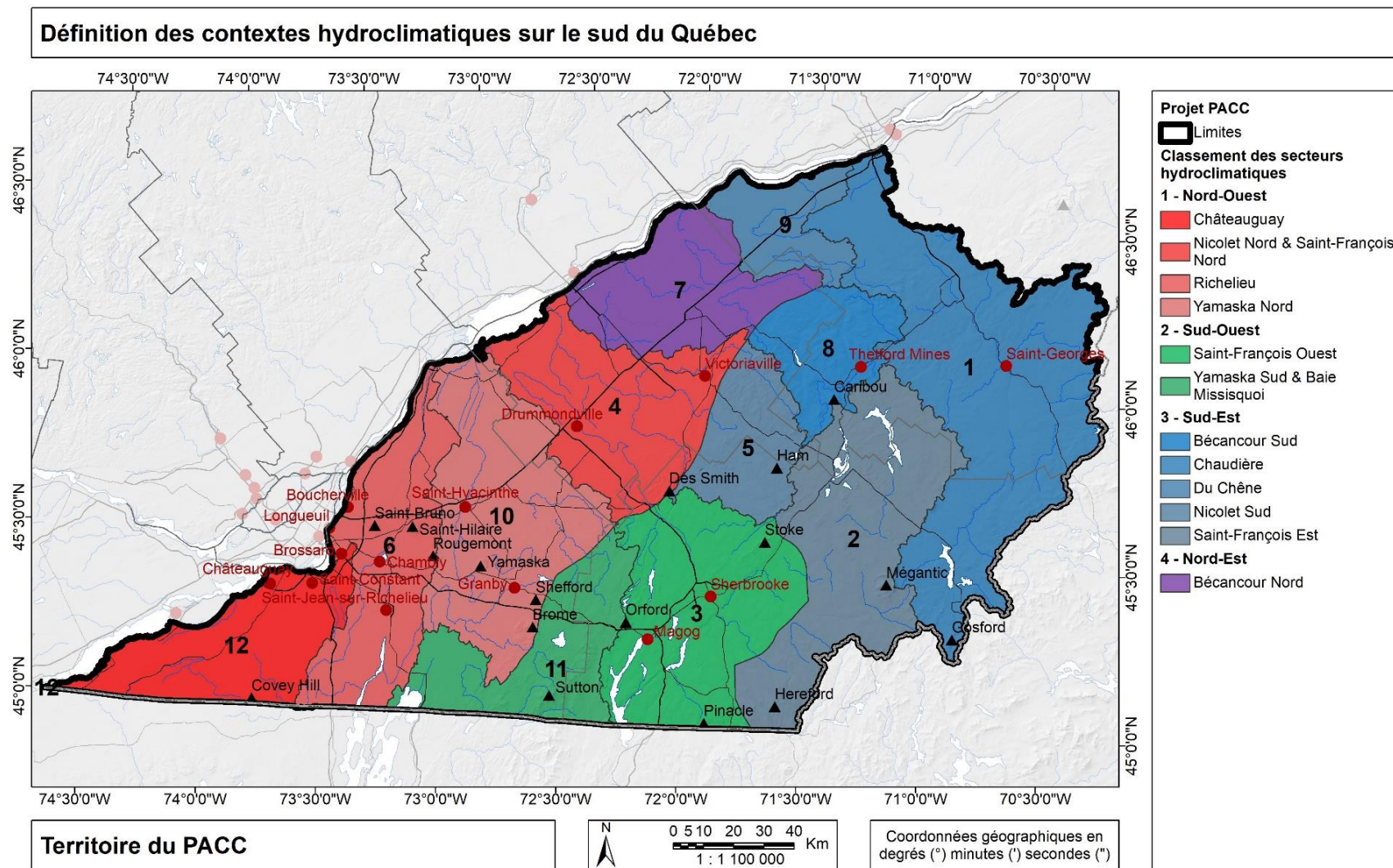


Figure 8.2 : Secteurs hydroclimatiques et leurs regroupements définis dans le sud du Québec

La figure 8.2 indique que des regroupements de secteurs ont été faits et la figure 8.3 montre les précipitations et températures des secteurs par rapport aux conditions moyennes sur la zone d'étude : (1) élévation 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) précipitations annuelles totales en moyenne de 1 104 mm/an (entre 1 032 et 1 172 mm/an pour les 25^e et 75^e percentiles), et (3) température moyenne de 5.1 °C (entre 4.3 et 6.0 °C pour les 25^e et 75^e percentiles). Les groupes de secteurs ont les caractéristiques suivantes :

- Groupe 1 (en rouge sur la figure 8.3) : comprend quatre secteurs à proximité du fleuve Saint-Laurent au nord de la limite fixée à 200 m d'altitude. Ces secteurs sont caractérisés par (1) des altitudes moyennes plutôt basses (entre 34 et 101 m/NMM), (2) des précipitations assez faibles en moyenne de 1 033 mm/an (entre 986 et 1 067 mm/an pour les 25^e et 75^e percentiles), et (3) des températures élevées en moyenne de 6.2 °C (entre 5.9 °C et 6.6 °C pour les 25^e et 75^e percentiles) ;
- Groupe 2 (en vert sur la figure 8.3) : comprend deux secteurs situés au sud-ouest de la limite à 200 m/NMM. Ces secteurs sont définis par (1) des élévations moyennes plutôt importantes (entre 225 et 277 m/NMM), (2) des précipitations totales plus élevées de 1 149 mm/an en moyenne (entre 1 107 et 1 184 mm/an pour les 25^e et 75^e percentiles), et (3) des températures plutôt élevées en moyenne de 5.4 °C (entre 5.2 °C et 5.7 °C pour les 25^e et 75^e percentiles) ;
- Groupe 3 (en bleu sur la figure 8.3) : comprend trois secteurs localisés au sud-est du seuil fixé à 200 m/NMM où les reliefs sont les plus importants au sud du Québec. Ces secteurs se distinguent par (1) des altitudes moyennes assez élevées (entre 307 et 407 m/NMM), (2) des précipitations totales importantes en moyenne de 1 192 mm/an (entre 1 161 et 1 231 mm/an pour les 25^e et 75^e percentiles), et (3) des températures moyennes assez basses (4.3 °C) comprises entre 4.1 et 4.6 °C pour les 25^e et 75^e percentiles ;
- Groupe 4 (en violet sur la figure 8.3) : comprend uniquement le secteur Bécancour Nord localisé à proximité du fleuve Saint-Laurent et limité au sud par le seuil fixé à 200 m d'élévation. Ce secteur est caractérisé par (1) des altitudes plutôt basses en moyenne de 56 m/NMM (maximum à 232 m/NMM), (2) des précipitations plutôt faibles en moyenne de 1 052 mm/an (entre 1 006 et 1 091 mm/an pour les 25^e et 75^e percentiles), et (3) des températures peu importantes à 4.9 °C en moyenne (entre 4.7 et 5.0 °C pour les 25^e et 75^e percentiles) ;
- Du Chêne (encart bleu sur la figure 8.3) : ce secteur inclut l'ensemble de ce petit bassin versant (1 175 km²) qui borde le fleuve Saint-Laurent. Les conditions dans ce secteur sont distinctes de celles du groupe 4, avec des températures plutôt faibles à 4.6 °C en moyenne et des précipitations importantes de 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 (6 711 km²) qui s'étend du fleuve Saint-Laurent à la frontière américaine. 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.

Le rapport final contient des fiches décrivant plus en détail les caractéristiques de chaque secteur hydroclimatique (Huchet et al., 2021 ; annexe 6). Puisque la définition des secteurs a été faite sur la base des normales climatiques (précipitations totales et températures) calculées entre 1981 et 2010, il faudra éventuellement en faire la mise à jour. L'utilisation de la grille d'Info-climat présente plusieurs avantages pour la définition des conditions des secteurs et le calcul des normales par rapport à l'usage des stations météorologiques : (1) les données ponctuelles des stations ont été interpolées sur l'ensemble du Québec assurant ainsi une couverture spatiale uniforme et régulière, (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. Il est prévu de continuer à utiliser une grille climatique pour les travaux futurs sur la base d'une nouvelle grille en production par le MELCC et qui sera maintenue à jour.

