

**PROJET SYNTHÈSE SUR LES RESSOURCES EN EAU
SOUTERRAINE DU SUD DU SAINT-LAURENT
OUTILS POUR ASSURER LA GESTION DES EAUX SOUTERRAINES
FACE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES
- RAPPORT CONJOINT -**



30 juin 2021

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

ISBN : 978-2-89146-999-9 (version numérique)

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

Équipe de réalisation

Marie Larocque, professeure au département des sciences de la Terre et de l'atmosphère de l'UQAM

René Lefebvre, professeur-chercheur au centre INRS-ETE

René Therrien, professeur au département de génie géologique et de génie géologique de l'Université Laval

Sylvain Gagné, agent de recherche à l'UQAM

Hugo Delottier, stagiaire postdoctoral à l'Université Laval

Jean-Sébastien Gosselin, professionnel de recherche à l'INRS-ETE

François Huchet, professionnel de recherche à l'INRS-ETE

Emmanuel Dubois, étudiant PhD à l'UQAM

Trong Anh Vu, étudiant MSc à l'UQAM

Référence à citer

Larocque M., Lefebvre R., Therrien R., Gagné S., Delottier H., Gosselin J.S., Huchet F., Dubois E., Anh Vu T. 2021. Projet synthèse sur les ressources en eau souterraine du sud du Saint-Laurent - Outils pour assurer la gestion des eaux souterraines face aux changements climatiques Rapport déposé au MELCC. 55 p.

RÉSUMÉ

Dans le cadre du Projet synthèse sur les ressources en eau souterraine du sud du Saint-Laurent, l'Université du Québec à Montréal, l'Université Laval et L'INRS ETE, ont été mandatés afin de combler les lacunes de connaissances sur la recharge des eaux souterraines, l'inertie des aquifères, les débits de base et sur l'utilisation du RSESQ. Ce rapport présente la mise en commun des résultats des trois équipes de recherche. Les travaux de modélisation de la recharge et de l'écoulement de l'eau souterraine ont permis d'obtenir des valeurs de recharge mensuelle et du débit de base sur l'ensemble de la zone d'étude (35 875 km²) pour la période 1961-2017. La recharge a été simulée avec deux modèles de surface (HydroBudget et SWMB). La recharge annuelle moyenne pour toute la zone d'étude varie de 139 mm/an à 224 mm/an selon le modèle. La structure des modèles ainsi que la méthode de calibration (basée sur les débits de base) semblent expliquer la différence entre les deux modèles. Les modèles de calcul de la recharge ont ensuite été utilisés afin de simuler les changements dans le futur en utilisant les données de 12 scénarios climatiques. Les résultats indiquent que des augmentations de la recharge sont à prévoir durant la période hivernale et automnale. Les changements prévus de la recharge durant la période estivale sont faibles et incertains. L'impact des changements climatiques sur les débits de base simulés à l'aide des modèles souterrains reflète les changements de la recharge, avec une atténuation des impacts au printemps. L'augmentation de la recharge durant l'hiver ne permet pas d'atténuer l'effet de la baisse de la recharge prévu au printemps et potentiellement durant l'été. L'analyse des puits du RSESQ a permis de sélectionner 33 puits qui sont représentatifs pour le suivi des nappes et l'estimation de la recharge. Ces puits pourront servir dans la mise en œuvre d'un bilan annuel de l'état des nappes. L'analyse des données météorologiques a permis de déterminer 12 secteurs hydroclimatiques et quatre groupes. Cette classification, combinée avec l'analyse des séries temporelle permet d'orienter le développement futur du RSESQ. La mise en commun des résultats a permis d'émettre dix recommandations qui donnent des indications sur la gestion future du RSESQ et sur les travaux à mettre en œuvre ou poursuivre afin de maintenir et de mettre à jour les connaissances sur la recharge, les débits de base et l'état des nappes au Québec.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	III
TABLE DES MATIÈRES	IV
LISTE DES FIGURES	VI
LISTE DES TABLEAUX	VIII
1 INTRODUCTION.....	1
2 ZONE D'ETUDE	3
3 DESCRIPTION BRÈVE DES TROIS PROJETS.....	8
3.1 Projet de l'INRS	8
3.1.1 Traitement des données météorologiques	8
3.1.2 Développement d'outils pour la gestion et l'exploitation des données du RSESQ	8
3.1.3 Définition du contexte des puits du RSESQ	9
3.1.4 Correction et traitement des niveaux piézométriques	9
3.1.5 Caractérisation des conditions de confinement	9
3.1.6 Estimation de la recharge	10
3.2 Projet de l'UQAM	10
3.2.1 Analyse des données du RSESQ.....	10
3.2.2 Recharge spatialement distribuée	11
3.2.3 Émergence de l'eau souterraine dans les cours d'eau	11
3.3 Projet de l'Université Laval.....	12
3.3.1 Volet 1: Développement d'un modèle intégré surface et souterrain sur le territoire du projet	12
3.3.2 Volet 2: Développement d'un modèle couplé surface et souterrain sur le territoire de la rivière Yamaska.....	13
4 ANALYSE DU RSESQ	14
4.1 Classification des puits	14
4.2 Utilisations potentielles des données	19
5 SIMULATION DE LA RECHARGE	20
5.1 Définition.....	20
5.2 Simulations avec les modèles HydroBudget et SWMB	20
5.2.1 Calibration des modèles.....	21
5.2.2 Paramètres utilisés dans les modèles de la recharge.....	21

5.2.3	Comparaison des recharges estimées par les trois méthodes	22
6	DÉBITS DE BASE DES COURS D'EAU.....	27
6.1	Estimés avec filtres	27
6.2	Simulé avec MODFLOW.....	28
6.3	Simulé avec HGS	30
7	RECHARGE SIMULÉE AUX PUIITS DU RSESQ.....	31
8	MODÉLISATION	35
8.1	Avantages et inconvénients de HGS et de Modflow.....	35
8.2	Échelles	36
8.3	Paramètres hydrogéologiques	36
9	IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES.....	38
9.1	Recharge.....	38
9.2	Débits de base.....	40
10	DÉVELOPPEMENT ET OPÉRATION DU RSESQ	42
10.1	Ajustements dans le réseau.....	42
10.2	Développement du réseau	42
10.3	Opération du réseau	44
11	RECOMMANDATIONS POUR TRAVAUX FUTURS	44
11.1	Appliquer les approches de l'INRS et de l'UQAM à l'échelle de tout le Québec	44
11.2	Modélisation en continu des écoulements souterrains sur les principaux bassins versants du Québec.....	44
11.3	Prédiction des étiages.....	45
12	CONCLUSION.....	45
13	RÉFÉRENCES	46

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Intégration des projets de l'INRS, de l'UQAM de l'Université Laval.....	2
Figure 2. Zone d'étude, topographie et bassins versants de niveau 1.	3
Figure 3. Zone d'étude du projet de modélisation supra-régionale de l'université Laval.....	4
Figure 4. Grandes zones géologiques du socle rocheux dans la zone d'étude (modifiée de SIGEOM, 2020).....	5
Figure 5. Géologie du Quaternaire simplifiée de la zone d'étude (modifiée de SIGEOM 2020 et CCG-Réseau d'information sur les eaux souterraines).....	6
Figure 6. Utilisation du territoire pour sur la zone d'étude (MELCC, 2017).....	7
Figure 7: Puits d'intérêt pour suivre l'état des nappes au sud du Québec.....	15
Figure 8: Tendances des niveaux d'eau souterraine aux puits du RSESQ selon les secteurs hydroclimatiques	16
Figure 9: Évaluation des tendances selon (a) les secteurs hydroclimatiques, (b) les groupes, (c) le type d'aquifère et (4) les conditions de confinement (et des groupes).....	18
Figure 10: Fonctionnement des modèles de recharge utilisés dans le projet : a) HydroBudget (HB ; Dubois et al., en révision) et b) MC (Ledoux et al., 1984; Delottier et al., 2021).....	20
Figure 11: Recharge et ETR simulée par HB et MC pour le bassin versant de la rivière Yamaska (4 787 km ²). Les flux représentent la moyenne mensuelle entre septembre 2011 et août 2015.	24
Figure 12 : Débits totaux et débits de base mensuels moyens à la station hydrométrique 030345 (3 334 km ²). Les flux représentent la moyenne mensuelle entre septembre 2011 et août 2015.	24
Figure 13. Médianes, 25e et 75e percentiles des débits de base pour les stations retenues sur la zone d'étude entre 2000 et 2018 calculés selon la méthode de Lyne and Hollick (Ladson et al., 2013) et selon la méthode d'Eckhardt (2005).	27
Figure 14: Comparaison de la méthode de séparation du débit de base pour la station 24014 (Bécancour).....	28
Figure 15: Débit de base simulé et observé (Lyne & Hollick) pour la station 30101 (amont de la rivière Nicolet).	29

Figure 16: Valeurs de recharge extraites au droit des puits : (a) recharge potentielle HB (1961-2017) vs recharge nette, (b) recharge potentielle HB (1981-2010) vs recharge nette, (c) recharge potentielle MC (1981-2010) vs recharge nette et (d) recharge potentielle MC (1981-2010) vs recharge potentielle HB (1981-2010) – La source des données de recharge nette est aussi indiquée sur les graphiques.....	32
Figure 17: Valeurs de recharge extraites dans l’environnement proche des puits : (a) recharge potentielle HB (1961-2017) vs recharge nette, (b) recharge potentielle HB (1981-2010) vs recharge nette, (c) recharge potentielle MC (1981-2010) vs recharge nette et (d) recharge potentielle MC (1981-2010) vs recharge potentielle HB (1981-2010) – La source des données de recharge nette est aussi indiquée sur les graphes.....	33
Figure 18: Delta de la recharge mensuelle simulée par le modèle MC-HGS sur toute la zone d’étude pour les 12 scénarios climatiques. Le delta correspond à la différence entre la période future et la période de référence (1981-2010).	39
Figure 19 : Delta de la recharge mensuelle simulée par le modèle HB sur toute la zone d’étude pour les 12 scénarios climatiques. Le delta correspond à la différence entre la période future et la période de référence (1981-2010).	39
Figure 20 : Débits de base mensuels moyens (12 scénarios) simulée par le modèle HGS pour le bassin versant de la rivière Bécancour.	40
Figure 21: Débits de base mensuels simulés par MODFLOW selon les 12 scénarios climatiques pour le BV de la rivière Bécancour. L’astérisque indique que la valeur médiane pour cette période est significativement différente de la période référence et la lettre « A » indique que les deux périodes futures sont significativement différentes l’une de l’autre.....	41

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Puits sélectionnés pour évaluer la recharge et suivre l'état des nappes.....	15
Tableau 2: Répartition des tendances du niveau de l'eau souterraine selon les groupes hydroclimatiques.	17
Tableau 3: Comparaison des tendances selon les applications possibles des puits du RSESQ.	18
Tableau 4: Paramètres issus de la calibration des deux modèles de simulation de la recharge. Pour MC, la valeur optimisée correspond à la valeur moyenne de la distribution sur le domaine où l'écart type (σ) de cette distribution est également donné.	22
Tableau 5 : Comparaison des flux (mm/mois) pour le bassin de la rivière Yamaska pour les trois modèles utilisés. Les flux représentent la moyenne mensuelle entre septembre 2011 et août 2015. Le débit de base est calculé selon Lyne et Hollick (Ladson et al., 2013) et Eckhardt (2005) pour la station hydrométrique 030345 (3 334 km ²).	23
Tableau 6 : Comparaison des valeurs annuelles de ruissellement, d'ETR et de recharge (mm/an) obtenues avec les modèles HydroBudget et Modcou pour les huit bassins versants de la région d'étude. Les valeurs entre parenthèses représentent la proportion du bilan hydrique attribuée à chaque flux.	25
Tableau 7 : Valeurs moyennes (simulation en régime permanent) et incertitude à 95% du débit de base simulé avec HGS à l'exutoire des principaux bassins versants.	30
Tableau 8: Paramètres hydrogéologiques calibrés du modèle MODFLOW pour la zone du Centre-du-Québec	37
Tableau 9: Paramètres hydrogéologiques calibrés du modèle HGS pour la zone d'étude	37
Tableau 10: Paramètres hydrogéologiques calibrés du modèle HGS pour le BV de la Yamaska	37
Tableau 11: Fonctions actuelles et futures du RSESQ	43

1 INTRODUCTION

En janvier 2017, la Direction de l'eau potable et des eaux souterraines (DEPES) du Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) a financé trois projets de recherche visant à optimiser le Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ) et à améliorer la capacité du ministère à exploiter ces données pour mieux connaître les ressources en eaux souterraines à l'échelle du sud du Québec. Ces projets ont été rendus possibles grâce aux nombreuses données acquises récemment dans le cadre de plusieurs projets du Programme d'acquisition de connaissances des eaux souterraines (PACES).

Trois projets universitaires (Figure 1) ont ainsi été développés pour 1) assurer la gestion du RSESQ grâce au développement d'outils exploitant ses données (INRS), 2) produire des outils prédictifs sur la recharge et les étiages en fonction des variations climatiques (UQAM), et 3) développer des modèles couplés de l'eau de surface et de l'eau souterraine à l'échelle d'un grand bassin (Yamaska) et à l'échelle suprarégionale pour l'ensemble de la région d'étude (U. Laval). La Commission géologique du Canada (CGC) a été impliquée au cours des premières années du projet dans la perspective de développer une démarche intégratrice assurant la gestion dynamique des données et des cartes, la production d'indicateurs de gestion durable des ressources en eau souterraine et la mise à jour continue du modèle numérique suprarégional. Les activités de la CGC ne sont pas rapportées dans le présent rapport.

Les trois projets ont été réalisés en étroite collaboration entre les universités concernées, la DEPES, la Direction de l'expertise hydrique (DEH) du MELCC, et Ouranos. Cette collaboration avait pour but de créer une approche pour la gestion et l'exploitation de l'information hydrogéologique afin d'appuyer la gestion des ressources en eau souterraine face aux changements climatiques et aux pressions anthropiques. En s'ajoutant et en s'intégrant aux outils déjà développés par la DEH pour les eaux de surface, ce projet fournira au MELCC des connaissances et des outils pour poursuivre le développement de la gestion intégrée des ressources en eau.