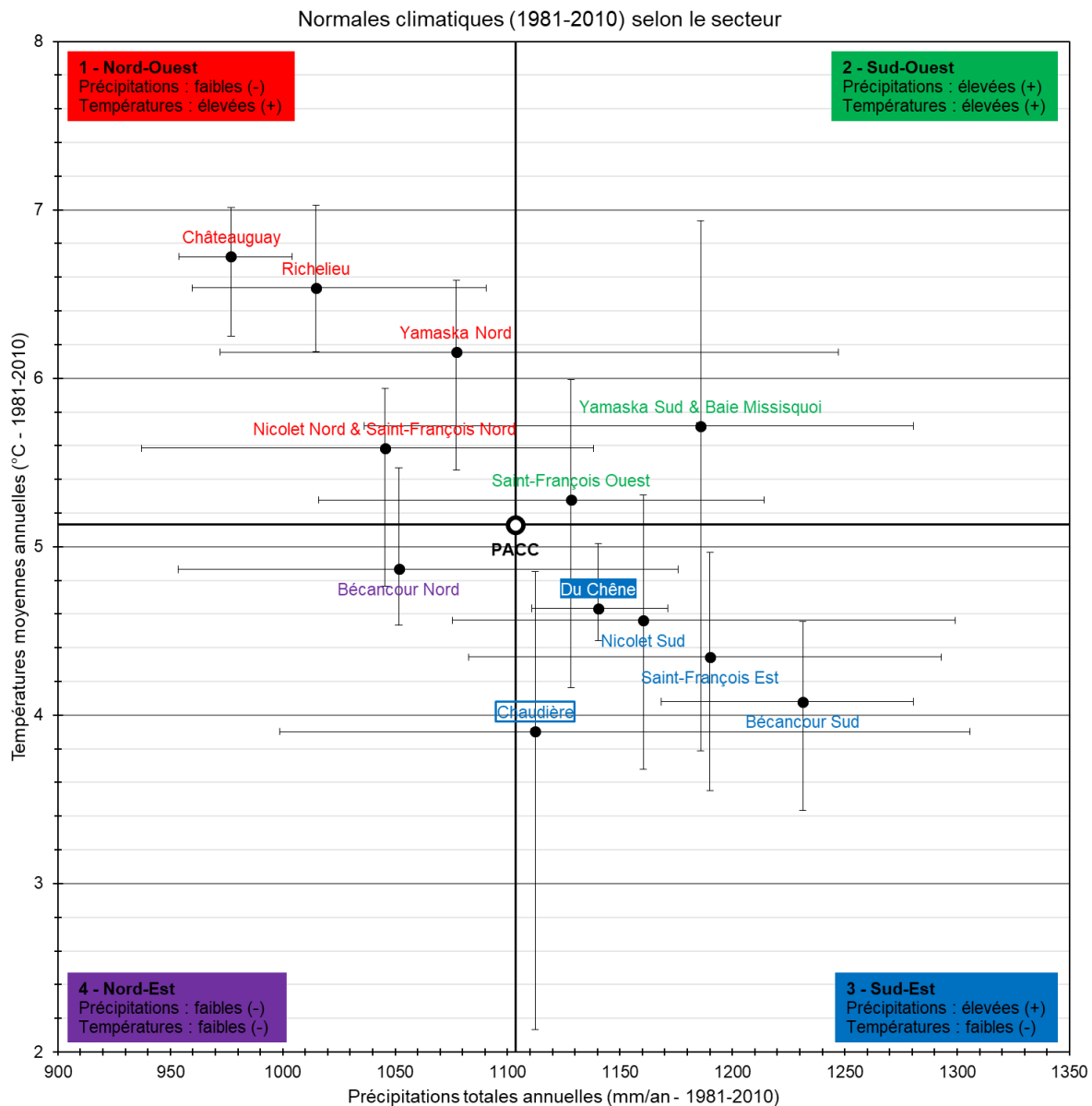


Figure 8.3 : Statistiques descriptives (minimum, maximum et moyenne) des normales climatiques (1981-2010) des différents secteurs hydroclimatiques par rapport à l'ensemble du sud du Québec (PACC)

Dans le cadre d'un nouveau projet initié en 2021, l'utilisation des secteurs hydroclimatiques va servir de base à la production d'un *Bulletin sur l'état des nappes* au Québec, d'abord au sud du Québec où les secteurs ont été définis. La relation entre les secteurs et les grands bassins versants devrait aider à mettre en relation l'état des nappes et les mesures de gestion des ressources en eau souterraine à l'échelle régionale.

9 USAGE DE L'EAU SOUTERRAINE INTRAMUNICIPAL

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 zones à l'intérieur d'une municipalité faisant l'objet de pressions importantes sur l'eau souterraine ou de conflits d'usage potentiels. De plus, cet indicateur 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.

Il est donc souhaitable d'avoir un indicateur de l'usage de l'eau souterraine ayant une meilleure résolution spatiale, notamment pour mieux juger des demandes d'autorisation de nouveaux prélèvements d'eau souterraine. Conséquemment, des travaux ont été réalisés afin de produire un indicateur intramunicipal d'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 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 figure 9.1 montre la démarche suivie pour produire l'indicateur :

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

Les usages de l'eau souterraines à l'échelle municipale ont été obtenus du PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013a) qui a estimé (1) l'usage agricole hors-réseau, en distinguant l'usage végétal de l'animal, (2) l'usage résidentiel hors-réseau est basé sur le nombre de personnes non desservies par les réseaux de distribution en soustrayant le nombre de personnes desservies de la population totale et en attribuant une consommation moyenne journalière par habitant, et (3) l'usage total réseau par municipalité. Cet usage total réseau par municipalité a été utilisé uniquement pour les quelques captages municipaux qui n'ont pas été déclarés comme GPE. Les déclarations des grands préleveurs d'eau (GPE) ont été obtenues du MELCC (2021a) pour les années 2015 à 2019.

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

L'utilisation du territoire (MELCC, 2017) a été utilisée pour distribuer les usages agricoles hors-réseau. Les captages individuels répertoriés dans la banque de données du SIH (MELCC, 2021b) ont servi à répartir spatialement 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 a donc été appliqué plus spécifiquement sur la région d'étude afin de retenir uniquement les GPE prélevant les eaux souterraines en Montérégie Est.

4. Ajout des captages municipaux d'importance

Certains captages municipaux dans l'inventaire du PACES de Montérégie Est (Carrier et al., 2013a) n'apparaissent pas dans les déclarations des GPE municipaux récents (2015-2019). Ces captages ont été ajoutés afin de les considérer comme des points de prélèvement pérennes.

5. Élaboration des grilles d'usage

Tous les usages de l'eau souterraine ont été répartis 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. Les usages spatialement distribués comprennent (1) l'usage agricole total hors-réseau dont l'usage végétal est réparti sur les mailles au droit des surfaces maraîchères, lorsque présentes, et l'usage animal distribué sur les mailles au droit des surfaces fourragères, (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 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 ; (2) l'usage ICI hors-réseau 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 des GPE est uniquement affiché sur la carte finale car les volumes déclarés varient beaucoup et 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 : (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.

7. Production de l'indicateur intramunicipal

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

Le rapport final donne beaucoup plus de détails sur chacune de ces étapes de production de l'indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine (Huchet et al., 2021). On trouve aussi dans le rapport final des cartes montrant individuellement chaque type d'usage de l'eau souterraine. Dans le présent rapport synthèse, nous montrons les cartes de l'ensemble des usages (figure 9.2) ainsi que de l'usage total de l'eau souterraine (figure 9.3). Le rapport final montre aussi une planche cartographique de l'ensemble des usages à l'échelle de la Montérégie Est ainsi qu'à l'échelle d'une municipalité spécifique de la région. Ce format de présentation de l'indicateur intramunicipal d'usage pourrait être utile aux analystes du MELCC dans le cadre de leur évaluation des demandes de prélèvement.

La figure 9.2 montre que les différents types d'usage de l'eau souterraine sont répartis de façon très hétérogène dans la région ainsi qu'à l'intérieur même des municipalités. L'usage total d'eau souterraine des réseaux de distribution a été volontairement conservé sans distinction des catégories d'usage, ce qui offre une lecture plus simple et directe des secteurs de stress. La répartition de l'usage total de l'eau souterraine (figure 9.3) montre aussi beaucoup de variabilité. Par contre, cette carte de l'usage total permet de voir facilement quels sont les secteurs soumis à de plus forts prélèvements d'eau souterraine, encore une fois à l'intérieur même des municipalités.

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.

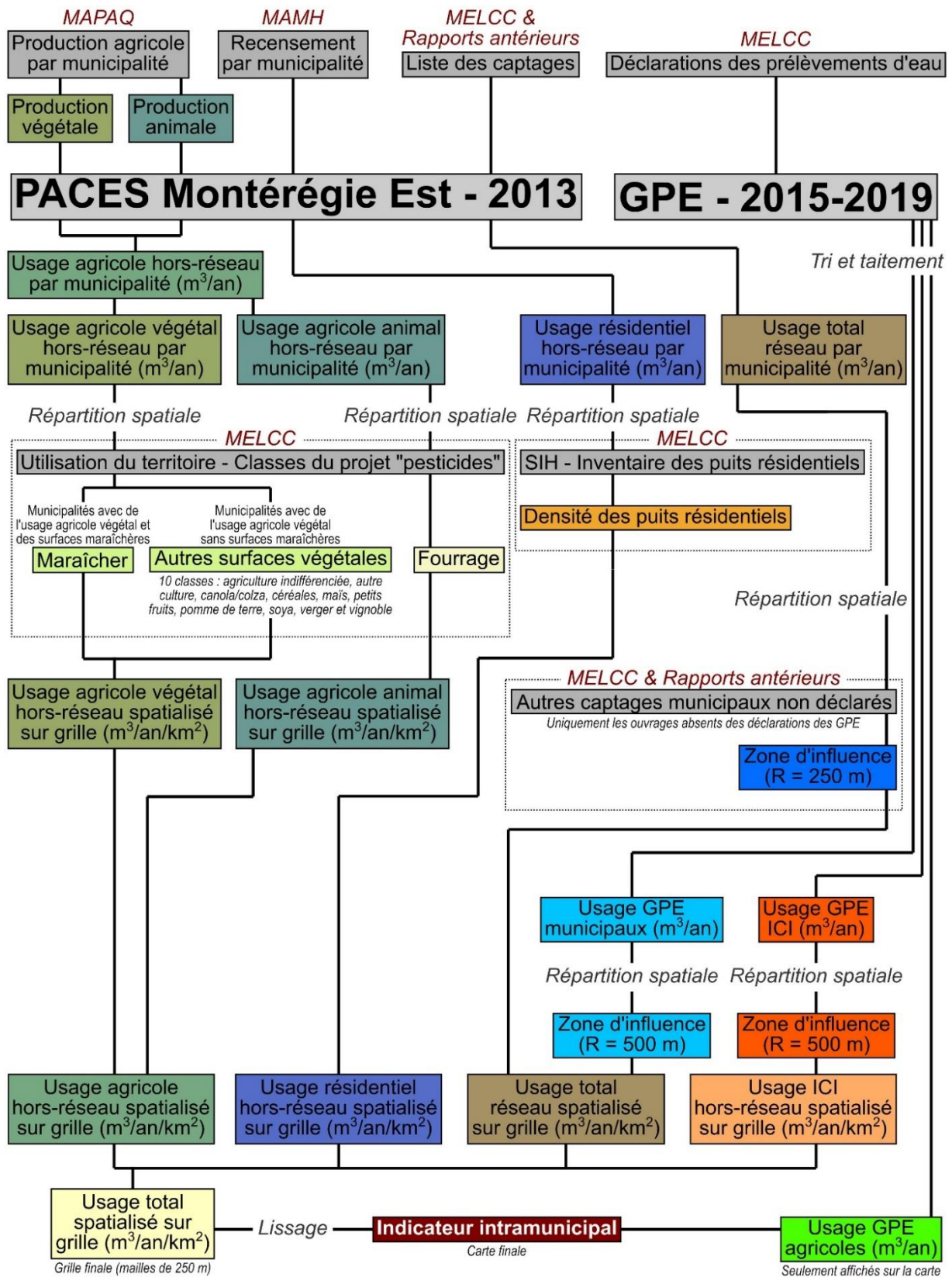


Figure 9.1 : Processus de production de l'indicateur intramunicipal

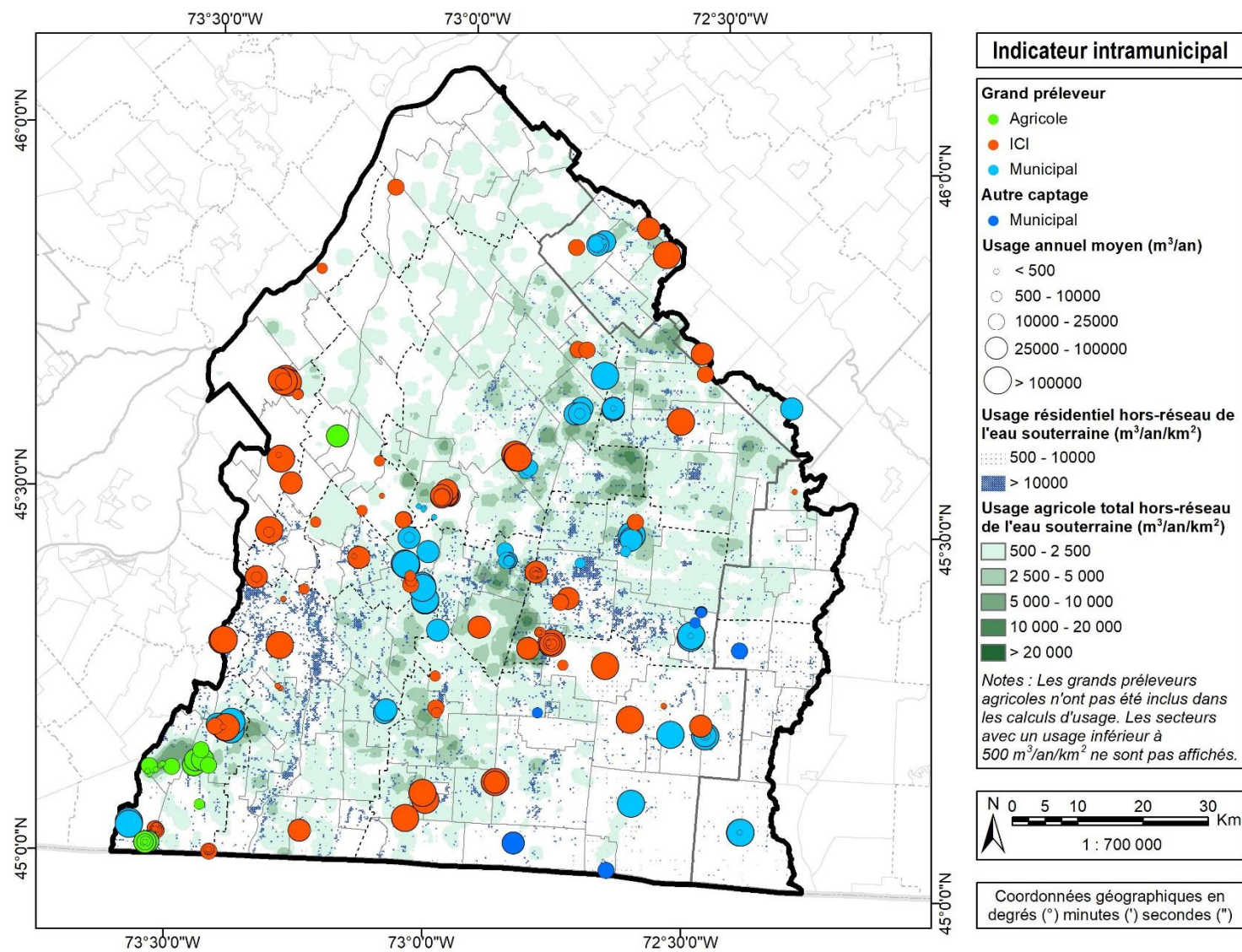


Figure 9.2 : Indicateur intramunicipal du stress sur l'eau souterraine en Montérégie Est