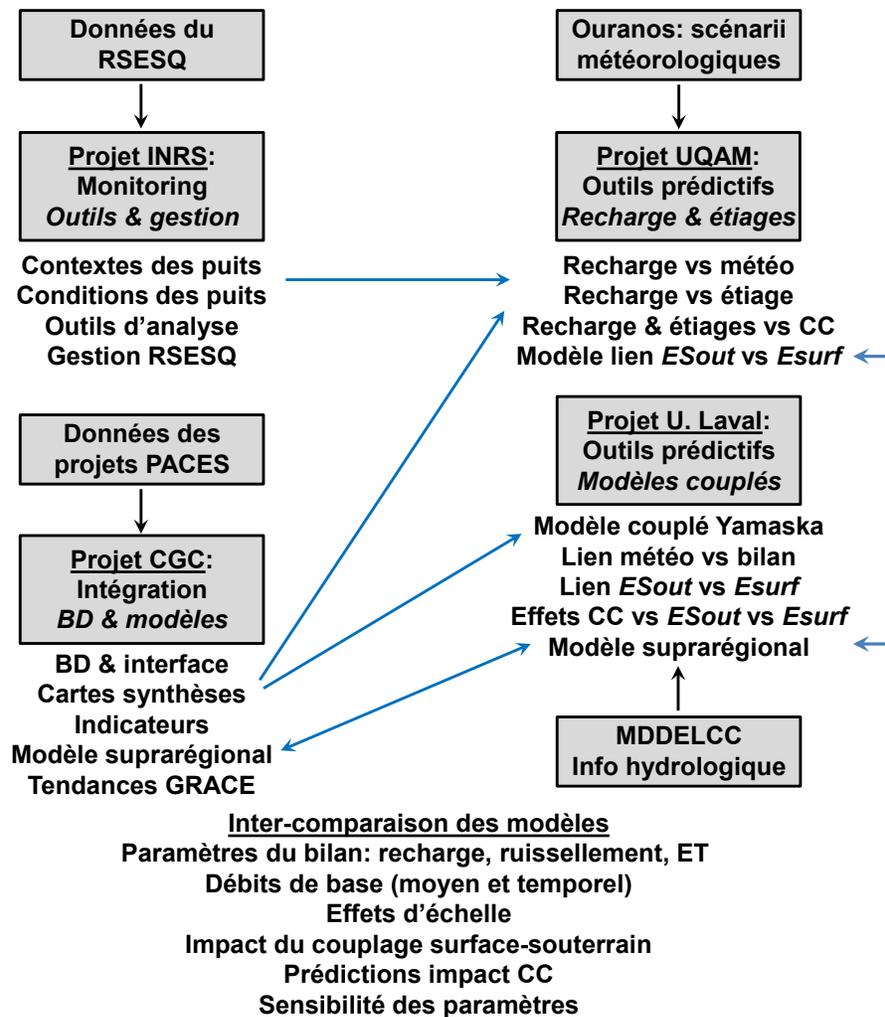
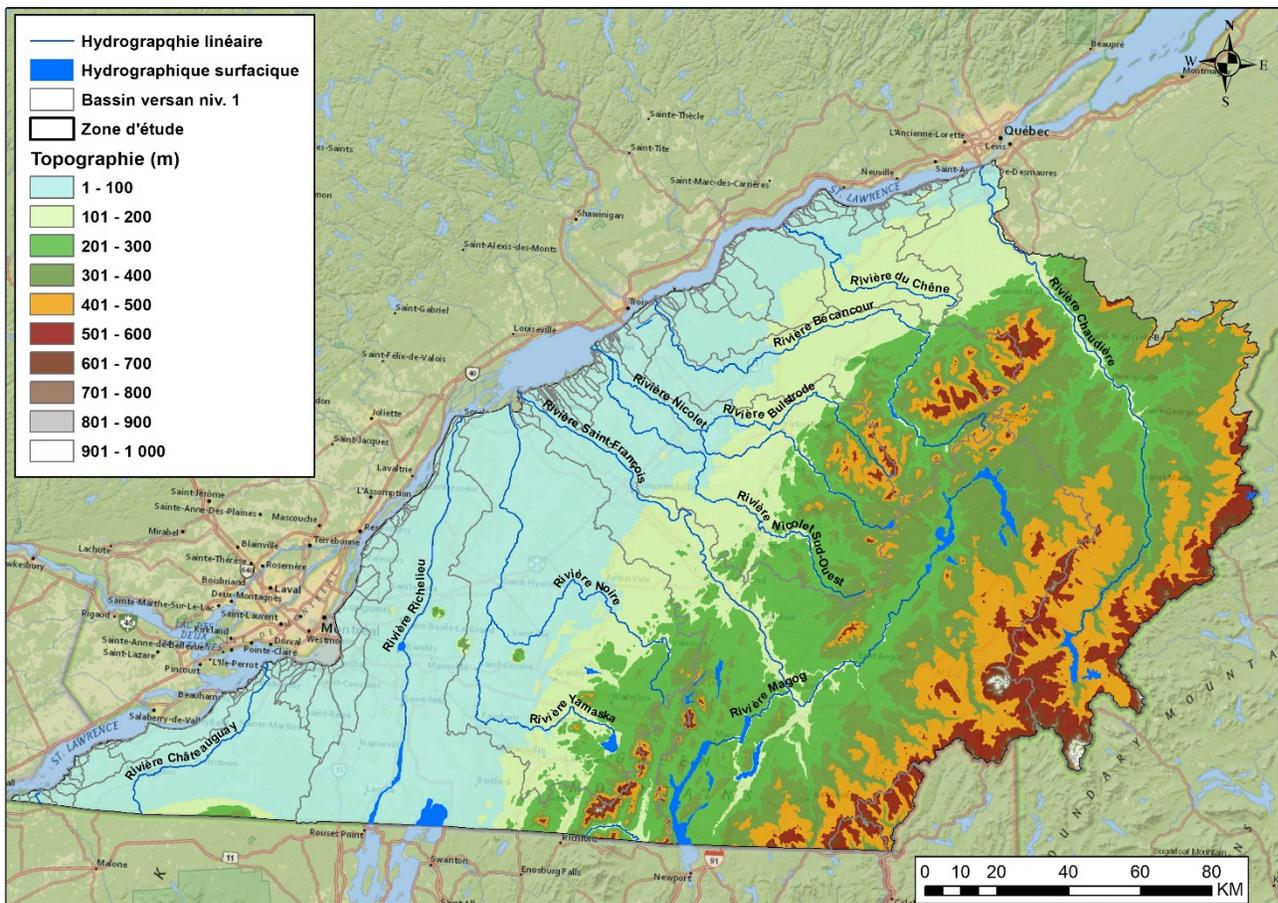


Figure 1. Intégration des projets de l'INRS, de l'UQAM de l'Université Laval

Ce rapport présente une synthèse des trois projets et une comparaison des résultats clés. Il a été rédigé conjointement par les professeurs et les professionnels de recherche, en collaboration avec les étudiants impliqués, dans les trois universités. Il présente une synthèse des travaux réalisés, des résultats obtenus et des orientations à privilégier pour la poursuite des travaux de recherche, notamment pour améliorer les outils de gestion développés et répondre à des questions que les projets actuels n'ont pu approfondir adéquatement. Un rapport détaillé des résultats de chacun des projets est présenté séparément par les universités.

2 ZONE D'ETUDE

La région d'étude couvre un territoire de 35 875 km² s'étendant du sud du fleuve Saint-Laurent à l'ouest de Lévis et englobe les régions couvertes par plusieurs projets PACES déjà réalisés : Bécancour (UQAM - 2013), Montérégie Est (INRS - 2013), Nicolet-Saint-François (UQAM - 2015), Chaudière-Appalaches (INRS - 2015) et une partie du PACES de la Communauté métropolitaine de Québec (Université Laval - 2013) ainsi que plusieurs autres projets antérieurs couvrant les bassins de la rivière Châteauguay et de la rivière Chaudière et finalement par le projet PACES Estrie (INRS) dont la finalisation est prévue pour 2022 (**Figure 1**). On retrouve 15 bassins versants (BV) importants (>100 km² de niveau 1 sur la zone d'étude (huit d'entre eux de plus de 500 km² sont analysés plus en détails dans le présent rapport) dont certains s'étendent aux États-Unis. Les cours d'eau de ces BV s'écoulent tous vers le fleuve Saint-Laurent et prennent leur source dans les Appalaches ou les Adirondacks. La topographie de la zone varie de plus de 1100 m dans les Appalaches à l'extrême sud-est à moins de 10 m près du fleuve Saint-Laurent (**Figure 2**).



Une zone d'étude plus grande couvrant 36 900 km² a été considérée pour le projet de modélisation supra-régionale de l'université Laval afin d'inclure la partie sud des bassins versants des rivières Châteauguay, Richelieu et Saint-François située aux États-Unis (**Figure 3**). La Figure 3 montre aussi le bassin versant de la rivière Yamaska pour lequel un modèle additionnel a aussi été développé par l'université Laval.

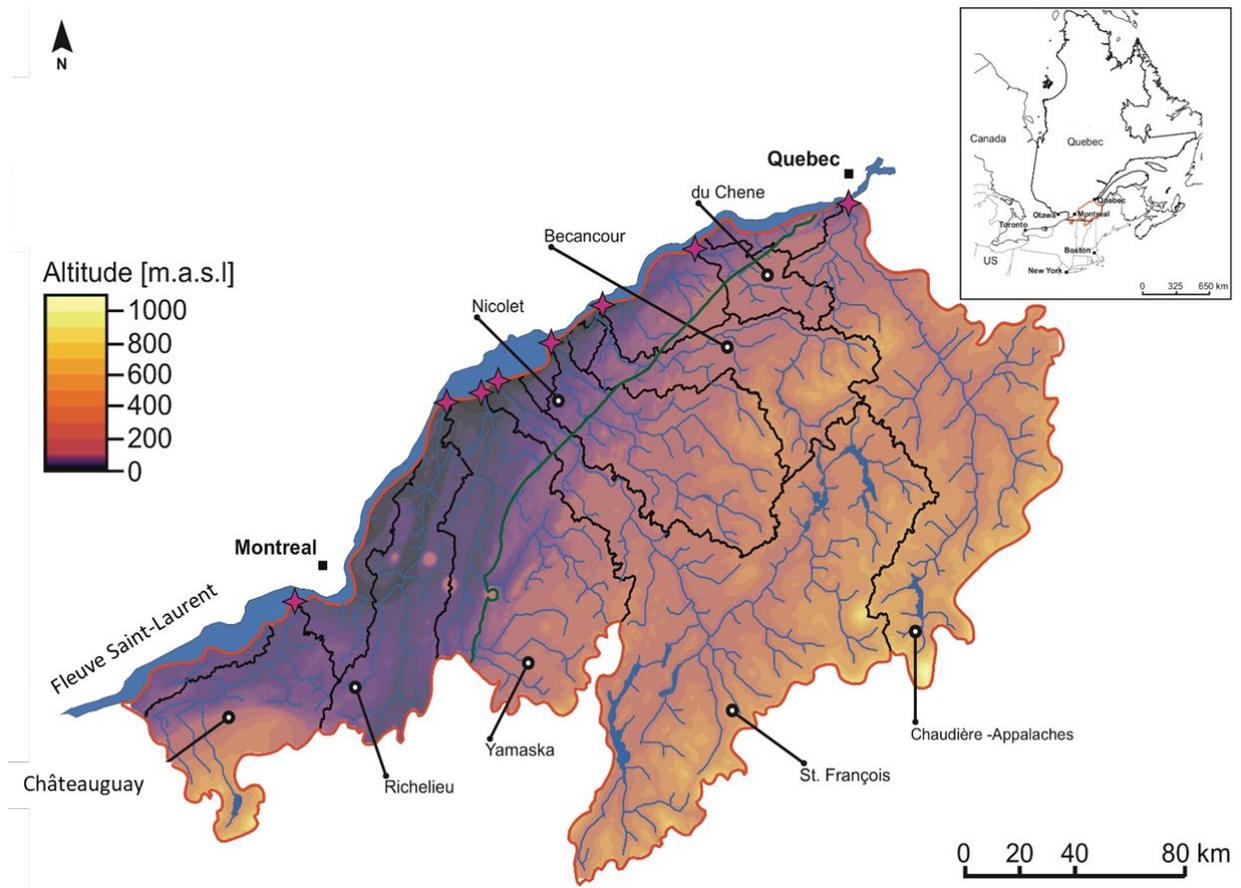


Figure 3. Zone d'étude du projet de modélisation supra-régionale de l'université Laval.

La géologie de la zone d'étude se compose d'une séquence de roches sédimentaires et métamorphiques qui suivent l'axe du fleuve Saint-Laurent (**Figure 4**). Les roches de la zone d'études couvrent une grande gamme d'âges, du Cambrien (grès dans l'extrême sud-ouest) au Crétacé (roches intrusives). Dans les basses-terres, les roches sédimentaires de la Plate-forme du Saint-Laurent dominent et évolue du sud-ouest au nord-est de grès, à dolomies, calcaires et shales. Vers le sud-est, sans le domaine appalachien, les roches deviennent plissées et de plus en plus métamorphisées. Dans la partie centrale, des schistes, des phyllades et d'autres roches sédimentaires métamorphisées sont principalement présentes. À l'extrême sud-est, des roches

sédimentaires sont également retrouvées (mudslate, arénite et grès). La zone d'étude est traversée par un réseau de failles régionales formées lors des deux orogénèses qui ont mis en place la chaîne des Appalaches. Lors de ces orogénèses, des arcs volcaniques se sont formés et leurs vestiges sont présents le long des failles régionales de la partie centre de la zone d'étude. Finalement, des intrusions de roches mafiques et felsiques sont présentes dans la partie sud et sud-est de la zone.

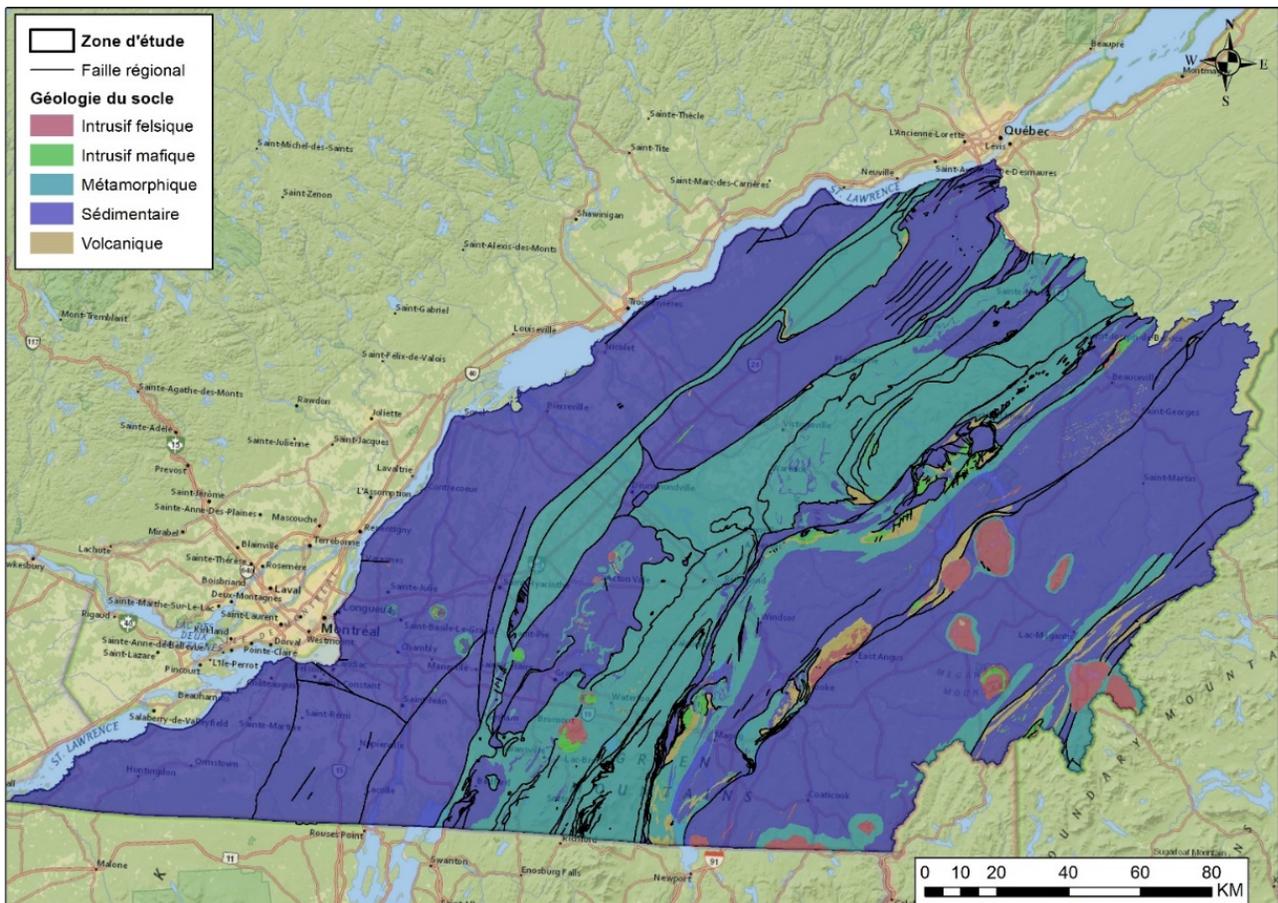


Figure 4. Grandes zones géologiques du socle rocheux dans la zone d'étude (modifiée de SIGEOM, 2020)

La géologie du Quaternaire de la zone d'étude est majoritairement composée de till (**Figure 5**). Ce type de dépôts se retrouve dans tous les secteurs ayant une élévation supérieure ~220 m, élévation qui constitue la limite approximative de l'invasion marine de la mer de Champlain. Ces secteurs sont principalement localisés dans la Appalaches. Les grandes vallées des Appalaches ont été comblées par des dépôts glacio-lacustres et fluvio/juxta glaciaires. Dans les basses-terres, on retrouve principalement des dépôts argileux et des sables deltaïques. Les dépôts organiques

et éoliens recouvrent une partie non négligeable de la partie basse des BV des rivières Bécancour et Nicolet. On retrouve aussi plusieurs milieux humides sur le BV de la rivière Châteauguay ainsi qu'au nord-est de la région d'étude (BV Bécancour et Du Chêne).