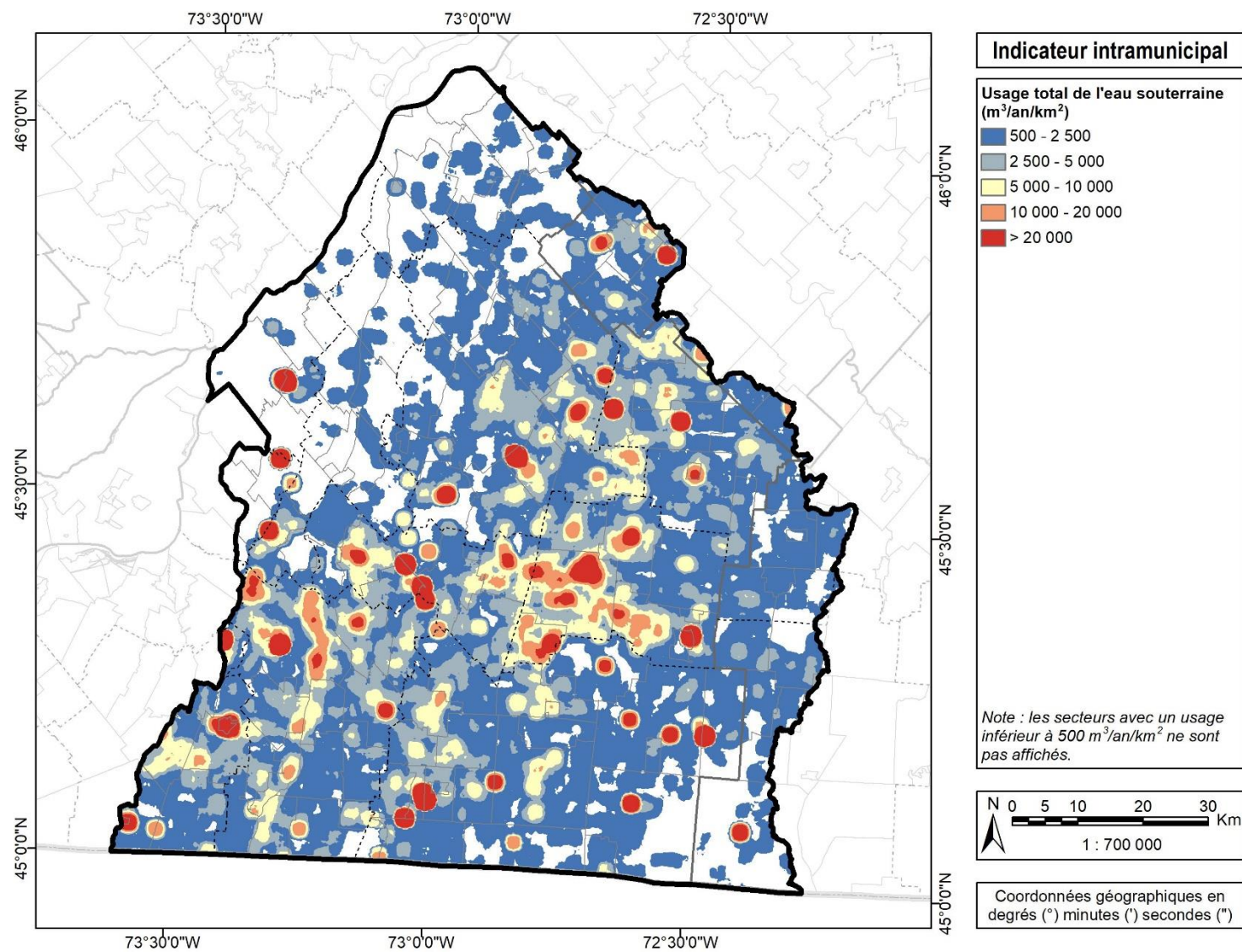


Figure 9.3 : Usage total de l'eau souterraine en Montérégie Est

D'autres avantages ressortent suite à la production de cet indicateur intramunicipal. 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 (2011) (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). D'ailleurs, l'indicateur intramunicipal a aussi pu être appliqué avec succès en Montérégie Ouest dans le cadre d'un autre projet (Ballard et al., 2021). La production de cet indicateur sera aussi testée dans le cadre du PACES Estrie où il y a peu de cultures maraîchères, contrairement à la Montérégie.

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. 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. Si l'indicateur intramunicipal était produit sur l'ensemble du Québec, des seuils applicables de façon plus générale pourraient être définis.

Puisque cet indicateur intramunicipal 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. La prochaine section va expliquer comment l'indicateur intramunicipal d'usage a pu être utilisé avec les limites naturelles de sous-bassins hydrogéologiques afin de mieux représenter le stress sur l'eau souterraine.

10 STRESS SUR L'EAU SOUTERRAINE PAR SOUS-BASSIN HYDROGÉOLOGIQUE

L'indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine décrit à la section précédente permet de montrer la distribution spatiale des usages de l'eau souterraine dans une région sans être contraint par les limites municipales. Dans la présente section, cet indicateur est utilisé pour faire un bilan de la recharge et de l'usage de l'eau souterraine à l'intérieur de limites hydrogéologiques naturelles. L'usage de telles limites naturelles 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 (ratio 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 produite par le PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013a). L'indicateur a été produit pour des bassins de niveau 1 et de niveau 2. Dans le présent rapport synthèse, nous ne montrerons toutefois pas les résultats obtenus pour les bassins de niveau 1 qui 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.

Même si l'indicateur de stress sur l'eau souterraine à l'intérieur des bassins de niveau 2 permet de juger de l'aspect durable de l'exploitation de l'eau souterraine, cet indicateur ne permet pas à lui seul de bien définir la nature des ressources en eau souterraine et les conditions de son exploitation. Les données disponibles à l'intérieur des bassins versants hydrogéologiques ont donc été pleinement exploitées afin de faire une caractérisation complète des ressources en eau souterraine et de leur exploitation à l'aide de quatre 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.

Les figures 10.1 à 10.4 montrent la distribution spatiale des quatre indicateurs des ressources en eau souterraine appliqués aux bassins hydrogéologiques de niveau 2 en Montérégie Est. La légende des cartes indique les plages de valeurs qui ont été considérées pour classer les indicateurs. Bien qu'adaptées à la Montérégie Est, ces plages de valeurs devraient aussi être applicables ailleurs au Québec. Afin d'avoir des indicateurs facilement compréhensibles, la recharge et l'usage ont été exprimés en hauteur d'eau (mm/an) en divisant le volume annuel par la superficie des sous-bassins. Les cartes des indicateurs sont complétées par des tableaux montrant respectivement 1) une compilation des conditions rencontrées dans chaque bassin versant hydrogéologique de niveau 1 (tableaux 10.1 et 10.2) et 2) des statistiques sur les indicateurs obtenus dans les bassins versants hydrogéologiques de niveau 2 de la Montérégie Est (tableaux 10.3 à 10.6).

En Montérégie Est, la recharge (figure 10.1) est « faible » (0-20 mm/an) ou « limitée » (20-50 mm/an) au nord de la région et le long de la rivière Richelieu à cause de la présence d'une épaisse couche d'argile qui limite la recharge (Carrier et al., 2013a). La figure 10.1 montre aussi le polygone délimitant la présence d'eau saumâtre dans l'aquifère rocheux où il y a très peu de recharge et de circulation de l'eau souterraine (Beaudry et al., 2018). En périphérie de ces secteurs, la recharge est « modérée » (50-100 mm/an) alors qu'au sud-est de la région la recharge est « bonne » (100-200 mm/an) sur environ 50 % des bassins (tableau 10.3). Seul un bassin hydrogéologique présente une recharge « élevée » (> 200 mm/an).