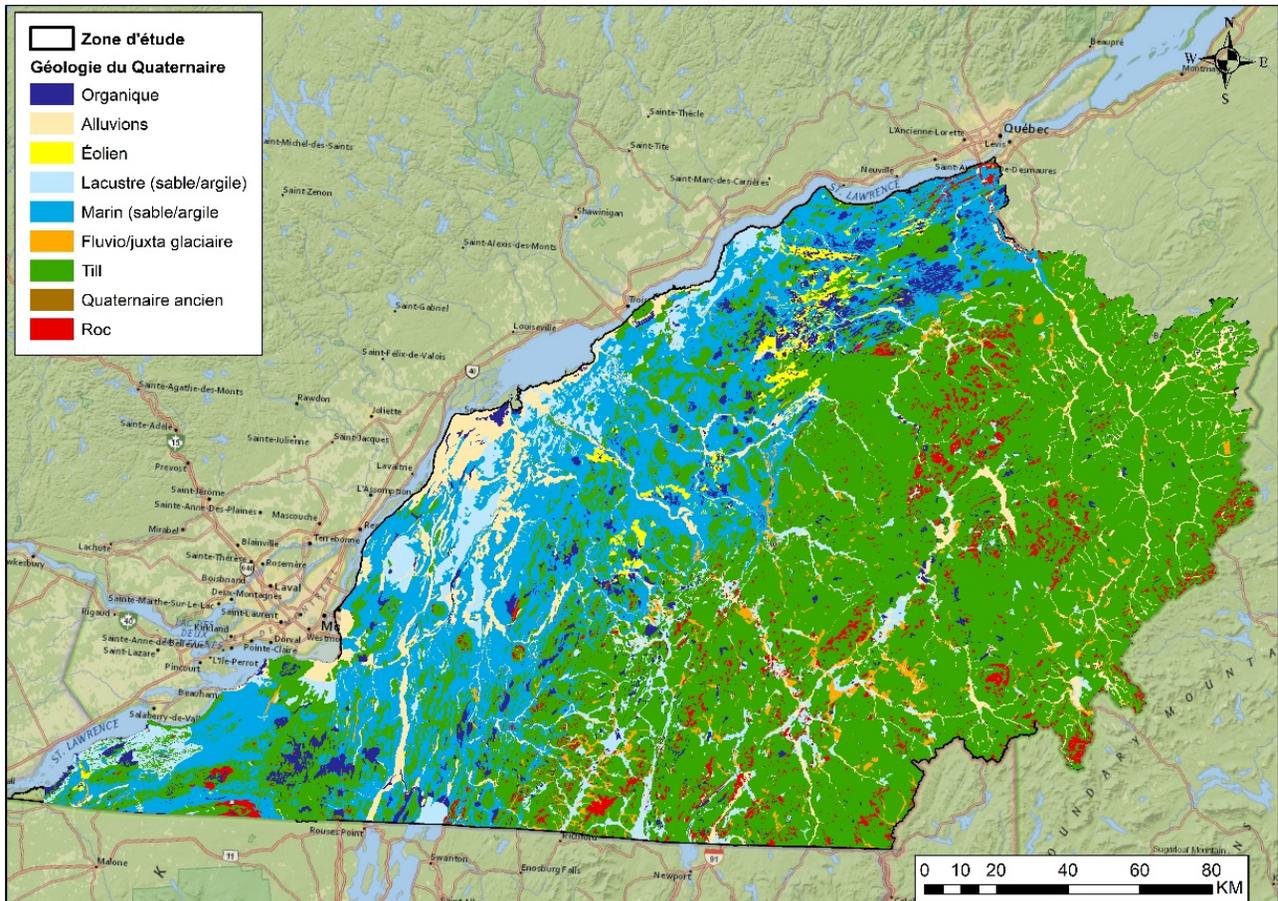


Figure 5. Géologie du Quaternaire simplifiée de la zone d'étude (modifiée de SIGEOM 2020 et CCG- Réseau d'information sur les eaux souterraines).

Le territoire de la zone d'étude est principalement occupé par l'agriculture dans les basses-terres (**Figure 6**). La forêt domine graduellement dans les secteurs de topographie plus élevée, à partir du piémont des Appalaches. Plusieurs zones urbaines sont également présentes dans la région, dont les principales correspondent aux localités de la banlieue sud de Montréal et au secteur urbanisé de Sherbrooke et Magog.

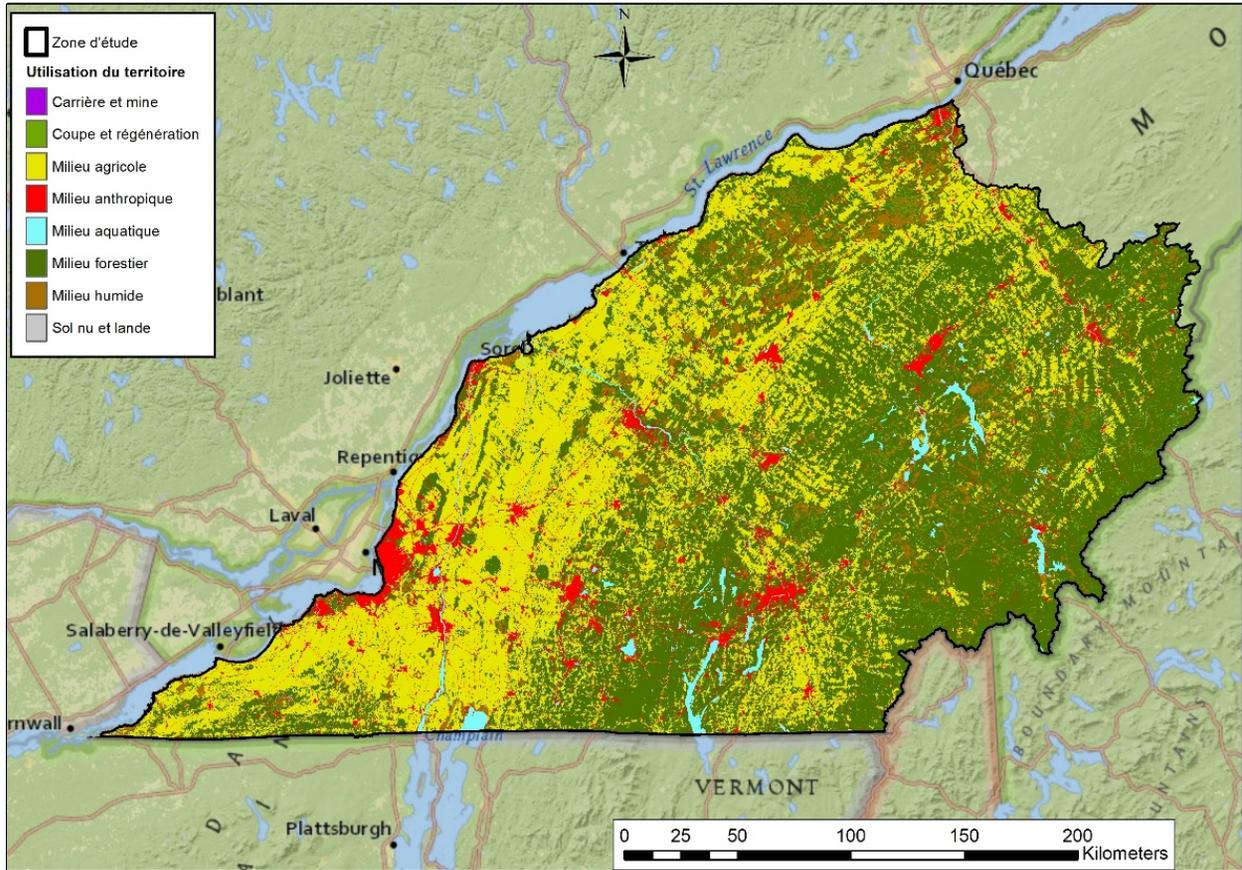


Figure 6. Utilisation du territoire pour sur la zone d'étude (MELCC, 2017).

3 DESCRIPTION BRÈVE DES TROIS PROJETS

3.1 Projet de l'INRS

Le projet réalisé par l'INRS avait pour but de permettre au MELCC de mieux gérer et surtout d'exploiter les données de son Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ), particulièrement dans une perspective de détection des effets des changements climatiques et aussi en tant qu'indicateur de la contribution de l'eau souterraine aux cours d'eau (notamment en lien avec les étiages sévères). Les travaux ont consisté (1) au traitement des données météorologiques, (2) au développement d'outils permettant d'améliorer la gestion et l'exploitation des données du RSESQ, (3) à la définition du contexte des puits du réseau, (4) à la correction et au traitement de leurs données piézométriques, (5) à la caractérisation des conditions de confinement des puits de suivi et (6) à l'estimation de la recharge au droit de puits du RSESQ le permettant. Les résultats complets sont présentés directement dans le rapport de l'INRS (Gosselin et al., 2021).

3.1.1 Traitement des données météorologiques

Le MELCC produit des données météorologiques quotidiennes sur grille pour tout le Québec. Malheureusement, cette grille n'a pas été mise à jour depuis 2017. Afin de mettre en relation les données piézométriques du RSESQ (1968 à aujourd'hui) avec des données météorologiques sur toute la période d'acquisition, les précipitations et températures mesurées aux stations météorologiques à proximité des puits du RSESQ ont été utilisées directement au lieu de celles de la grille. À cette fin, une station météorologique a d'abord été associée à chaque station piézométrique du RSESQ située dans la région d'étude des projets PACC sur la base de la disponibilité des données météorologiques, la différence d'élévation et la distance entre les stations. Ensuite, un outil (CDPREP : *Climate Data Preprocessing Tool*) a été développé afin de télécharger et mettre en forme automatiquement les données météorologiques qui sont disponibles publiquement sur le site internet d'Environnement Canada, puis combler les données manquantes dans les séries de données. Enfin, le logiciel GWHAT a été utilisé pour produire des graphiques mettant en relation les séries de données piézométriques et météorologiques.

3.1.2 Développement d'outils pour la gestion et l'exploitation des données du RSESQ

Divers outils ont été développés dans le cadre de ce projet qui pourraient être repris par le ministère pour améliorer la gestion, l'exploitation et la publication des données du RSESQ. Tout d'abord, des outils ont été développés pour télécharger, valider et formater automatiquement les

données piézométriques et hydrométriques qui sont disponibles publiquement sur les sites Internet du RSESQ et de la DEH du MELCC. Ensuite, un éditeur de figures a été développé pour produire des graphiques mettant en relation les données de niveau d'eau et les données météo. Des outils ont également été créés pour produire des graphiques qui permettent de brosser un portrait général des stations du RSESQ et des données disponibles. Basé sur les travaux de l'USGS, un autre outil a été développé pour la production d'hydrogrammes statistiques à partir des données piézométriques du RSESQ. Enfin, un outil a été développé pour réaliser des analyses fréquentielles des séries temporelles des niveaux piézométriques et barométriques du RSESQ et afficher les résultats dans un format permettant de visualiser et interpréter les résultats.

3.1.3 Définition du contexte des puits du RSESQ

Les conditions définissant le contexte autour et au droit des puits du RSESQ de la région PACC ont été définies à partir de plusieurs sources : (1) des projets antérieurs, dont les projets PACES, (2) d'un modèle géologique suprarégional de la CGC et (3) de couches d'informations disponibles en ligne, généralement sur le site « Données Québec ». Ce travail a notamment permis (1) de produire une fiche signalétique préliminaire individuelle de chaque puits, (2) de classer les puits selon leurs applications potentielles ; (3) de sélectionner les puits les plus représentatifs pour suivre l'état des nappes, et (4) de définir des critères permettant d'optimiser le RSESQ.

3.1.4 Correction et traitement des niveaux piézométriques

Dans une première étape, la fonction de réponse barométrique (BRF : *Barometric Response Function*) a été évaluée pour 81 stations du RSESQ situées dans la zone PACC à partir des données piézométriques et barométriques qui ont été acquises aux 15 minutes au cours de l'année 2017. Dans une seconde étape, les BRF ont été utilisées pour corriger les niveaux piézométriques historiques de 1980 à aujourd'hui pour les effets barométriques et des marées terrestres pour l'ensemble des stations pour lesquelles une BRF a pu être évaluée.

3.1.5 Caractérisation des conditions de confinement

Une caractérisation du niveau de confinement de l'aquifère rocheux a d'abord été faite à partir de critères basés sur l'épaisseur des différentes couches de sédiments extraites du modèle 3D de la CGC (Nastev et al., 2016). Les conditions de confinement de la nappe aux puits de la zone PACC ont aussi été déterminées avec deux autres méthodes complémentaires. La première méthode a consisté à définir des hydrofaciès aux puits de la région PACC à partir des descriptions stratigraphiques des forages et à caractériser le niveau de confinement de la nappe selon des

critères basés sur les épaisseurs de ces hydrofaciès. La seconde méthode a consisté à déterminer les conditions de confinements aux puits du RSESQ en comparant les BRF obtenues à chacun des puits aux courbes théoriques caractéristiques de conditions libre, semi-captive et captive. En plus de caractériser le confinement de la nappe aux puits, la méthode BRF a permis d'identifier les stations dont le niveau d'eau est influencé par des effets anthropiques.

3.1.6 Estimation de la recharge

Au cours de ce projet, le logiciel GWHAT a été finalisé afin de permettre l'évaluation de la recharge avec une approche qui combine un bilan hydrologique de surface avec un bilan en eau d'un aquifère à nappe libre. Le calage du modèle est réalisé à l'aide de la méthode d'optimisation globale GLUE (*Generalized Likelihood Uncertainty Estimation*). La recharge estimée par le bilan de surface est utilisée pour produire un hydrogramme synthétique qui est comparé à un hydrogramme mesuré. Cette approche permet de valider le bilan hydrologique de surface grâce aux niveaux d'eau mesurés. De plus, en considérant la plage des valeurs plausibles des paramètres hydrologiques du bilan, un ensemble de réalisations peut être produit à partir duquel l'incertitude sur l'estimation de la recharge peut être calculée. Par la suite, une démarche détaillée de l'application de la méthode d'estimation de la recharge aux puits du RSESQ avec GWHAT a été développée et testée sur deux puits de la région d'étude.

3.2 Projet de l'UQAM

Le projet réalisé par l'UQAM avait pour but de fournir au MELCC des informations nouvelles lui permettant de combler les lacunes de connaissances sur la recharge des eaux souterraines, l'inertie des aquifères et les débits de base des cours d'eau. Les objectifs spécifiques du projet étaient 1) de définir des conditions types de recharge des aquifères et d'émergence des eaux souterraines dans les cours d'eau, 2) de modéliser la recharge spatialement distribuée dans les conditions passées, présentes et futures, et 3) de modéliser la contribution des eaux souterraines aux débits de base des cours d'eau. Les résultats complets sont présentés dans Larocque et al. (2021).

3.2.1 Analyse des données du RSESQ

Les conditions de recharge des aquifères et d'émergence des eaux souterraines dans les cours d'eau ont été établies en partie au moyen de l'analyse des données hydroclimatiques et des données du RSESQ disponibles. Les données de précipitations et de température interpolées à l'échelle de la zone d'étude, les débits totaux de 59 stations débitmétriques disponibles entre 2000

et 2018, les débits de base estimés avec les filtres de Lyne et Hollick selon la méthode de Ladson et al. (2013) et selon la méthode de Eckhardt (2005), ainsi que les 83 puits du RSESQ disponibles entre 2000 et 2018 ayant fait l'objet d'un traitement des données pour la barométrie par l'INRS ont été analysés (analyses Mann-Kendall, pentes de Sen, autocorrélations, corrélations croisées, comparaison de moyennes et corrélations de Pearson). Les analyses réalisées avaient pour but 1) de décrire le réseau de suivi, 2) d'analyser les chroniques disponibles et 3) d'identifier les caractéristiques des stations permettant d'expliquer les variations, les tendances et l'inertie des niveaux piézométriques. Les résultats ont permis d'identifier certaines lacunes de représentation spatiale des puits et de faire des recommandations pour le maintien et le développement du RSESQ.

3.2.2 Recharge spatialement distribuée

La recharge spatialement distribuée pour les conditions passées et futures a été simulée au moyen du modèle HydroBudget (HB) développé au cours de ce projet dans l'équipe de l'UQAM. HB calcule un bilan hydrique de surface spatialisé en régime transitoire, spécialement adapté pour les grandes zones d'études (échelle régionale, plusieurs milliers de km²) et les climats froids et humides. Le manuel d'utilisation (Dubois et al., 2021) présente le fonctionnement du modèle ainsi que son utilisation pour un exemple simple d'application sur la Petite rivière du Chêne (<https://chaire-eau.uqam.ca>). La recharge passée et future a été estimée avec HB pour toute la zone d'étude sur des mailles de 500 m x 500 m. Le modèle a été calibré de manière automatisée sur les huit grands bassins versants. L'effet des changements climatiques a ensuite été quantifié en comparant la recharge simulée pour l'horizon de référence (1981-2010) à celle simulée pour deux horizons futurs (2041-2070 et 2071-2100) avec les 12 scénarios climatiques de précipitations et de températures de 12 modèles climatiques fournis par Ouranos.

3.2.3 Émergence de l'eau souterraine dans les cours d'eau

La contribution de l'eau souterraine aux débits de base des cours d'eau a été simulée avec un modèle d'écoulement souterrain tridimensionnel développé dans MODFLOW pour le Centre-du-Québec dans le cadre du projet PACES Nicolet et bas Saint-François (6 000 km²). Le modèle existant (Gagné et al., 2018) a été mis à jour pour simuler les conditions d'écoulement souterrain en régime transitoire sur de longues périodes. Cette nouvelle version du modèle permet d'étudier comment les liens entre la recharge, l'emmagasinement et les débits de base des cours d'eau varient dans le temps en réponse aux variations des précipitations et des températures. Après une calibration en régime permanent avec les conditions actuelles moyennes, des simulations en

régime transitoire ont été réalisées en intégrant la recharge spatialement distribuée issue de HB pour le climat passé (avec toutes les données disponibles entre 1961 et 2018 et pour l'horizon de référence couvrant la période 1981-2010) et pour les deux horizons de climat futur (2041-2060 et 2071-2100). L'impact des changements climatiques a été quantifié pour les niveaux piézométriques et pour les débits de base de quatre stations hydrométriques opérées par la DEH dans la zone d'étude.

3.3 Projet de l'Université Laval

Le projet réalisé par l'Université Laval avait pour but l'application d'un modèle hydrologique intégré, simulant l'écoulement couplé des eaux souterraines et de surface, afin d'atteindre deux objectifs principaux. Le premier objectif est de fournir un cadre de développement d'outils de gestion des prélèvements par l'application d'un modèle hydrologique intégré à grande échelle. Le deuxième objectif est de préciser, à l'aide d'un modèle hydrologique intégré appliqué à plus petite échelle, le lien entre les signaux observés dans les puits du réseau de suivi des eaux souterraines et les débits des cours d'eau, dans un contexte de changements climatiques. Les résultats complets sont présentés dans Therrien et al. (2021).

3.3.1 Volet 1: Développement d'un modèle intégré surface et souterrain sur le territoire du projet

La plateforme de modélisation intégrée des écoulements de surface et souterrain HydroGeoSphere (HGS) a été utilisée afin de mettre en place un modèle hydrodynamique pour le sud-ouest du Québec (**Figure 3**). Dans l'objectif de réduire les temps de calcul et de proposer une simulation explicite des débits de base, le module de bilan hydrique SWMB (Surface Water Mass Balance) a été développé afin de calculer le partitionnement entre le ruissellement et l'infiltration sur la base de la capacité hydrique des sols. Un flux potentiel d'infiltration a donc été calculé sur tout le territoire et imposé ensuite à HGS en lieu et place des précipitations totales. Le module de bilan hydrique SWMB ainsi que HGS ont été couplés et leurs paramètres ont été estimés simultanément lors du calage du modèle intégré sur des données de débits de base estimés par la méthode d'Eckhardt, des niveaux piézométriques à certains puits d'observations et des données satellites pour l'évapotranspiration réelle et le couvert de neige. Une méthode algorithmique a été utilisée afin d'assister le calage du modèle et de quantifier les incertitudes sur les débits de base simulés. Le modèle intégré a été utilisé afin d'évaluer les impacts potentiels des changements climatiques sur les ressources en eaux souterraines à l'échelle de la zone d'étude.

3.3.2 Volet 2: Développement d'un modèle couplé surface et souterrain sur le territoire de la rivière Yamaska

HGS a également été utilisé afin de développer un modèle intégré de l'écoulement des eaux de surface et des eaux souterraines sur le bassin versant de la rivière Yamaska. Contrairement au modèle régional, HGS a été utilisé sur le bassin versant de la Yamaska selon une approche plus classique où les précipitations totales sont imposées à la surface du modèle et le partitionnement des flux est ensuite calculé par HGS. Le débit simulé aux rivières de la Yamaska représente le débit total (surface et souterrain). Le développement de ce modèle a profité des paramètres estimés lors du volet 1. Aussi, les charges hydrauliques aux limites du bassin versant de la Yamaska ont été imposées à partir des résultats du modèle régional. Ce modèle peut éventuellement être utilisé afin d'évaluer les impacts des changements climatiques à une échelle plus locale que pour le volet 1.

4 ANALYSE DU RSESQ

L'analyse des puits dans le cadre des travaux de l'INRS (Gosselin et al., 2021) démontre que 21 puits parmi tous les puits de la zone d'étude seraient utilisables pour faire le calcul de la recharge et 12 autres permettraient le suivi de nappe uniquement. Au total, ce sont donc 33 puits seraient potentiellement utilisables pour produire un indicateur permettant le suivi de l'état des nappes sur le territoire étudié. Les résultats de l'UQAM montrent que les séries temporelles aux 83 puits ayant fait l'objet d'une analyse barométrique apportent tous des informations pertinentes sur la dynamique de l'eau souterraine dans la zone d'étude (incluant les puits présentant des variations de niveaux inattendues).

4.1 Classification des puits

Le rapport du projet de l'INRS (Gosselin et al., 2021) décrit la démarche ayant mené à la classification des 123 puits du RSESQ du sud du Québec ainsi qu'à la sélection des puits utiles au suivi de l'état des nappes sur la région d'étude qui a été réalisée en deux phases. Ce classement a permis de sélectionner dans la première phase 33 puits représentatifs dont 21 permettront l'évaluation de la recharge combinée au suivi de nappe (via un indicateur piézométrique) et 12 seront exclusivement dédiés au suivi de nappe. Lors de la seconde phase du processus de sélection des puits, cinq puits supplémentaires ont été sélectionnés pour le suivi de nappe dans trois des six zones qui avaient été identifiées comme sous représentées lors de la première phase. La **Figure 7** indique la distribution des 38 puits (33 + 5) sélectionnés en fonction de leur utilisation potentielle ainsi que les lacunes spatiales identifiées suite à ce classement. Le **Tableau 2** résume la répartition des puits actuels du RSESQ potentiellement utilisables pour suivre l'état des nappes en fonction des secteurs hydroclimatiques et des groupes associés. Afin de pallier aux lacunes de couverture spatiale qui ont été identifiées suite à ce travail, il est recommandé d'effectuer des travaux de forages pour implanter de nouveaux puits à l'intérieur des trois zones quadrillées en rouge sur la carte de la **Figure 7**. Lorsque l'application attribuée à ces puits (recharge ou indicateur de suivi des niveaux de nappe) aura pu être testée dans le cadre du projet sur la production d'un bulletin de l'état des nappes, la carte des secteurs suggérés pour l'implantation de nouveaux puits de suivi sera actualisée et transmise au MELCC. En parallèle, les tendances des données de niveaux piézométriques de l'eau souterraine déterminées par l'UQAM ont été superposées à la répartition spatiale des secteurs hydroclimatiques et des groupes déterminés par l'INRS pour les 83 puits disposant d'une analyse BRF et pour lesquels

les niveaux d'eau ont pu être corrigés pour les effets barométriques et les marées terrestres (Figure 8).

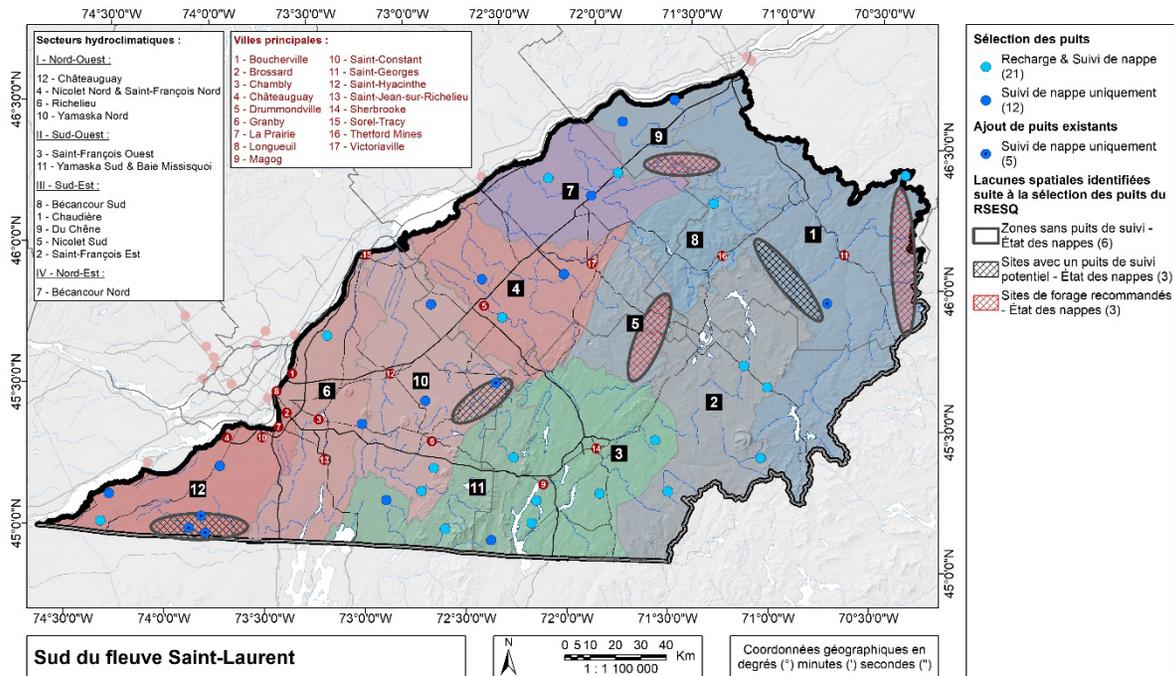


Figure 7: Puits d'intérêt pour suivre l'état des nappes au sud du Québec.

Tableau 1: Puits sélectionnés pour évaluer la recharge et suivre l'état des nappes

Secteur hydroclimatique	Groupe	Recharge et suivi de nappe	Suivi de nappe uniquement	Suivi de nappe au total
Châteauguay	N.-O.	1	2	3 (+3)
Nicolet Nord & St-François Nord	N.-O.	1	2	3
Richelieu	N.-O.	1	1	2
Yamaska Nord	N.-O.	3	2	5 (+1)
St-François Ouest	S.-O.	4	0	4
Yamaska Sud & Baie Missisquoi	S.-O.	3	2	5
Bécancour Sud	S.-E.	1	0	1
Chaudière	S.-E.	1	0 (+1)	1 (+1)
Du Chêne	S.-E.	0	2	2
Nicolet Sud	S.-E.	0	0	0
St-François Est	S.-E.	4	0	4
Bécancour Nord	N.-E.	2	1	3
PACC	-	21	12	33 (+5)

Le nombre de tendances positives ou négatives ainsi que les puits sans tendance est donné au **Tableau 2** selon les secteurs et groupes hydroclimatiques. La répartition spatiale des puits n'étant pas uniforme dans la zone d'étude, il est difficile d'établir un lien direct entre les tendances des niveaux piézométriques et les secteurs ou groupes hydroclimatiques (**Figure 9.a**). Néanmoins, il semble que les secteurs hydroclimatiques, qui considèrent les limites naturelles des principaux bassins versants et le relief, permettent de mieux distinguer les régions ayant des tendances positives de celles ayant des tendances négatives (**Figure 9.b**). En effet, les secteurs hydroclimatiques appartenant au groupe du Nord-Ouest (soit celui avec le moins de précipitations totales annuelles et les températures moyennes les plus élevées selon les normales climatiques – voir Gosselin et al., 2021) sont ceux montrant le plus de tendances à la baisse (67% des puits de ce groupe). C'est également le cas pour le secteur hydroclimatique Bécancour Nord, caractérisé par des précipitations et des températures faibles, où six puits présentent une tendance négative contre un seul avec une tendance négative. Le groupe Sud-Ouest (précipitations et températures élevées) est celui présentant le plus de tendances positives tandis qu'il est difficile de conclure pour les secteurs hydroclimatiques appartenant au groupe Sud-Est marqué par des précipitations importantes et des températures plutôt basses. Dans ces deux derniers groupes, l'ajout des 10 nouveaux puits de suivi du PACES Estrie (voir **Figure 8**) pourrait permettre de mieux définir ce portrait.

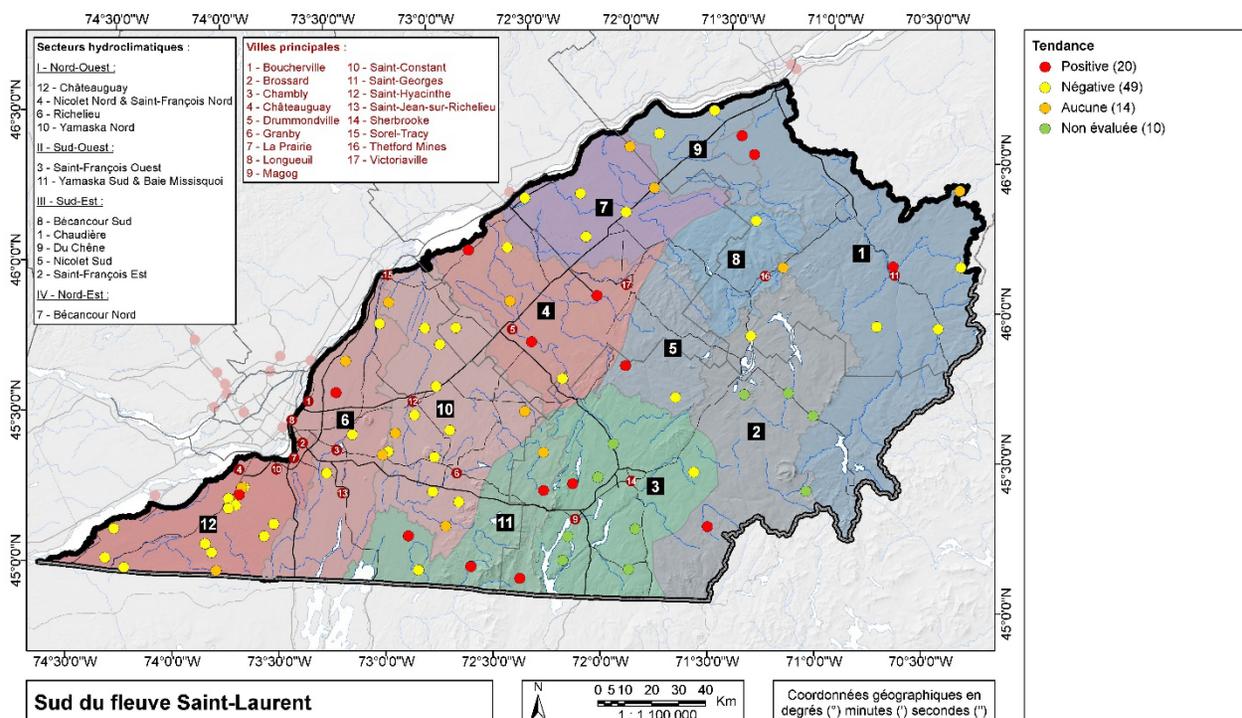


Figure 8: Tendance des niveaux d'eau souterraine aux puits du RSESQ selon les secteurs hydroclimatiques

Tableau 2: Répartition des tendances du niveau de l'eau souterraine selon les groupes hydroclimatiques.

Secteur hydroclimatique	Tendance		
	+	-	x
Châteauguay	2	15	2
Nicolet Nord & Saint-François Nord	3	2	1
Richelieu	1	4	2
Yamaska Nord	1	12	4
Nord-Ouest	7	33	9

Secteur hydroclimatique	Tendance		
	+	-	x
Saint-François Ouest	1	1	0
Yamaska Sud & Baie Missisquoi	6	1	1
Sud-Ouest	7	2	1

Secteur hydroclimatique	Tendance		
	+	-	x
Bécancour Sud	0	1	1
Chaudière	3	3	1
Du Chêne	0	2	0
Nicolet Sud	1	1	0
Saint-François Est	1	1	0
Sud-Est	5	8	2

Secteur hydroclimatique	Tendance		
	+	-	x
Bécancour Nord	1	6	2
Nord-Est	1	6	2

Note : + (positive), - (négative) et x (aucune)

Le type d'aquifère et les conditions de confinement compilés par l'INRS ont également été comparés aux tendances évaluées par l'UQAM (voir **Figure 9.c** et **Figure 9.d**). Toutefois, aucun lien n'a été décelé entre les tendances et ces deux paramètres. Enfin, le dernier exercice a consisté à comparer les tendances en fonction des applications possibles des puits déduites du classement de l'INRS (**Tableau 3**). À l'exception d'un puits, une tendance a pu être déterminée par l'UQAM pour tous les puits retenus pour suivre l'état des nappes (hormis les six retenus dans le cadre du PACES Estrie). Le comparatif montre bien que la sélection des puits est représentative de la région d'étude puisque cette dernière reprend globalement les tendances observées sur l'ensemble des 83 puits analysés : 59% des puits à la baisse contre 24% à la hausse. En effet, la sélection montre un portrait similaire : 51% des puits à la baisse et 29% à la hausse. Ces données de tendance pourront donc permettre une meilleure définition des conditions des puits du réseau au sud de la province dans le cadre du projet de bulletin voire même accompagner les données des fiches signalétiques.