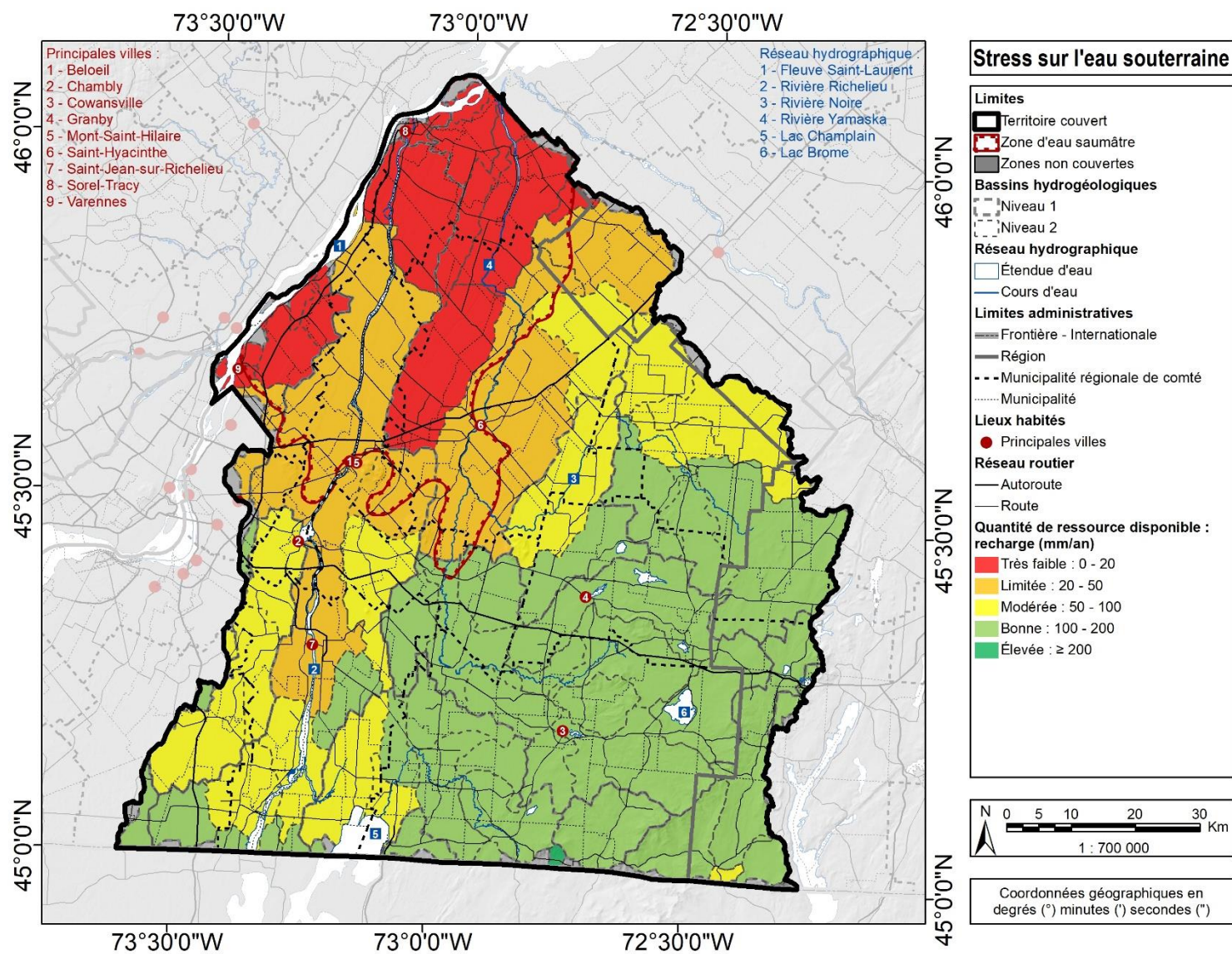


Figure 10.1 : Recharge (mm/an) dans les sous-bassins versants hydrogéologiques en Montérégie Est

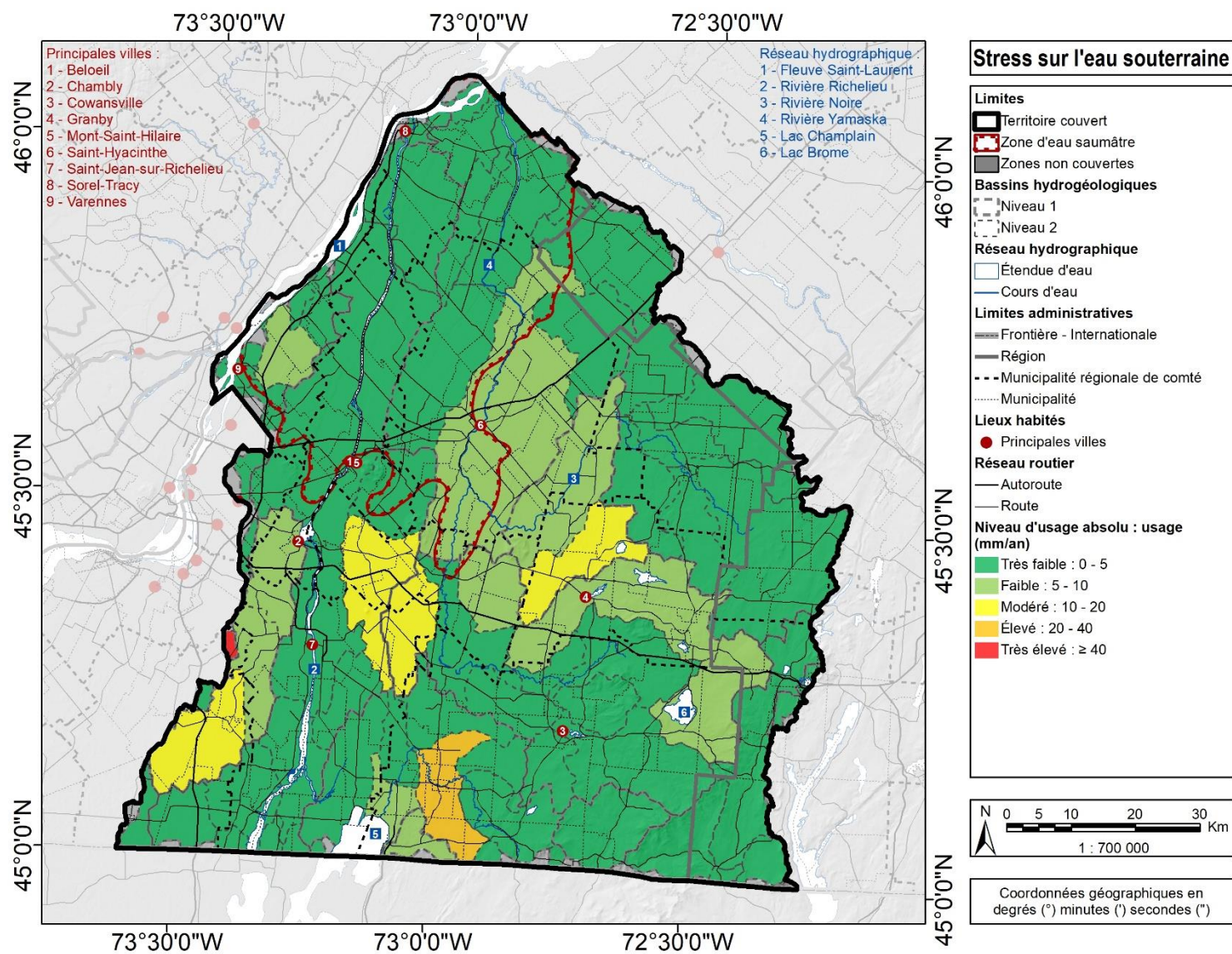


Figure 10.2 : Usage de l'eau souterraine (mm/an) dans les sous-bassins versants hydrogéologiques en Montérégie Est