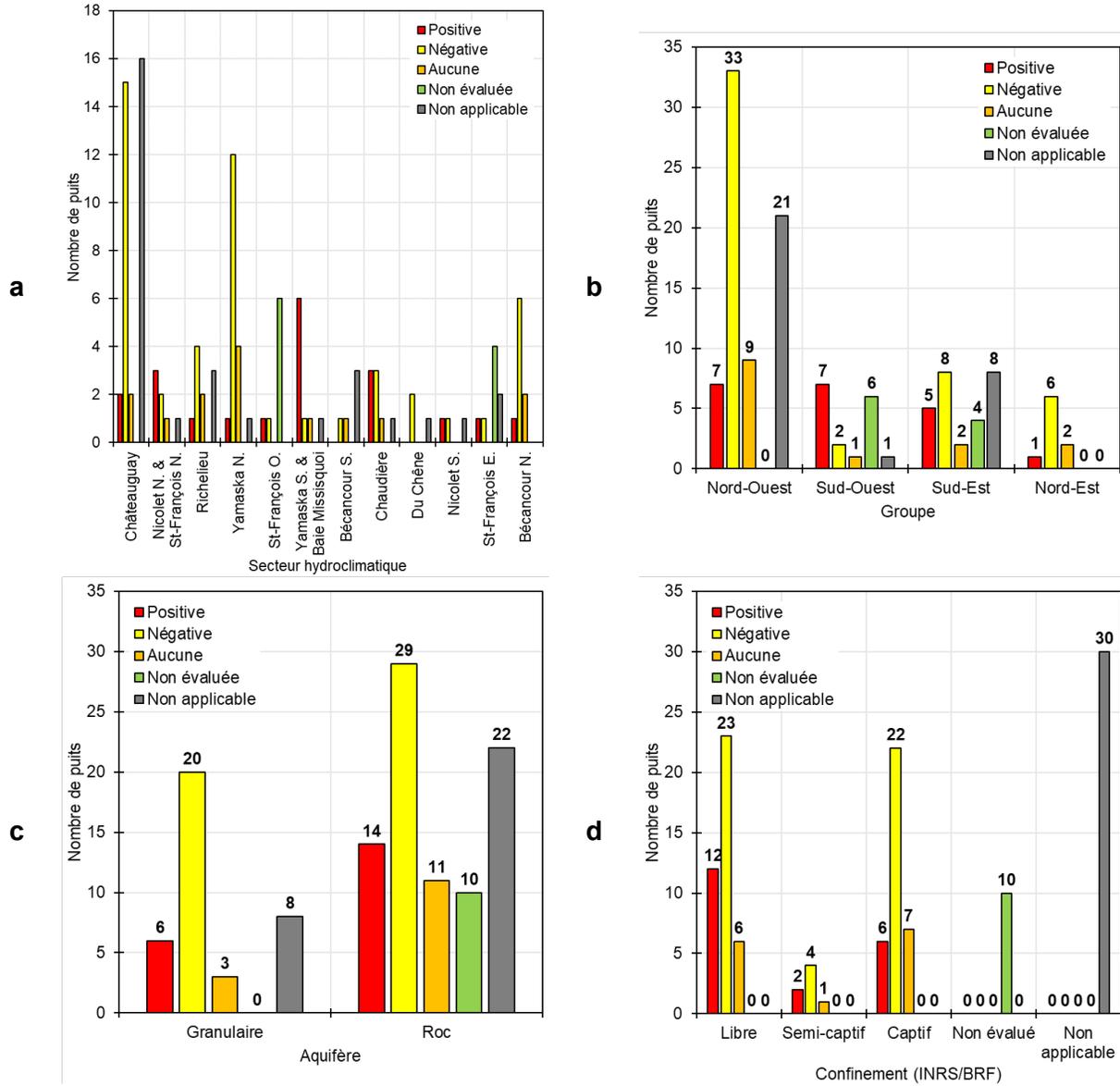


Figure 9: Évaluation des tendances selon (a) les secteurs hydroclimatiques, (b) les groupes, (c) le type d'aquifère et (d) les conditions de confinement (et des groupes).

Tableau 3: Comparaison des tendances selon les applications possibles des puits du RSESQ.

Application possible du puits	Tendance				
	Positive	Négative	Aucune	Non évaluée	Non applicable
Recharge & Suivi de nappe	5	7	3	6	0
Suivi de nappe uniquement	4	9	3	0	1
Non retenu	11	33	8	4	29

4.2 Utilisations potentielles des données

La carte de la figure 6 montre que les puits du RSESQ dans la zone d'étude devraient permettre d'assurer la fonction « fondamentale » du RSESQ, soit d'évaluer les tendances des niveaux d'eau en fonction de variations météorologiques. Toutefois, le nombre relativement limité de puits pouvant être utilisés à cette fin dans chaque secteur hydroclimatique pourrait impliquer que les variations du niveau des nappes seraient caractérisées à l'échelle des groupes de secteurs plutôt que des secteurs individuels. Les travaux amorcés récemment dans le cadre d'un projet de l'INRS supporté par le MELLC visant à produire un Bulletin sur l'état des nappes dans le sud du Québec devraient permettre de préciser la possibilité d'exploiter le RSESQ à cette fin. Le nombre de puits en conditions libres dans le sud du Québec devrait aussi permettre d'estimer localement la recharge des nappes avec GWHAT ainsi que d'estimer les paramètres hydrologiques représentatifs des dépôts meubles ou du roc à l'intérieur desquels le niveau piézométrique varie. Il serait aussi d'intérêt d'évaluer à nouveau les implications des tendances des niveaux piézométriques définies par l'UQAM pour les puits qui seront finalement sélectionnés afin de définir l'état des nappes au sud du Québec. La section 11 du présent rapport discute des autres fonctions que le RSESQ pourrait assumer, mais qui pourraient impliquer une adaptation du réseau.

5 SIMULATION DE LA RECHARGE

5.1 Définition

Dans ce projet, la recharge est le processus par lequel l'eau qui s'est infiltrée dans le sol atteint la zone saturée où elle renouvelle le réservoir d'eau souterraine. Le terme « recharge potentielle » représente l'infiltration résultant du bilan hydrique de surface (couches superficielles de sol) et qui peut atteindre la nappe si l'hydrostratigraphie le permet. La recharge potentielle peut être supérieure à la recharge réelle si l'aquifère est localement captif ou semi-captif. Il est alors entendu que la différence entre la recharge potentielle et la recharge réelle s'écoule rapidement en subsurface pour rejoindre directement les cours d'eau.

5.2 Simulations avec les modèles HydroBudget et SWMB

Les deux modèles de simulation de la recharge présentés dans ce rapport sont le modèle HydroBudget (HB ; Dubois et al., 2021) et un modèle développé par l'université Laval basé sur le modèle Modcou (MC ; Ledoux et al., 1984 ; Delottier et al., 2021). Ces deux modèles sont relativement similaires dans leur conception et leur représentation des composantes du bilan hydrique de surface (**Figure 10**).

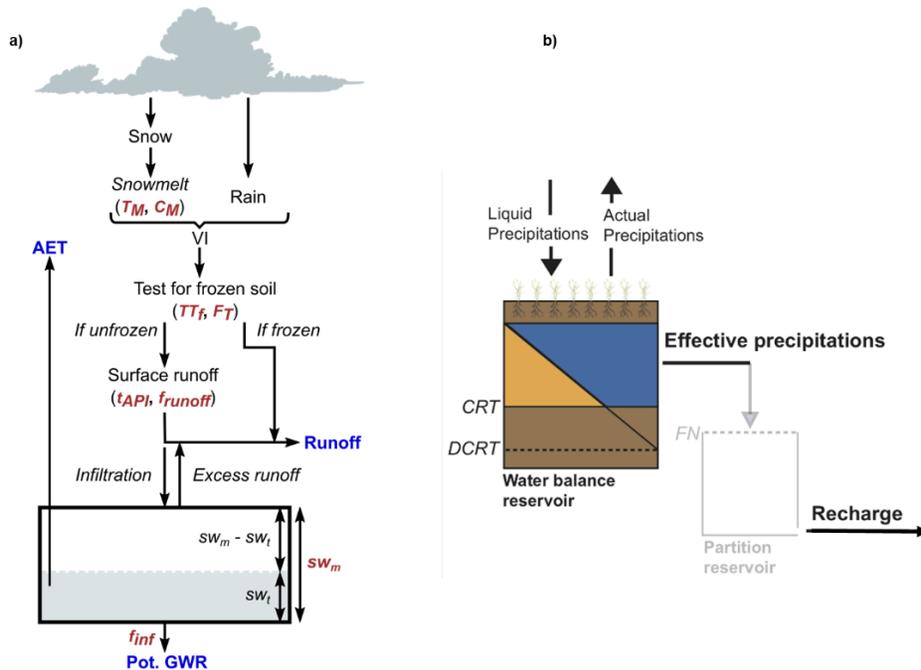


Figure 10: Fonctionnement des modèles de recharge utilisés dans le projet : a) HydroBudget (HB ; Dubois et al., en révision) et b) MC (Ledoux et al., 1984; Delottier et al., 2021).

5.2.1 Calibration des modèles

L'approche de calibration utilisée dans HB est basée sur une simulation automatisée réalisée simultanément sur tous les grands bassins versants de la zone d'étude. L'objectif est de minimiser l'erreur globale sur la zone d'étude et non de calibrer le modèle sur les débits totaux et les débits de base (méthode de Lyne et Hollick utilisée selon Ladson et al., 2013) de chacune des stations hydrométriques individuellement, en utilisant un seul ensemble de paramètres pour les huit grands bassins versants de la zone d'étude. La calibration a été réalisée en utilisant le 2/3 de la longueur de la série temporelle d'une station et la validation avec le 1/3 de la série (les séries temporelles des stations utilisées varient en longueur, mais débutent au plus tôt en 1961 et se terminent 2017). Une pondération de 60% (débit total) et de 40% (débit de base) a été utilisée pour calculer l'erreur entre les données simulées et observées. Près de 5 000 simulations ont été réalisées afin d'obtenir le meilleur ensemble de paramètres.

Le modèle MC n'a pas été calé d'une manière indépendante (comme pour le modèle HB), mais couplé avec le modèle HGS. Une présentation détaillée de l'approche est disponible dans le rapport interne de l'Université Laval (Therrien et al., 2021). Les paramètres du modèle ont été estimés avec l'application de la méthode "Iterative Ensemble Smoother" qui permet également de quantifier les incertitudes liées aux problèmes d'équifinalités. Les charges hydrauliques aux puits, les débits de base estimés (Eckhardt, 2005) aux stations et des observations satellites du couvert de neige et de l'évapotranspiration réelle ont été utilisés lors du processus de calage. Finalement, le modèle MC a été calé sur une année hydrologique représentative de chacun des bassins versants. Cette année hydrologique a été obtenue en calculant la moyenne des flux mensuels pour la période de septembre 2011 à août 2015.

5.2.2 Paramètres utilisés dans les modèles de la recharge

Les paramètres issus de la calibration des modèles sont présentés au **Tableau 4**. Pour le modèle HB, les paramètres sont uniformes pour toute la zone d'étude, tandis que pour MC, les valeurs moyennes, minimales et maximales représentent la variabilité spatiale des paramètres qui varient spatialement sur les mailles de calcul. Malgré des similitudes sur le plan conceptuel, les paramètres des deux modèles sont difficilement comparables. Deux paramètres peuvent être directement comparés, il s'agit d'une part du coefficient de fonte de la neige et d'autre part de la teneur maximale en eau du sol (HB) qui, une fois multipliée par le coefficient d'infiltration, peut être comparé à la capacité moyenne d'infiltration (MC). Les coefficients de fonte sont du même ordre de grandeur pour les deux modèles, soit 4,0 mm/°C/j pour HB et en moyenne 5,5 mm/°C/j

pour MC. La capacité d'infiltration de HB est de 15,4 mm/j (308 mm x 0,05/j) soit une valeur supérieure à celle de MC qui est en moyenne de 3,63 mm/j).

Tableau 4: Paramètres issus de la calibration des deux modèles de simulation de la recharge. Pour MC, la valeur optimisée correspond à la valeur moyenne de la distribution sur le domaine où l'écart type (σ) de cette distribution est également donné.

	Paramètre	Valeur
HydroBudget	Température de fonte (°C)	0,5
	Coefficient de fonte (mm/°C/j)	4
	Seuil de gel du sol (°C)	-17,9
	Temps de gel du sol (j)	16,4
	Période des précipitations antérieures (j)	3,8
	Facteur de correction RCN (-)	0,54
	Teneur maximale en eau du sol (mm)	308
	Coefficient d'infiltration (1/j)	0,05
MC	Capacité maximale d'infiltration (FN) (mm/jour)	3,63 ($\sigma=0,36$)
	Capacité moyenne en eau du sol (CRT) (mm)	99,64 ($\sigma=0,11$)
	Capacité minimum en eau du sol (DCRT) (mm)	1
	Facteur de fonte (ETA) (mm/°C/j)	5,5 ($\sigma=0,07$)
	Albédo neige	0,58

5.2.3 Comparaison des recharges estimées par les trois méthodes

Les recharges simulées par les modèles HB et MC ont été comparées avec les débits de base obtenus avec les méthodes de Lyne et Hollick (Ladson et al., 2013) et Eckhardt (2005) pour le bassin versant de la rivière Yamaska où les trois modèles ont été utilisés. Les évapotranspirations potentielles (ETP) et réelles (ETR) de HB et MC ont également été comparées à celles obtenues avec le modèle couplé HGS pour ce bassin versant (**Tableau 5**). Les données de précipitations et de températures utilisées dans le modèle HB sont celles de la grille climatique québécoise (Bergeron, 2016). Pour les modèles MC et HGS, les données de précipitations et températures de la base de données nord-américaine Daymet (Thornton et al., 1997) ont plutôt été utilisées parce que les données de Bergeron (2016) ne couvrent pas la partie du domaine de simulation aux États-Unis. Également, les débits de base utilisés pour la calibration de HB sont ceux obtenus avec le filtre de Lyne et Hollick tandis que ceux utilisés pour la calibration de MC et HGS sont ceux obtenus avec le filtre de Eckhardt. Les données sont comparées pour la période 2011-2015 qui est la seule période commune aux trois modèles.

Pour le bassin versant de la rivière Yamaska, la recharge moyenne pour la période 2011-2015 est de 120 mm/an avec HB et de 273 mm/an avec MC. Ces différences reflètent probablement en partie le fait que des débits de base différents ont été utilisés pour la calibration des deux modèles et que les débits de base du filtre Lyne et Hollick sont inférieurs à ceux du filtre Eckhardt. Les valeurs d'ETR sont très différentes d'un modèle à l'autre, avec 532 mm/an pour HB, 699 mm/an pour Modcou et 753 mm/an pour HGS.

Tableau 5 : Comparaison des flux (mm/mois) pour le bassin de la rivière Yamaska pour les trois modèles utilisés. Les flux représentent la moyenne mensuelle entre septembre 2011 et août 2015. Le débit de base est calculé selon Lyne et Hollick (Ladson et al., 2013) et Eckhardt (2005) pour la station hydrométrique 030345 (3 334 km²).

Mois	HydroBudget			Modcou			HGS		Débit de base	
	ETP	ETR	Recharge	ETP	ETR	Recharge	ETP	ETR	Lyne et Hollick	Eckhardt
Sept	69	59	1	115	108	19	115	102	8	14
Oct	37	35	5	35	30	25	35	32	12	14
Nov	11	11	10	4	4	16	4	3	15	12
Dec	3	3	17	0	0	16	0	0	16	16
Janv	2	2	18	0	0	7	0	0	15	15
Fev	3	3	13	3	3	8	3	2	11	7
Mar	13	13	16	16	16	39	16	10	16	22
Avr	43	43	23	82	82	77	82	78	28	44
Mai	98	98	12	201	157	26	201	159	19	26
Juin	117	102	4	191	125	19	191	162	11	18
Juil	131	83	1	212	91	11	212	85	6	8
Aout	111	78	1	175	83	10	175	121	4	6
Total	639	532	120	1035	699	273	1035	753	161	202

Les débits de base estimés avec Lyne & Hollick aux stations hydrométriques les plus en aval et sans données manquantes sont de 141 mm/an et de 201 mm/an pour les stations 030304 et 030314 respectivement. Ces stations sont situées dans la partie centrale et amont du bassin versant de la rivière Yamaska, un secteur qui ne possède pas une couverture importante de dépôts argileux. Le débit de base mesuré à l'exutoire pourrait donc être inférieur aux valeurs présentées plus haut, étant donné la prédominance des dépôts peu perméables dans la partie aval du bassin versant. À titre de comparaison, sur le bassin versant de la rivière Yamaska, Carrier et al. (2013) avaient estimé une recharge de 98 mm/an à l'aide de du modèle HELP. Larocque et Pharand (2010) ont quant à eux estimé une recharge de 215 mm/an à l'aide d'un modèle de bilan hydrique de surface sur un sous-bassin de la rivière Yamaska (rivière Noire, station DEH 30304). L'analyse des flux simulés dans le temps apporte un supplément d'information sur le comportement des deux modèles. La **Figure 11** illustre l'évolution temporelle des flux simulés par HB et MC sur le bassin versant de la rivière Yamaska (4 787 km², valeurs mensuelles moyennes pour la période de septembre 2011 à août 2015) (voir section **5.2.1**). Les recharges simulées par

HB sont plus faibles que celles de MC la majorité de l'année. Une différence importante est observée lors de la fonte printanière où les deux modèles divergent plus fortement. À titre de comparaison, le débit total et le débit de base mensuels moyen de la station hydrométrique la plus en aval (030345, 3 334 km²) sont illustrés à la **Figure 12**.