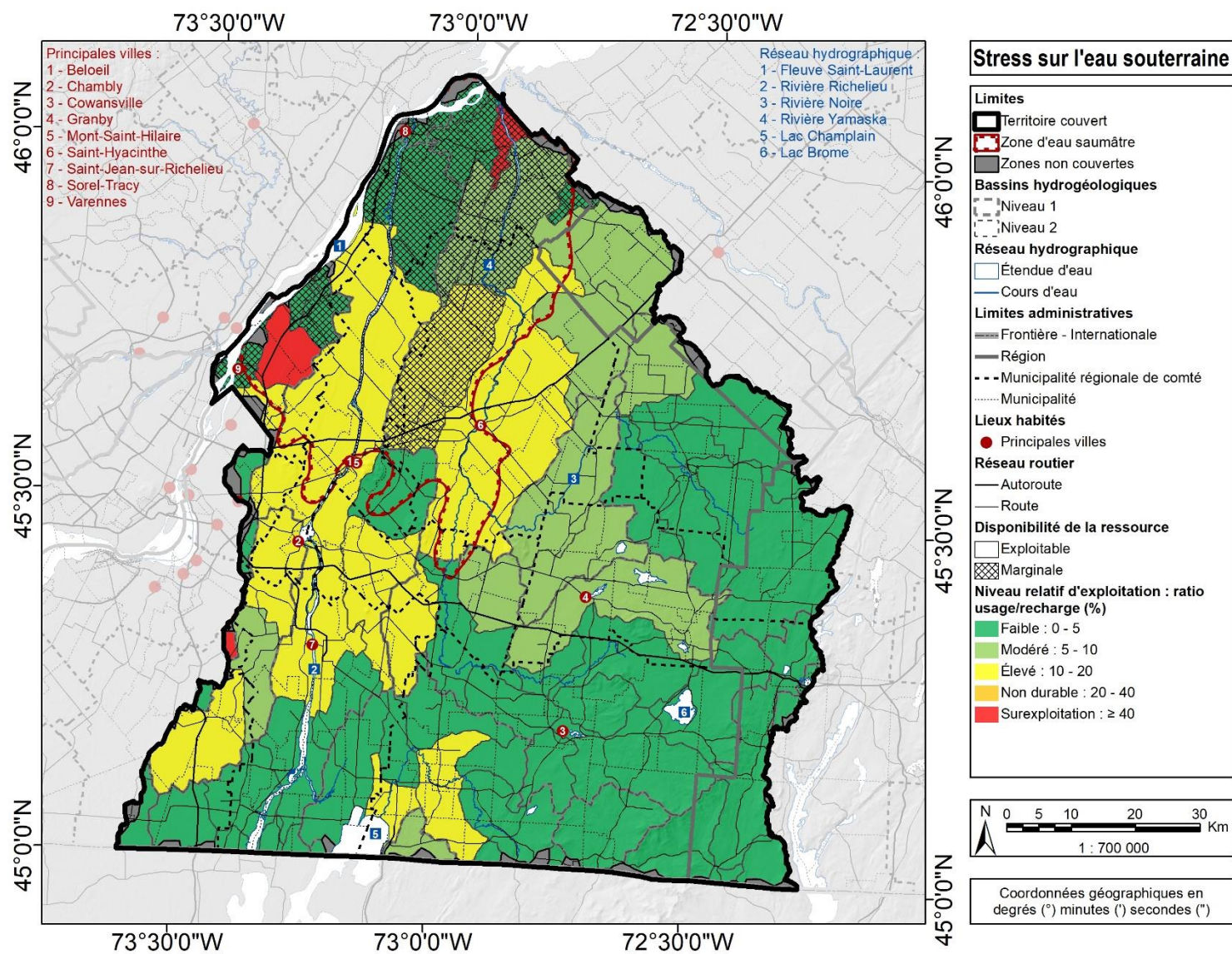


Figure 10.3 : Indicateurs de stress sur l'eau souterraine (usage/recharge) dans les sous-bassins versants hydrogéologiques en Montérégie Est

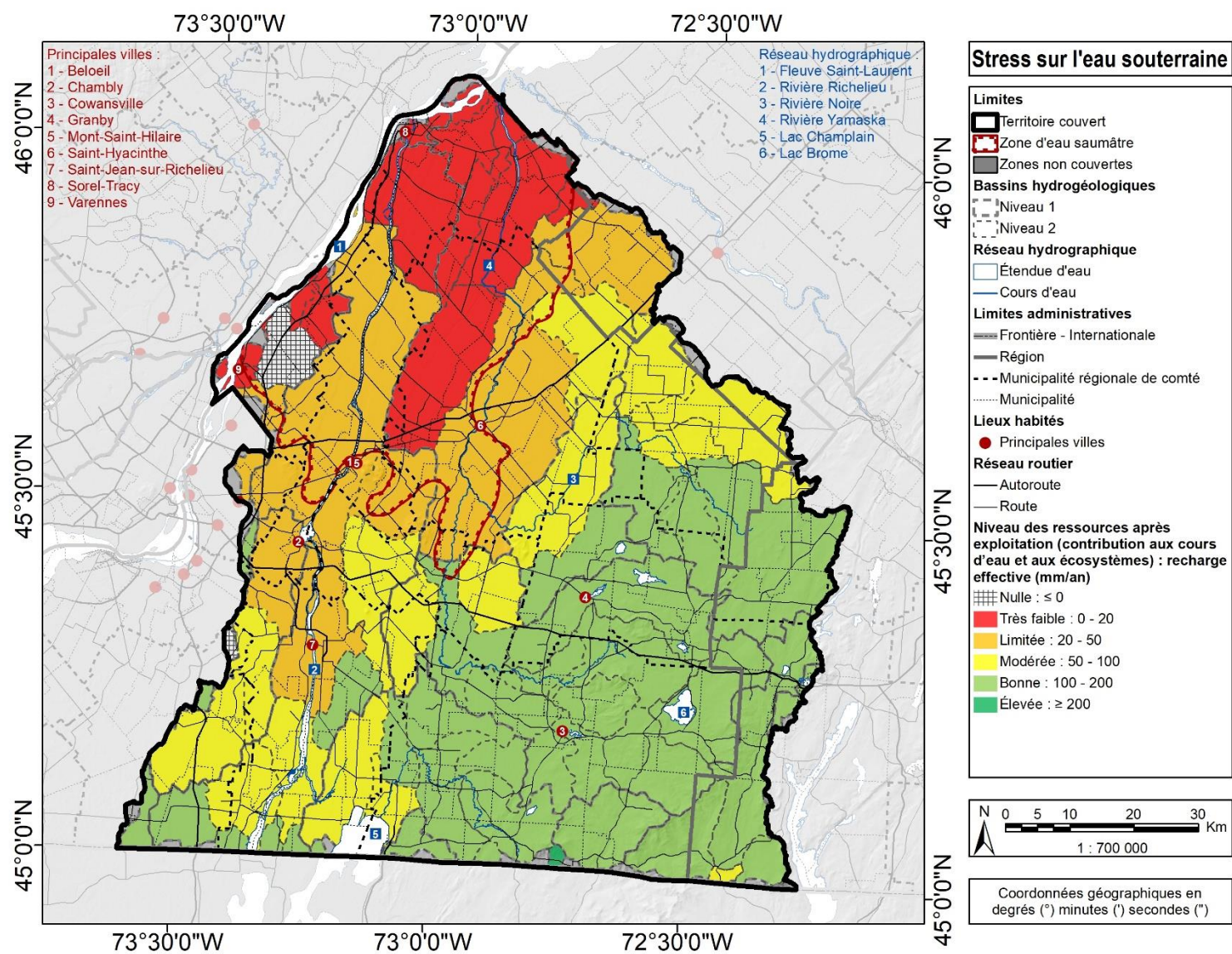


Figure 10.4 : Recharge effective (recharge – usage; mm/an) dans les sous-bassins versants hydrogéologiques en Montérégie Est

Tableau 10.1 : Synthèse des ressources en eau souterraine en Montérégie Est dans les bassins hydrogéologiques de niveau 1 (1/2)

ID	Nom du bassin hydrogéologique de niveau 1	Aire			Points de prélèvement des eaux souterraines					
		Totale	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 10.2 : Synthèse des ressources en eau souterraine en Montérégie Est dans les bassins hydrogéologiques de niveau 1 (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

Tableau 10.3 : 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 10.4 : 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 10.5 : 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 10.6 : 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 10.3) 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 :
 $[m^3/an/km^2] = [mm/an] * 1\,000$

L'usage de l'eau souterraine en Montérégie Est (figure 10.2) est généralement « très faible » (0-5 mm/an) ou « faible » (5-10 mm/an) sur plus de 90% des sous-bassins de la région (tableau 10.4). Quelques sous-bassins (4) ont un niveau d'usage « modéré » (10-20 mm/an), un sous-bassin a un niveau « élevé » (20-40 mm/an) et un autre à un niveau « très élevé » (≥ 40 mm/an).