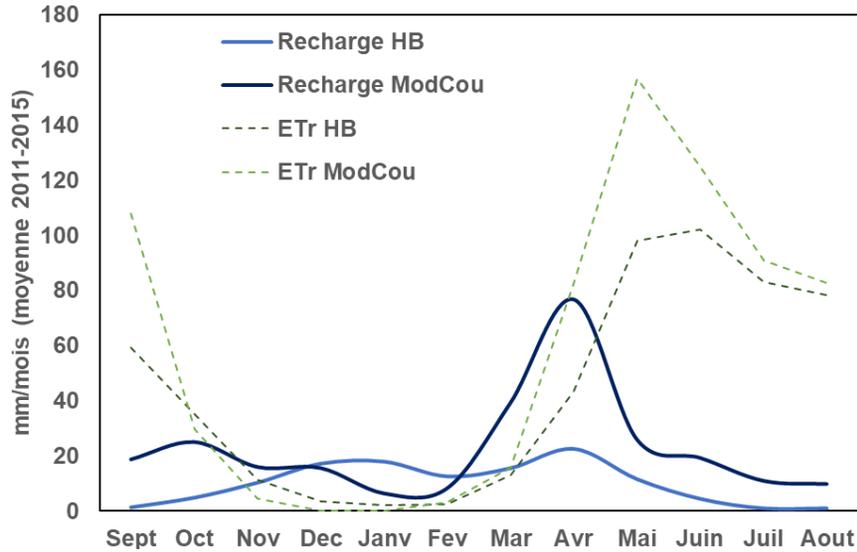


Figure 11: Recharge et ETR simulée par HB et MC pour le bassin versant de la rivière Yamaska (4 787 km²). Les flux représentent la moyenne mensuelle entre septembre 2011 et août 2015.

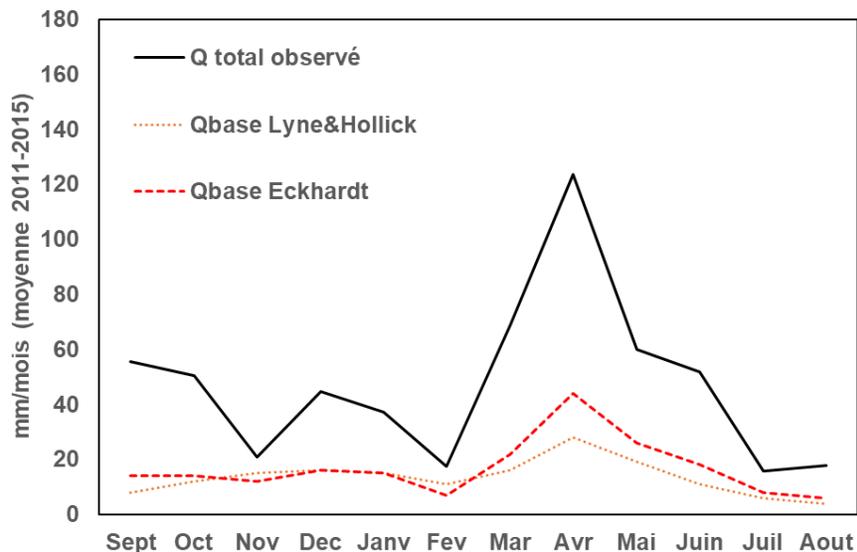


Figure 12 : Débits totaux et débits de base mensuels moyens à la station hydrométrique 030345 (3 334 km²). Les flux représentent la moyenne mensuelle entre septembre 2011 et août 2015.

Bien qu'étant situées plus en amont sur le bassin, les données de cette station suggèrent que les séparations par le filtre de Lyne et Hollick (1979) et de Eckhardt (2005) donnent presque les mêmes résultats, sauf lors de la fonte printanière. La comparaison des valeurs annuelles

moyennes pour les huit grands bassins versants de la zone d'étude. Le **Tableau 6** montre la recharge varie entre les bassins versants et entre les modèles. Le modèle HB évalue la recharge de 109 mm/an (Châteauguay) à 154 mm/an (Du Chêne), tandis que le modèle MC évalue la recharge de 146 mm/an (Nicolet) à 404 mm/an (Bécancour). La proportion de la recharge est en moyenne 1,5 fois plus élevée pour MC (19%) que pour HB (12%). Les variations interbassins sont moins importantes dans HB que dans MC et les proportions des flux varient très peu dans HB comparativement à MC. Les deux modèles montrent la même réduction de la proportion de l'ETR du sud-ouest (Châteauguay) vers le nord-est (Chaudière). La différence de recharge entre les deux modèles pourrait être causée par la méthode utilisée pour le calcul de l'ETP. Une différence de ~40% de l'ETP est observable entre les deux modèles (635 mm/an vs 1 035 mm/an ; **Tableau 5**). Cette différence se répercute dans les valeurs d'ETR avec une différence de ~25% entre les deux modèles (532 mm/an vs 699 mm/an).

Tableau 6 : Comparaison des valeurs annuelles de ruissellement, d'ETR et de recharge (mm/an) obtenues avec les modèles HydroBudget et Modcou pour les huit bassins versants de la région d'étude. Les valeurs entre parenthèses représentent la proportion du bilan hydrique attribuée à chaque flux.

	Bassin versant	Recharge (mm/an)	Ruissellement (mm/an)	ETR (mm/an)
HB (1961-2017)*	Châteauguay	109 (11%)	368 (39%)	482 (50%)
	Richelieu	119 (11%)	430 (41%)	498 (48%)
	Yamaska	139 (12%)	442 (41%)	507 (47%)
	Saint-François	147 (13%)	485 (42%)	512 (45%)
	Nicolet	144 (13%)	438 (41%)	502 (46%)
	Bécancour	151 (13%)	465 (42%)	501 (45%)
	Du Chêne	154 (13%)	453 (41%)	512 (46%)
	Chaudière	145 (13%)	470 (42%)	494 (45%)
MC (2011-2015)	Châteauguay	249 (24%)	114 (11%)	674 (65%)
	Richelieu	155 (15%)	271 (26%)	608 (59%)
	Yamaska	273 (24%)	199 (17%)	673 (59%)
	Saint-François	162 (13%)	381 (31%)	705 (56%)
	Nicolet	146 (13%)	352 (30%)	661 (57%)
	Bécancour	404 (35%)	146 (13%)	616 (53%)
	Du Chêne	181 (15%)	405 (35%)	586 (50%)
	Chaudière	218 (17%)	255 (20%)	774 (62%)

* A noter ici que les résultats de HB sont présentés pour toute la période passée simulée, i.e. 1961 à 2017.

La méthode de calibration pourrait aussi expliquer certaines différences entre les modèles. Par exemple, le modèle MC qui a été calibré de manière spatialisée donne des valeurs de recharge

très différentes entre les BV de la Bécancour et de la Nicolet. Ces deux BV sont connexes et ont une morphologie et un climat similaires. Ces résultats inattendus pourraient être expliqués par le fait que la station hydrométrique la plus en aval sur la Bécancour est particulièrement difficile à analyser avec les deux filtres récursifs. Le calage de paramètres spatialement variables dans MC est probablement influencé par ces données débitométriques, tandis que le calage de HB vise à obtenir un seul ensemble de paramètres pour toute la région d'étude ce qui atténue l'influence des données locales.

6 DÉBITS DE BASE DES COURS D'EAU

6.1 Estimés avec filtres

Les débits de base associés à chacune des stations débitométriques retenues (59 stations) ont été calculés avec le filtre récursif de Lyne et Hollick (1979) en suivant la démarche de Ladson et al. (2013) pour une calibration stochastique standard du filtre avec 30 passes. Les débits de base annuels moyens calculés pour les 59 stations varient de 125 à 300 mm/an avec des valeurs extrêmes allant de 350 à 525 mm/an. Les débits de base calculés avec le filtre d'Eckhardt (2005) en utilisant les paramètres calibrés par la Direction de l'expertise hydrique (DEH ; Poirier, 2012, 33 stations avec des paramètres) varient de 125 à 200 mm/an avec des valeurs extrêmes allant de 250 à 425 mm/an (**Figure 13**). Les paramètres de la DEH permettent le calcul avec la méthode d'Eckhardt pour 32 stations de débit. Les deux filtres donnent des valeurs annuelles de débit de base relativement similaires, toutefois, le filtre d'Eckhardt (2005) montre une plus grande variabilité des débits de base d'une année à l'autre que le filtre de Lyne et Hollick (Ladson et al., 2013).

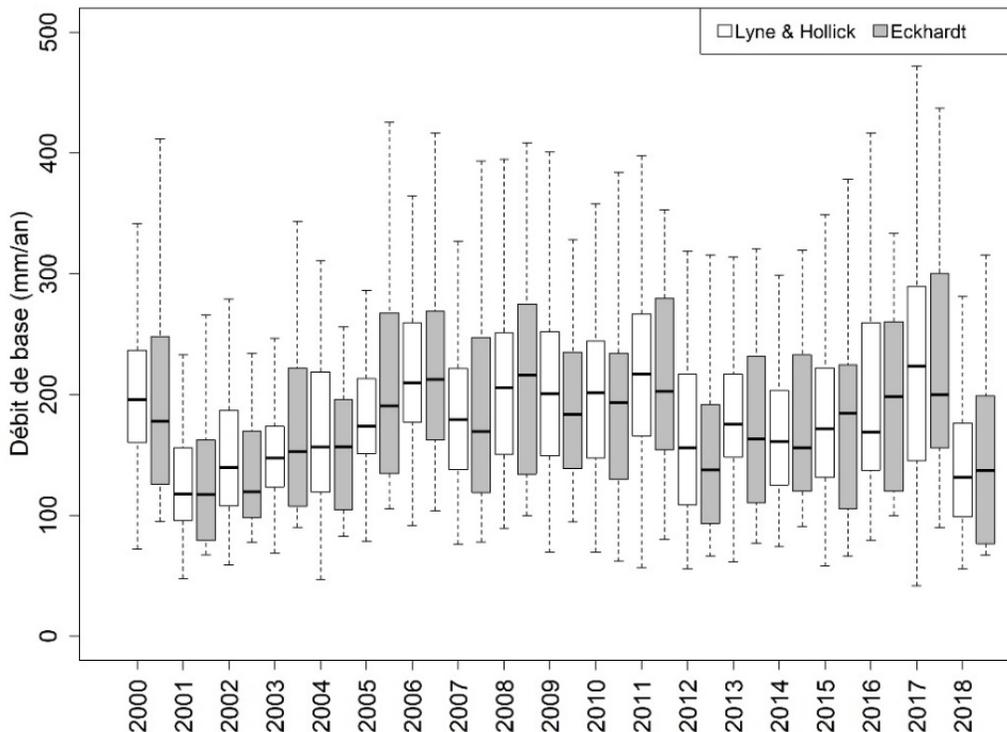


Figure 13. Médianes, 25e et 75e percentiles des débits de base pour les stations retenues sur la zone d'étude entre 2000 et 2018 calculés selon la méthode de Lyne and Hollick (Ladson et al., 2013) et selon la méthode d'Eckhardt (2005).

Cette plus grande variabilité est aussi observable à la **Figure 14** qui montre que la méthode Eckhardt donne des débits de base bas en étiage et haut en crue comparativement à la méthode de Lyne & Hollick.

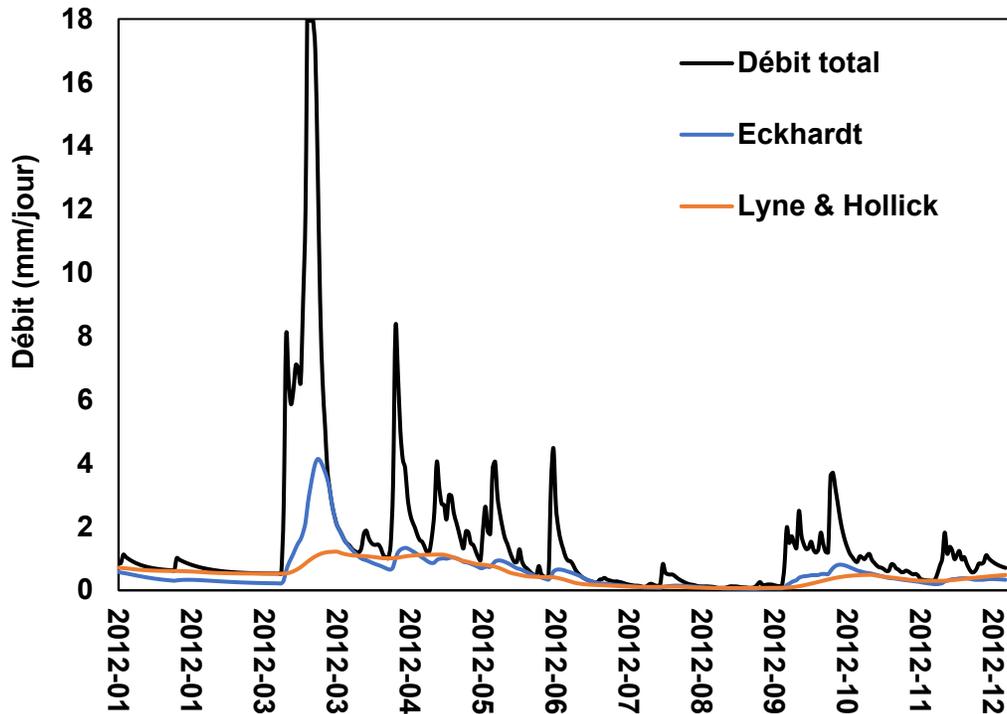


Figure 14: Comparaison de la méthode de séparation du débit de base pour la station 24014 (Bécancour).

6.2 Simulé avec MODFLOW

Le débit de base a été simulé avec Modflow (Centre-du-Québec) pour la période 1961-2017. Les résultats ont été extraits pour quatre stations hydrométriques qui représente les bassins versants des rivières Nicolet (aval et amont), Bécancour(aval) et Petite du Chêne. La **Figure 15** illustre les valeurs de débit de base simulées et observées pour le bassin versant de la station 30101 en amont de la rivière Nicolet. De manière générale, les flux simulés en régime transitoire montrent que la condition limite avec des drains ne suffit pas à simuler le débit de base estimé par le filtre récursif en période de crue. En combinant le flux extrait par les drains avec les suintements de surface estimés avec le module UZF (suintement de surface), la qualité de la calibration est nettement améliorée. Toutefois, même cette somme des flux souterrains qui alimentent les cours d'eau ne permet pas de représenter les débits de base provenant du filtre de Lyne et Hollick, notamment en période de crue. Ceci est sans doute causé par une surestimation des débits de base estimés par les filtres récursifs durant les périodes de crue (Paddington et al., 2012).

Également, les débits de base très bas obtenus par le filtre récursif aux quatre stations pour différentes années sont souvent surestimés par la somme des flux souterrains simulés qui alimentent les cours d'eau. Les débits de base obtenus par filtres récursifs étant beaucoup plus fiables en étiage, ceci indique une limite du modèle pour représenter les connexions nappe-rivière en régime transitoire. Une diminution des coefficients d'emménagement (10 fois inférieur aux valeurs calibrées) permet de mieux représenter les étiages sévères et les crues printanières, mais entraîne des variations de niveaux piézométriques d'une amplitude irréaliste (résultats non illustrés). Il est probable que l'hydrostratigraphie au niveau des cours d'eau est trop simplifiée pour permettre une quantification plus réaliste des échanges entre l'eau souterraine et les cours d'eau. Par ailleurs, il est important de souligner que la surestimation ou la sous-estimation des débits de base par le modèle d'écoulement souterrain est également le résultat de l'erreur dans la recharge calculée par HydroBudget.

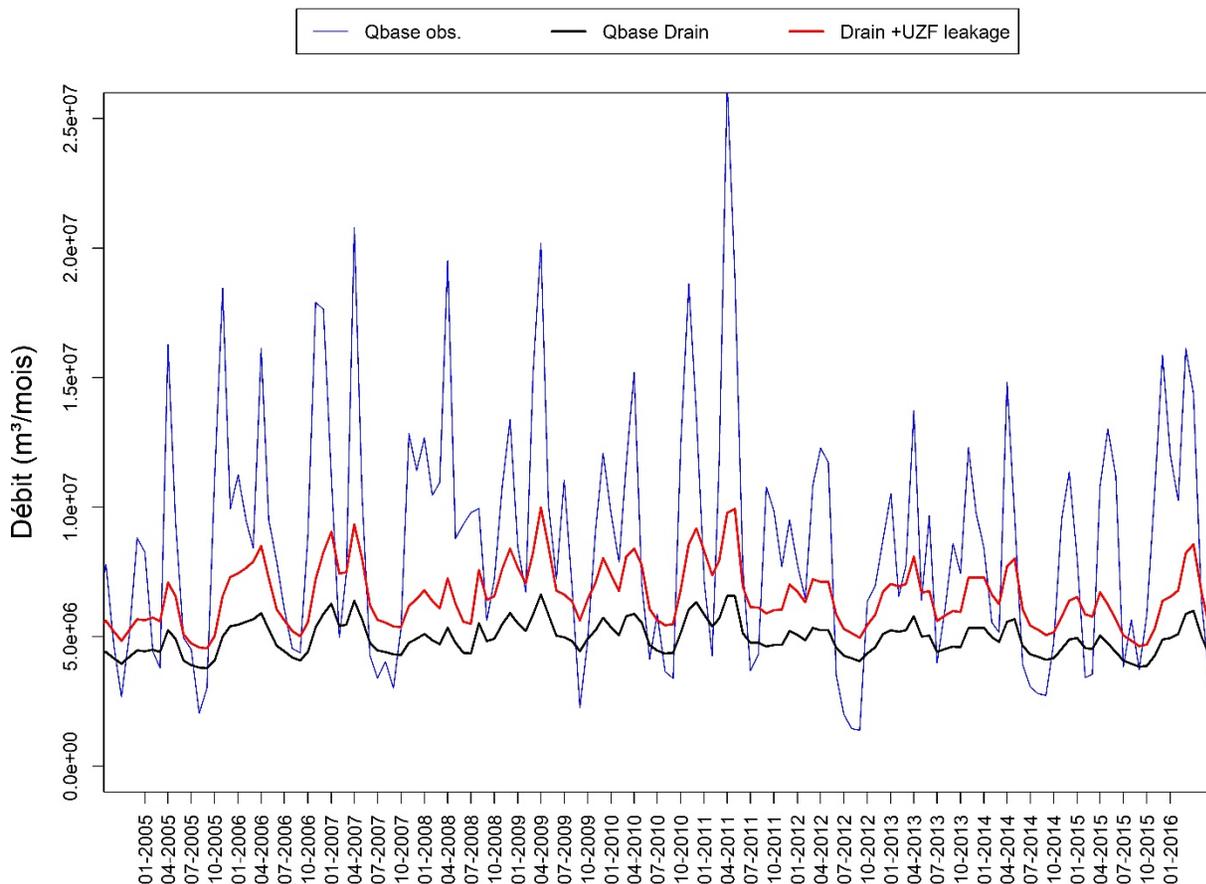


Figure 15: Débit de base simulé par MODFLOW et observé (Lyne & Hollick) pour la station 30101 (amont de la rivière Nicolet).

6.3 Simulé avec HGS

Le débit de base est explicitement simulé avec le modèle HGS sur la totalité de la région. L'eau en surface du modèle correspond à l'eau souterraine exfiltrée qui s'écoule ensuite selon le réseau hydrographique vers les principaux exutoires des bassins versants. L'eau exfiltrée en amont d'un bassin versant peut à tout moment retourner dans le domaine souterrain suivant le profil d'infiltration de la zone non saturée. Aux points d'intérêt que sont les exutoires des principaux bassins versants, l'ensemble du modèle hydrologique composé de 187 réalisations équiprobables a été exécuté en régime permanent. Les valeurs du débit de base au niveau de chaque exutoire des principaux bassins versants ont été récupérées et la moyenne ainsi que l'écart type (σ) de la distribution ont été calculés. L'incertitude à 95% correspond à environ 2σ . Étant donné que l'incertitude sur le débit de base a été calculée à partir de l'exécution en régime permanent du modèle, il est considéré que cette incertitude ne varie pas significativement dans le temps et qu'elle est indépendante des variations météorologiques ou climatiques. Plus la taille du bassin versant est importante, plus le débit de base moyen est élevé (**Tableau 7**). La part de l'incertitude (2σ) par rapport au débit de base moyen varie entre 5 et 33 % selon les bassins versants. La valeur la plus élevée est associée au bassin versant de la rivière du Chêne qui est le plus petit bassin versant pris en considération (813 km²). Ce résultat met en doute la fiabilité d'un modèle régional pour supporter des simulations à une échelle plus locale, c'est à dire pour des bassins versants de moins 1 000 km². Également, la part de l'incertitude au débit de base simulé pour le bassin versant de la rivière Richelieu est de l'ordre de 20%. Pour ces deux bassins versants (Richelieu et du Chêne), très peu d'observations du débit de base sont disponibles. Par conséquent, la contribution totale de l'incertitude du modèle sur le débit de base simulé pour ces deux bassins versants reste relativement importante.

Tableau 7 : Valeurs moyennes (simulation en régime permanent) et incertitude à 95% du débit de base simulé avec HGS à l'exutoire des principaux bassins versants.

Bassin versant	Débit de base moyen (m ³ .s ⁻¹) (mm/an)	Incertainude à 95%	Surface (km ²)	Part de l'incertainude par rapport au débit de base moyen
Chateauguay	16,64 (203)	1,38	2 588	8,3%
Richelieu	11,28 (136)	2,18	2 613	19,3%
Yamaska	40,62 (265)	2,28	4 832	5,6%
Saint-François	46,62 (142)	4,26	10 346	9,1%
Bécancour	35,66 (431)	2,24	2 607	6,3%
Nicolet	15,68 (144)	1,62	3 442	10,3%
Du Chêne	3,00 (39)	1,00	813	33,3%
Chaudière	41,56 (194)	2,98	6755	7,2%

7 RECHARGE SIMULÉE AUX PUIITS DU RSESQ

Cette section traite des données de recharge évaluées à diverses échelles et avec plusieurs modèles couvrant le sud du fleuve Saint-Laurent : (1) les projets antérieurs (PACES et projet Châteauguay), (2) le modèle HydroBudget (HB) de l'UQAM et (3) le modèle Modcou (MC) utilisé par l'Université Laval. Pour toutes ces sources, les valeurs de recharge moyenne ont été extraites directement au droit des 123 puits de suivi du RSESQ de la région d'étude (**Figure 16**). Comme la recharge observée au puits peut être représentative d'une zone plus large autour du puits, le comparatif a également été fait en faisant l'extraction des données puis en moyennant les valeurs de recharge extraites dans une zone de 1 x 1 km autour de chaque puits (**Figure 17**).

À noter que cette comparaison souffre de plusieurs limitations : (1) les modèles HydroBudget et Modcou fournissent les données de recharge potentielle tandis que les données des anciens projets indiquent des valeurs de recharge nette au roc, (2) les périodes de simulation sont variables au sein même des projets antérieurs d'où la différenciation par couleur sur les graphiques (**Figure 16 et Figure 17**), (3) c'est aussi le cas entre les modèles hormis pour un comparatif qui considère la même période de temps (1981-2010) (**Figure 16.d et Figure 17.d**).

Comme la carte de recharge nette n'a pas encore été produite pour le PACES Estrie, les valeurs n'ont pas pu être extraites pour 15 des 123 puits de la région d'étude. La recharge nette moyenne au roc pour les 108 puits considérés est de 83 mm/an et peut atteindre localement 322 mm/an. En considérant la période des normales climatiques (1981-2010), la recharge potentielle issue de HB est en moyenne de 130 mm/an et peut atteindre localement 366 mm/an. Sur la même période, les données de recharge potentielle extraites aux puits sont en moyenne de 189 mm/an et peuvent même atteindre 669 mm/an. Ces données sont également visibles sur la **Figure 16** où les diverses sources sont comparées, bien qu'il soit nécessaire de tenir compte des limitations évoquées plus haut. Globalement, la recharge potentielle est conforme, car supérieure à la recharge nette au roc extraite au droit des puits même en considérant des périodes de temps différentes (**Figure 16a, b et c**). Toutefois, ces graphiques mettent aussi en évidence la présence des quelques puits où la recharge potentielle est inférieure à la recharge nette au roc : 34% avec HB et 17 % avec MC. De même, sur la même période de temps (1981-2010), les données de recharge potentielle extraites au droit des puits sont dans 55% des cas plus élevées avec le modèle MC qu'avec modèle HB. De plus, MC simule aussi plus de valeurs extrêmes (**Figure 16.d**).

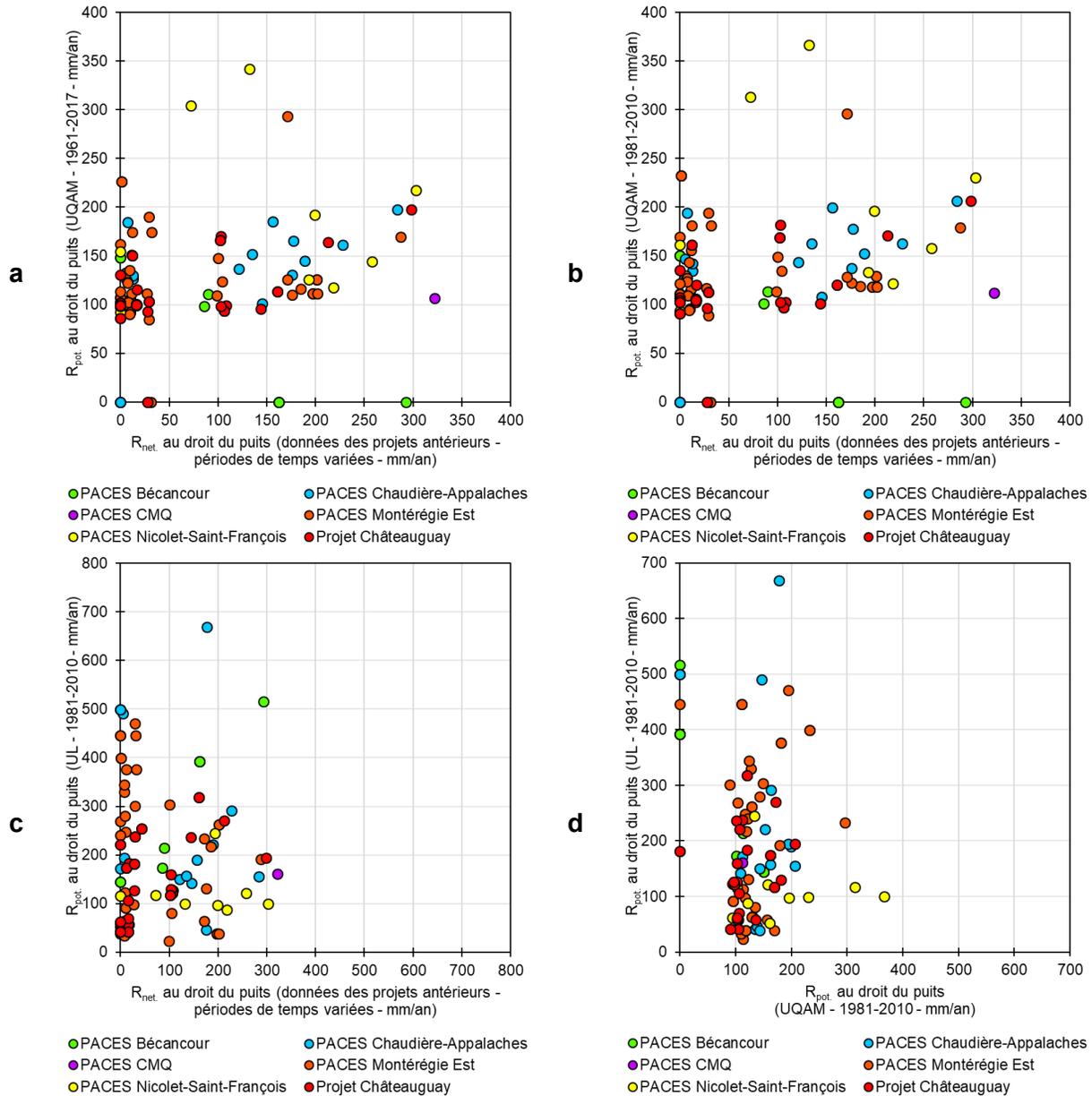


Figure 16: Valeurs de recharge extraites au droit des puits : (a) recharge potentielle HB (1961-2017) vs recharge nette, (b) recharge potentielle HB (1981-2010) vs recharge nette, (c) recharge potentielle MC (1981-2010) vs recharge nette et (d) recharge potentielle MC (1981-2010) vs recharge potentielle HB (1981-2010) – La source des données de recharge nette est aussi indiquée sur les graphiques.

En considérant l’environnement proche des puits, la recharge nette de l’aquifère rocheux est en moyenne de 80 mm/an. Quant aux données de recharge potentielle extraites autour des puits, la valeur moyenne est de 130 mm/an pour un minimum de 57 mm/an et un maximum de 299 mm/an avec HB tandis qu’avec MC la gamme de valeurs prises s’étend de 23 à 640 mm/an pour une moyenne de 191 mm/an.

De la même façon qu’au droit du puits, la recharge potentielle est généralement supérieure à la recharge nette au roc autour des puits : 81% avec HB et 83% avec MC (**Figure 16a, b et c**). En comparant les deux modèles simulant la recharge potentielle sur la période des normales climatiques (1981-2010), MC simule des recharges plus importantes dans 58% des cas par rapport à HB.

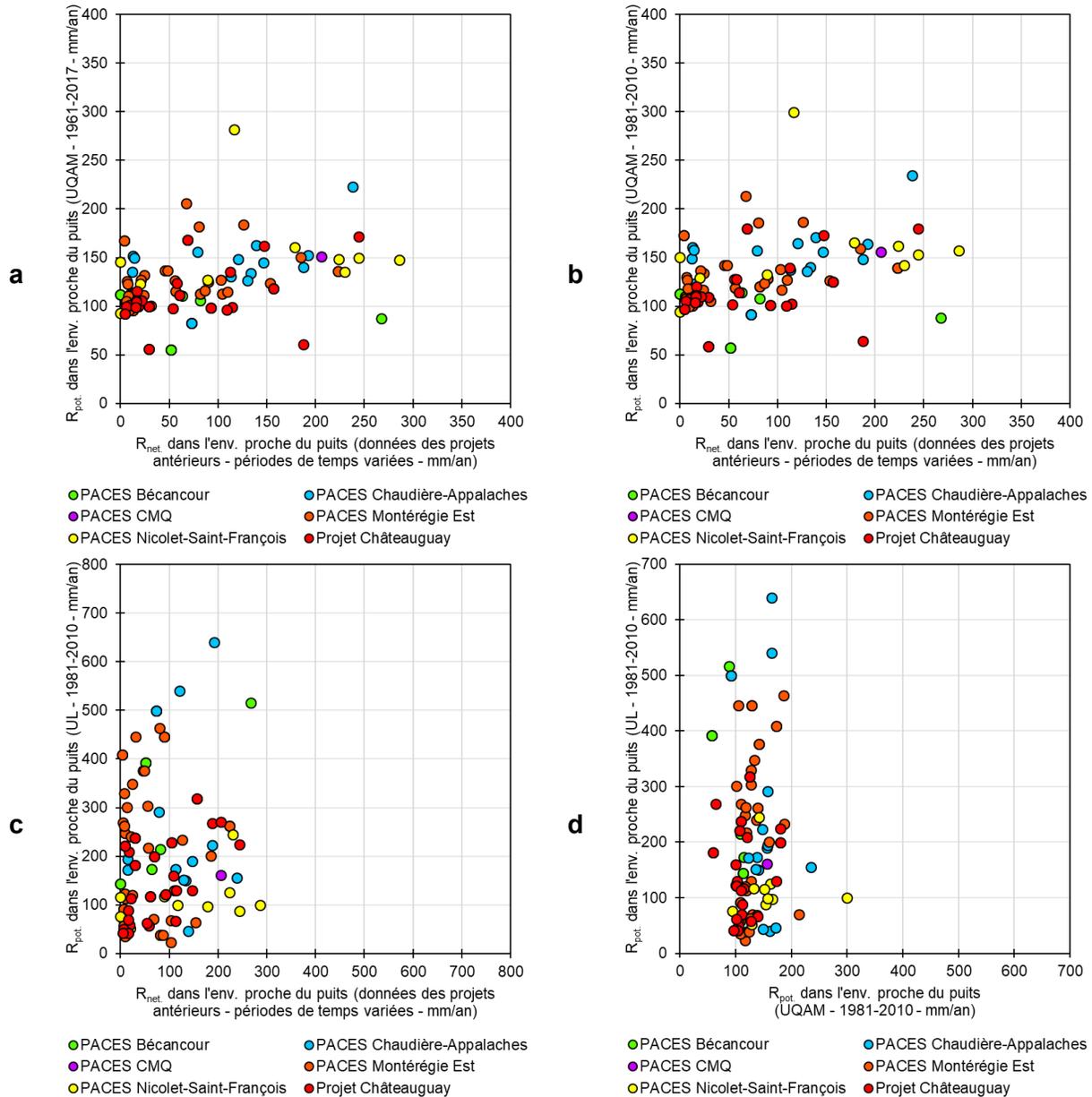
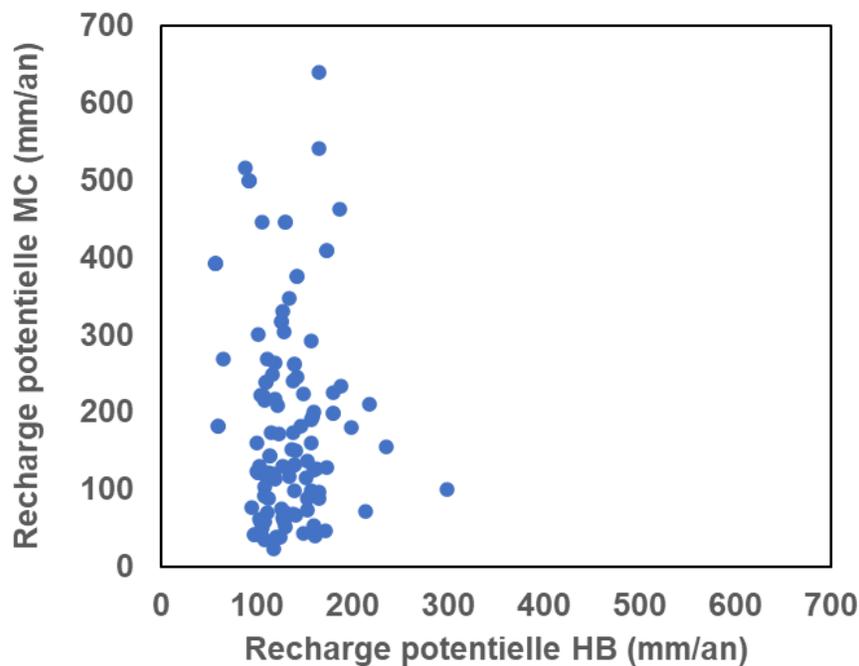


Figure 17: Valeurs de recharge extraites dans l’environnement proche des puits : (a) recharge potentielle HB (1961-2017) vs recharge nette, (b) recharge potentielle HB (1981-2010) vs recharge nette, (c) recharge potentielle MC (1981-2010) vs recharge nette et (d) recharge potentielle MC (1981-2010) vs recharge potentielle HB (1981-2010) – La source des données de recharge nette est aussi indiquée sur les graphes.