L'indicateur de stress sur l'eau souterraine basé sur le rapport usage/recharge (figure 10.3) permet de juger si l'exploitation de l'eau souterraine est à un niveau durable. Comme dans le cadre de nos travaux précédents (section 6 ; voir aussi Raskin, 1997), le seuil d'usage correspondant à 20% de la recharge a été utilisé pour identifier les secteurs où l'usage serait « non durable » alors que le seuil de 40% a été choisi pour identifier de la « surexploitation » qui devrait être gérée. Ce dernier seuil est aussi basé sur les travaux réalisés en Montérégie Ouest où le niveau des pressions sur l'eau souterraine est très élevé et nécessite une gestion active (Ballard et al., 2021). La carte de la figure 10.3 donne deux autres indicateurs permettant de mettre en perspective l'indicateur de pression sur l'eau souterraine. D'abord, les sous-bassins où la recharge est inférieure à 20 mm/an et où l'usage est inférieur à 5 mm/an sont jugés avoir des ressources en eau souterraine « marginales » (hachuré sur la figure 10.3) alors que les ressources sont jugées « exploitables » si ces conditions ne sont pas présentes. De plus, la carte de la figure 10.3 montre un polygone délimitant la zone où l'eau est saumâtre (non potable) dans l'aquifère au roc. À l'intérieur de ce polygone, l'exploitation de l'eau souterraine se fait dans un aquifère granulaire superficiel pour des fins essentiellement agricoles, et il n'y a donc pas de relation entre l'usage de l'eau souterraine et le niveau de recharge de l'aquifère au roc utilisé pour dériver l'indicateur de stress. Ainsi, à l'intérieur de ce polygone, l'indicateur de stress n'est pas valide et ne devrait pas être considéré.

En Montérégie Est, l'indicateur de stress sur l'eau souterraine est généralement « faible » (0-5%) ou « modéré » (5-10%) sur plus de 80% des sous-bassins (tableau 10.5), il n'y a pas de sous-bassin au niveau « non durable » mais trois sous-bassins ont un niveau en « surexploitation ». Le secteur hachuré sur la carte de la figure 10.3, qui montre où les ressources sont marginales, comprend un sous-bassin versant avec un indicateur de stress au niveau de « surexploitation ». Dans ce cas, il ne faut donc pas considérer ce sous-bassin comme problématique. Le niveau de stress au sud des Montérégiennes est généralement « élevé », mais encore durable, alors que deux sous-bassins versants hydrogéologiques font l'objet d'une « surexploitation ». L'un de ses deux sous-bassins au nord-ouest de la région en bordure du fleuve a en fait une recharge très faible (9 mm/an) et un usage faible (9 mm/an) au même niveau que la recharge, ce qui donne un indicateur de stress très élevé. Ces conditions d'exploitation ne nécessitent toutefois pas d'attention particulière. L'autre sous-bassin versant situé à la limite ouest de la région a une faible superficie (8 km²) et comprend deux GPE qui contribuent à une exploitation très élevée de 164 mm/an qui excède la recharge modérée de 93 mm/an du sous-bassin. Cette situation nécessite une évaluation plus détaillée, mais il est envisageable que l'aire d'alimentation des GPE dépasse en fait les limites du sous-bassin versant dans ce cas particulier. 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.

La carte de la figure 10.4 montre la recharge effective qui a été obtenue par la soustraction de l'usage à la recharge totale. La recharge effective est en fait très similaire à la recharge totale. Le tableau 10.6 montre que les principaux changements causés par l'usage de l'eau souterraine sont l'ajout de deux sous-bassins avec une recharge effective « nulle » et la réduction de deux bassins de la classe de recharge « bonne ».

La variabilité des conditions de recharge et d'usage de l'eau souterraine en Montérégie Est en font une région idéale pour tester les indicateurs caractérisant la ressource. Les résultats montrent que ce groupe d'indicateurs permet d'obtenir un portrait global des ressources en eau souterraine et de leur exploitation. Il serait donc souhaitable de disposer de ces indicateurs pour tout le Québec municipalisé. La principale difficulté dans la production de ces indicateurs est toutefois de disposer de données uniformes de recharge et d'usage de l'eau souterraine, tel qu'il sera discuté à la section suivante.

11 APPLICABILITÉ À L'ENSEMBLE DU QUÉBEC MUNICIPALISÉ

La production de l'indicateur intramunicipal d'usage de l'eau souterraine 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. Considérant le grand intérêt de cet indicateur, nous avons évalué la possibilité de produire cet indicateur pour l'ensemble du Québec municipalisé. À cette fin, 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 (<https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/programmes/acquisition-connaissance.htm>) ainsi que dans le cadre d'un projet antérieur ayant couvert le bassin versant de la rivière Châteauguay (Côté et al., 2006).

D'abord, au niveau de la recharge, le tableau 11.1 ainsi que la figure 11.1 montrent respectivement la synthèse de la revue des méthodes d'estimation et la distribution spatiale de la recharge obtenue. Le rapport final de notre projet donne plus de détails sur cette revue (Huchet et al., 2021). Au niveau des approches employées pour définir la recharge, chaque université responsable d'un projet a adopté une méthode spécifique : (1) quatre d'entre-elles (UQAR, UQAR, UQAT et UQTR) ont utilisé un bilan hydrique et (2) trois autres (INRS [INRS/CGC pour le projet Châteauguay], U. Laval et UQAM) ont évalué la recharge avec un modèle d'infiltration ; l'UQAM utilisant un modèle développé à l'interne, maintenant appelé HydroBudget, tandis que l'INRS et l'Université Laval ont adapté le modèle d'infiltration HELP (*Hydrologic Evaluation of Landfill Performance*; Schroeder et al., 1994; Croteau et al., 2010).

Sauf localement, notamment sur la rive nord du Saint-Laurent, c'est l'aquifère rocheux qui est exploité régionalement pour l'alimentation en eau souterraine. C'est donc la recharge au roc qui est généralement d'intérêt pour évaluer si le niveau d'exploitation est durable. Par contre, l'une des approximations de l'estimation de la recharge avec un 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 provenant des précipitations à laquelle sont déduits le ruissellement de surface et l'évapotranspiration. Toutefois, une portion significative de cette infiltration peut s'écouler de façon souterraine (ruissellement hypodermique) et ne pas atteindre le toit de la nappe (Croteau et al., 2010). 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. Au contraire, le modèle d'infiltration HELP tient compte des propriétés des sols et des dépôts meubles entre la surface et l'aquifère rocheux et permet ainsi de distinguer le ruissellement hypodermique et d'estimer la recharge nette (Croteau et al., 2010). Tel qu'indiqué au tableau 11.1, les projets se basant sur ces bilans hydriques définissent la recharge potentielle qui surestime la recharge des aquifères rocheux, sauf le projet au Nord-Est du Bas Saint-Laurent qui a appliqué une correction en tenant compte du niveau de confinement pour ainsi produire une estimation de la recharge nette, tout comme les projets ayant utilisé le modèle HydroBudget de l'UQAM.

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) (tableau 11). Ces différences importantes entraînent des disparités spatiales évidentes de la recharge estimée sur le Québec municipalisé (figure 11.1). Finalement, le niveau de détail décrivant la démarche utilisée pour estimer la recharge est très variable entre les projets. De plus, des lacunes spatiales sont identifiées entre les projets sur le territoire du Québec municipalisé.

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. 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 à la fois la recharge historique et celle attendue en climat futur.

Tableau 11.1 : Synthèse des estimées 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	-	X
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
Montréal 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.

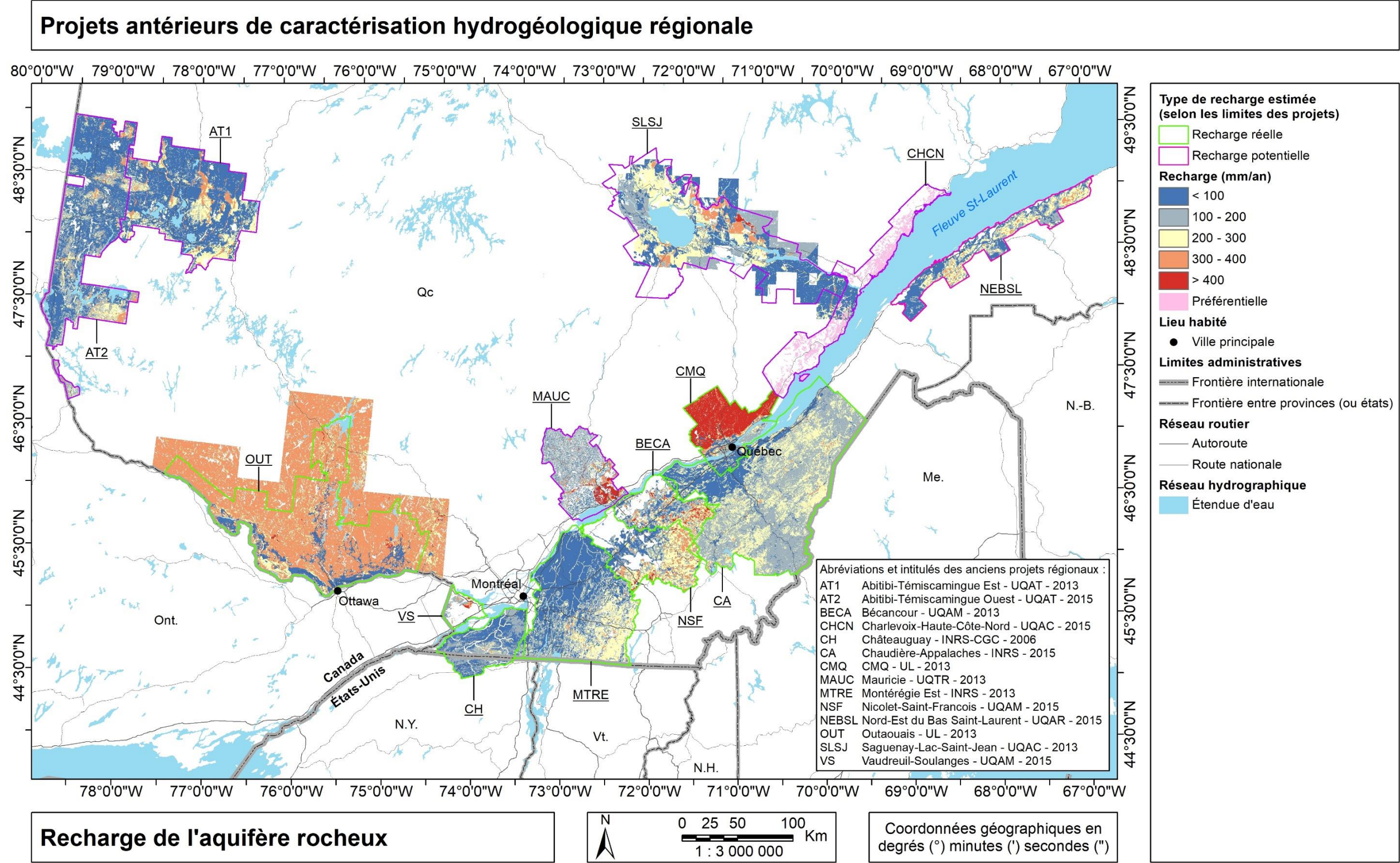


Figure 11.1 : Données de recharge disponibles en 2021 pour les secteurs couverts par les projets régionaux antérieurs

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. Les tableaux 11.2 et 11.3 offrent une synthèse des principales caractéristiques des méthodes d'estimation des usages par ces 13 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).

Nous avons d'abord constaté que la description des approches spécifiquement employées dans chacun des projets est souvent peu documentée (tableau 11.3). 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 huit des 14 projets régionaux. En plus des précisions apportées dans la description des approches utilisées, l'accès aux résultats produits est également un élément problématique. À l'exception du projet Châteauguay dont seul l'atlas final est disponible en ligne et quelques tableurs dont l'accès n'est pas toujours évident, l'ensemble des rapports finaux et des cartes des projets PACES sont disponibles sur le portail du ministère (Données Québec). Toutefois, les annexes « papiers » ne sont pas nécessairement intégrées dans ces rapports finaux et les annexes électroniques des projets ne sont pas disponibles sur le site Données Québec. En plus, des résultats et des protocoles utilisés par chaque université, il serait également pertinent 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.

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 11.2). 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 11.2). En effet, pour les projets menés par l'UQAM, 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 (tableau 11.3). Pour estimer l'usage résidentiel, 12 des 14 projets ont considéré une consommation moyenne journalière de 250 litres par habitant (tableau 11.2). 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 attribuée à chaque résident.

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 11.2). Pour certains projets, l'usage agricole attribuable aux cultures végétales a été complètement négligé dans les calculs. Pour le reste des projets (9 au total), l'usage agricole a considéré à la fois les cultures et l'élevage du bétail. 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. 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. La provenance de l'eau (surface ou souterraine) pour la production agricole a généralement été estimée à partir des pourcentages provenant de Statistiques Canada.

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 11.3). 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 11.3). Pour le PACES CMQ, cet usage ICI sur le réseau est implicitement considéré comme inclus dans l'usage des puits municipaux. Cela semble être également le cas pour le projet Châteauguay. 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 13 des 14 projets (tableau 11.3). Seul le PACES du Nord-Est du Bas Saint-Laurent a considéré uniquement les résultats de sondages pour évaluer l'usage ICI hors réseau. Enfin, pour les trois projets réalisés par l'UQAM, l'usage des ICI a été estimé en utilisant une approche substantiellement différente (tableau 11.3). L'usage de l'eau relié aux industries a été évalué en se basant sur les données du répertoire des grands préleveurs ($> 75 \text{ m}^3/\text{jour}$) transmis par le MELCC. Pour l'usage commercial et institutionnel, le Guide de conception des installations de production d'eau potable du MAPAQ (2021) a été utilisé avec un usage d'eau moyen quotidien attribué selon la taille des municipalités.

Enfin, la présentation des résultats est très hétérogène d'un projet l'autre (tableau 11.3). 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. 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.

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), 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 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 devraient donc faire l'objet d'une mise à jour. 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) considérer 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 accessibles 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.

Tableau 11.2 : Synthèse des estimés d'usage de l'eau 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 11.3 : Synthèse des estimés d'usage de l'eau 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	-	8	4	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 MAPAQ dont la dernière version a été éditée en mai 2021 (MAPAQ, 2021) ;

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.

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

Ageco (2019) Recherche participative d'alternatives durables pour la gestion de l'eau en milieu agricole dans un contexte de changement climatique (RADEAU 1). Rapport final, présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), juin 2019, 271 p.

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.

Berthot L, St-Hilaire A, Caissie D, El-Jabi N, Kirby J et Ouellet-Proulx S (2020) Southern Quebec environmental flow assessments: spatial and temporal scales sensitivity. *Canadian Water Resources Journal*, 45(4), 358-371.

Bondu 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].

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

Californie (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.

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

Côté MJ, 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.

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.

Gassert FP, Reig P, Luo T et Maddocks A (2013) 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 (2021) Indicateurs de l'état des ressources en eau souterraine sous l'effet du climat et de leur exploitation (Rapport final). Rapport de recherche R2039, soumis au Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) en juin 2021.

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 final. Rapport de recherche R2061, version préliminaire soumise au Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) en août 2021.

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.

MAPAQ (2011) 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.

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.

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.

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

MELCC (2020) Rapport synthèse sur les problématiques prioritaires des bassins versants du Québec – État de situation 2019-2020. Direction de la gestion intégrée de l'eau du MELCC, Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 13 p., ISBN 978-2-550-87758-5 (PDF).

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

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.

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).

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.

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.

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.