Finalement, en comparant ces deux types d'extraction (au droit du puits et dans l'environnement proche des puits), les constats sont similaires : (1) généralement, la recharge nette au roc est toujours inférieure à la recharge potentielle, ce qui suit la logique du système hydrogéologique ; (2) le modèle MC génère des valeurs de recharge potentielle plus importantes que le modèle HB et ce, en considérant la même période de temps ; et finalement (3) le modèle MC simule aussi les valeurs de recharge les plus extrêmes.

Les valeurs de recharge potentielle simulée par les deux modèles (HB et MC) ont été extraites pour les puits du RSESQ présents sur la zone d'étude. Les valeurs de la maille du modèle correspondant à la localisation du puits ont été utilisées. Les résultats montrent une différence importante entre les deux modèles. La recharge au puits varie de 57 mm/an à 300 mm/an pour le modèle HB et de 35 mm/an à 640 mm/an pour le modèle MC.



La différence de variabilité de la recharge potentielle entre les deux modèles est aussi observée à l'échelle des bassins versants (**Tableau 6**). Les différences observées à l'échelle des puits proviennent donc, d'une part, de la méthode de calibration (uniforme vs spatialisée) et d'autre part, de la répartition différente dans le bilan hydrologique des flux de surface (ruissellement et ETR) entre les deux modèles.

8 MODÉLISATION

8.1 Avantages et inconvénients de HGS et de Modflow

Le principal avantage d'un modèle intégré comme HGS est de prendre en compte une simulation explicite des flux entre la surface et le milieu souterrain dans un contexte où la simulation des débits de base est importante. Aussi, dans une approche totalement couplée (comme appliquée sur le bassin versant de la Yamaska), le développement d'un modèle comme HGS est relativement facilité, car il ne demande seulement que l'utilisation des précipitations totales ainsi que des températures. C'est donc une plateforme de modélisation qui est facilement envisageable sur une grande superficie. Le principal inconvénient est lié au temps de calcul. Néanmoins, il a été montré dans ce projet que HGS peut être facilement couplé à des approches plus simplifiées afin de réduire ces temps de calcul. Le nombre de paramètres n'est pas forcément plus important que dans un modèle souterrain, mais dépend plutôt des objectifs de modélisation. Par exemple, si un des objectifs principaux est de bien quantifier les incertitudes sur les simulations du modèle, il sera dans nécessaire d'augmenter le nombre de paramètres afin d'en faciliter la quantification. Le nombre de paramètres est donc indépendant du type de modèle. Dans le cas de HGS, la totalité des paramètres a un sens physique. Il est donc généralement possible d'obtenir une bonne estimation de ces paramètres sans même avoir recours à un calage excessif du modèle, ce qui est plutôt intéressant pour des régions pauvres en observation.

Le principal avantage de MODFLOW est lié au temps de calcul. En effet, dans la version utilisée dans ce projet, il n'a pas été couplé avec un modèle de surface. MODFLOW en version souterrain est une approche de modélisation qui est beaucoup plus répandue et dont le personnel potentiellement qualifié pour utiliser ce type de modèle est plus fréquent que pour HGS. Bien qu'utilisé dans une version souterraine seulement, MODFLOW peut également être couplé à des modules de surface afin de disposer d'un modèle couplé surface et souterrain. Le couplage entre la surface et le souterrain sera néanmoins toujours dépendant d'un paramètre de conductance qui peut induire des impacts significatifs sur les simulations.

8.2 Échelles

- HGS à l'échelle du PACC vs HGS à l'échelle du bassin Yamaska

Le développement de HGS sur deux échelles différentes a permis de démontrer la capacité d'un modèle intégré surface et souterrain à être utilisé sur ces deux échelles. HGS à l'échelle du PACC a été orienté vers la simulation des flux d'infiltrations afin de réduire les temps de calcul. Ainsi, HGS à l'échelle du PACC a bénéficié d'une approche rigoureuse pour le calage et l'estimation des incertitudes. Ce modèle peut être utilisé pour la simulation des débits en rivières qui sont liés aux flux d'infiltration. La résolution numérique de HGS à l'échelle PACC ne permet pas de simuler correctement les tributaires des grandes rivières. Les simulations produites avec ce modèle (p.ex., les débits de base) sont donc intégratrices sur l'ensemble des bassins versants. Lorsqu'une analyse plus détaillée est nécessaire, il sera recommandé d'utiliser un modèle à l'échelle du bassin versant telle que celui développé sur le bassin versant de la rivière Yamaska. Une approche « emboîtée » de gestion et modélisation hydrodynamique est donc recommandée.

- HGS à l'échelle du PACC vs MODFLOW à l'échelle du Centre-du-Québec

HGS à l'échelle du PACC permet de fournir un état d'ensemble du bilan hydrique surface et souterrain sur un grand territoire. MODFLOW Centre-du-Québec est un modèle plus localisé qui permet par conséquent d'obtenir des simulations plus détaillées et représentatives d'une échelle plus fine. Les charges hydrauliques de HGS à l'échelle du PACC pourraient très bien être intégrées dans le modèle MODFLOW Centre-du-Québec dans une approche de modélisation « emboîtée ».

8.3 Paramètres hydrogéologiques

Les deux modèles d'écoulement de l'eau souterraine calibrés dans le cadre de ce projet permettent d'obtenir des valeurs de paramètres hydrogéologiques à l'échelle régionale, ce qu'il n'est pas possible d'obtenir lors des essais hydrauliques. Ces paramètres donnent de l'information sur le potentiel de stockage d'eau souterraine à grande échelle et aussi sur la dynamique hydrogéologique des grands systèmes aquifères du sud du Québec. Les valeurs des deux modèles sont présentées au **Tableau 8** et au **Tableau 9**. Les valeurs de conductivité hydraulique des dépôts meubles sont très différentes d'un modèle à l'autre, mais diminuent de la même manière entre les sables et les matériaux plus silteux ou argileux. On observe une baisse de trois ordres de grandeur entre le sable et l'argile pour le modèle MODFLOW et de cinq ordres de

grandeur pour le modèle HGS. Les valeurs pour les matériaux argileux sont semblables (0,1 m/j vs 0,086 m/j), tandis que pour les dépôts sableux, elles sont très différentes (10 m/j vs 380 m/j).

Tableau 8: Paramètres hydrogéologiques calibrés du modèle MODFLOW pour la zone du Centre-du-Québec

Unité hydrogéologique	K_h (m/d)	Anisotropie verticale	S_s (m^{-1})	S_y (-)
Sable	10,0	1	5×10^{-5}	0,10
Sable et silt	3,0	1	5×10^{-5}	0,05
Silt et argile	0,1	1	1×10^{-5}	0,01
Roc (min - max)	$1 \times 10^{-4} - 1$	1	$5 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-6}$	0,1 – 0,01

Tableau 9: Paramètres hydrogéologiques calibrés du modèle HGS pour la zone d'étude

Unité hydrogéologique	K_h (m/d)	Anisotropie verticale	S_s (m^{-1})	S_y
Sable	380,160	1	$1,13 \times 10^{-3}$	0,08
Argile	0,086	1	0,01	0,02
Till	56,070	1	$6,26 \times 10^{-5}$	0,06
Roc (min-max)	$8,65 \times 10^{-5} - 55,7$	1	$3,17 \times 10^{-4}$	0,05

Tableau 10: Paramètres hydrogéologiques calibrés du modèle HGS pour le BV de la Yamaska

Unité hydrogéologique	K_h (m/d)	Anisotropie verticale	S_s (m^{-1})	S_y
Sable	56,330	1	$1,14 \times 10^{-3}$	0,050
Argile	0,086	1	0,01	0,020
Till	35,330	1	$6,26 \times 10^{-5}$	0,050
Roc (min-max)		1	$6,97 \times 10^{-5}$	0,027

9 IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Les données climatiques de températures et de précipitations issues de 12 scénarios climatiques sélectionnés à partir des 54 scénarios utilisés dans l'Atlas hydroclimatique du Québec ont été utilisées comme donnée d'entrée dans les modèles calibrés MC-HGS et HB. Les résultats présentés dans cette section montrent les comparaisons possibles entre les modèles. Par exemple, il n'était pas possible de comparer les changements de débit de base issus de modèles souterrains, car le modèle MODFLOW couvre seulement la zone du Centre-du-Québec.

9.1 Recharge

La comparaison des changements mensuels de la recharge sur toute la zone d'étude se fait à partir du modèle HB et du modèle HGS alimenté par MC. Dans les deux cas, les deltas moyens issus des 12 scénarios sont présentés. Les deltas sont obtenus en comparant la moyenne de la période de référence (1981-2010) et la valeur moyenne de la période future (2041-2070 ou 2071-2100).

Les deux modèles montrent une augmentation de la recharge durant les mois hivernaux, et ce pour les deux périodes (**Figure 18** et **Figure 19**). Le modèle MC-HGS indique des changements plus importants pour la période 2041-2070 tandis que le modèle HB indique des changements plus importants pour la période 2071-2100. Cette hausse de la recharge future est principalement causée par le réchauffement de la température de l'air qui approche ou dépasse le point de congélation augmentant ainsi les précipitations liquides au détriment de la neige. Cette augmentation des précipitations liquides n'est pas accompagnée par une hausse de l'ETR puisque la hausse des températures n'est pas suffisante pour générer des taux d'ETR important. La diminution du stock de neige causé par ce phénomène cause ensuite des deltas négatifs de la recharge durant le printemps. La répartition des précipitations durant l'hiver entraînera donc des changements importants durant les mois d'avril et mai. Pour le modèle HB cependant, les changements perdurent jusqu'en juin pour les deux périodes futures. Pour la période estivale, les modèles divergent, mais les valeurs de delta sont faibles pour les deux modèles. Finalement, pour l'automne, le modèle HB indique des deltas négatifs tandis que le modèle MC-HGS indique des valeurs positives à nulles.

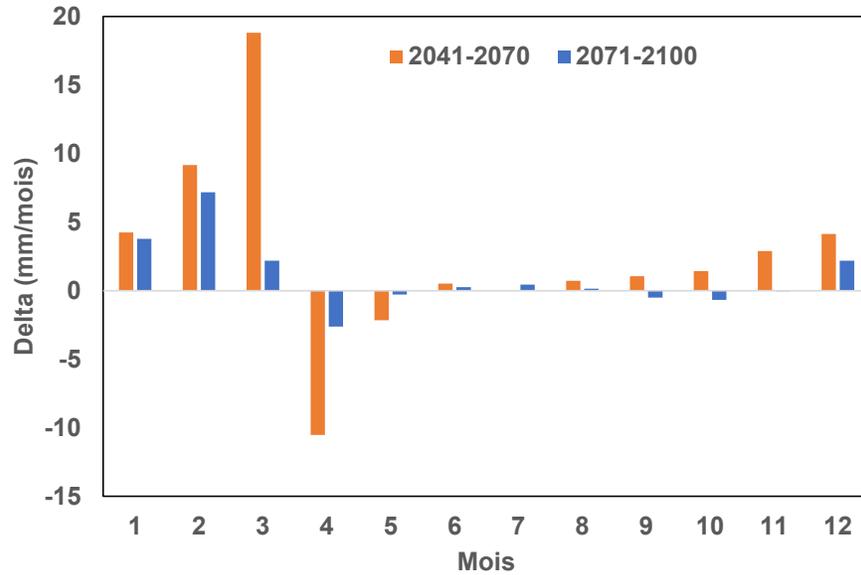


Figure 18: Delta de la recharge mensuelle simulée par le modèle MC-HGS sur toute la zone d'étude pour les 12 scénarios climatiques. Le delta correspond à la différence entre la période future et la période de référence (1981-2010).

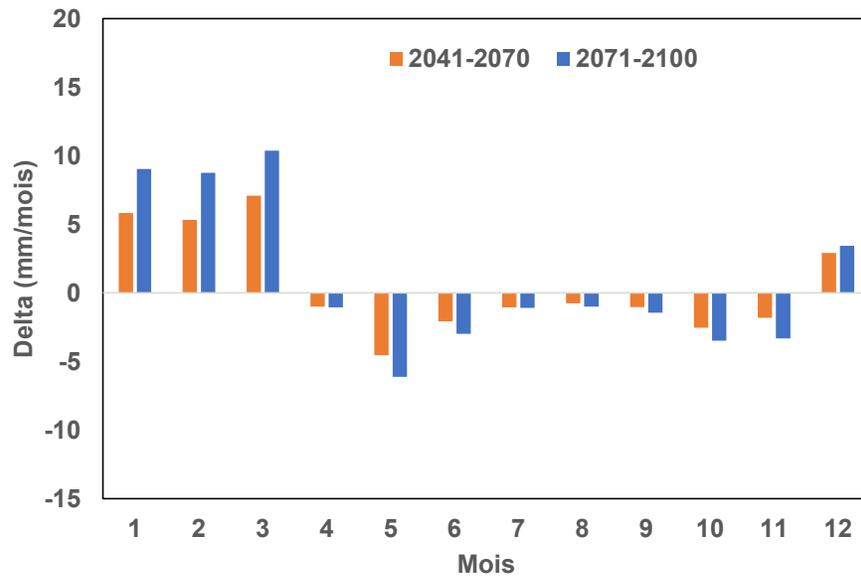


Figure 19 : Delta de la recharge mensuelle simulée par le modèle HB sur toute la zone d'étude pour les 12 scénarios climatiques. Le delta correspond à la différence entre la période future et la période de référence (1981-2010).

9.2 Débits de base

Les résultats de la simulation des débits de base par les deux modèles d'écoulement souterrain indiquent que des changements importants pourraient avoir lieu durant l'hiver et le printemps. En effet, les deux modèles indiquent une hausse du débit de base pour les mois de décembre à mars (**Figure 20, Figure 21**, bassin versant de la Bécancour) pour les deux périodes futures comparativement à la période de référence (1981-2010). Le changement est très marqué pour le mois de mars pour le modèle HGS (delta de +30 mm/mois) pour la période 2041-2070 et moins marqué pour le modèle HB (delta de + 2 mm/mois). Au niveau des périodes d'étiages, HGS indique une augmentation potentielle du débit de base tandis que HB une baisse potentielle. Pour les deux modèles, ces changements sont toutefois faibles. HGS prévoit aussi une augmentation du débit de base pour l'automne tandis que HB prévoit une baisse.

Pour les deux modèles, les changements importants de recharge qui sont prévus au printemps ne semblent pas avoir d'effet à long terme. Pour la période 2041-2070, les deux modèles de recharge prévoient un delta de recharge très positif (HGS : + 19mm/mois, HB + 7mm/mois) au mois de mars et un delta négatif au mois d'avril (HGS : -10 mm/mois, HB : -1 mm/mois) et mai (HGS : -2 mm/mois, HB : -4,5 mm/mois). Ce déficit important de recharge ne se traduit pas dans un déficit important de débit de base durant les mois d'avril et mai montrant ainsi l'effet de l'emmagasinement de l'eau souterraine et son rôle tampon, qui ne semble pas durer pour plus de deux mois.

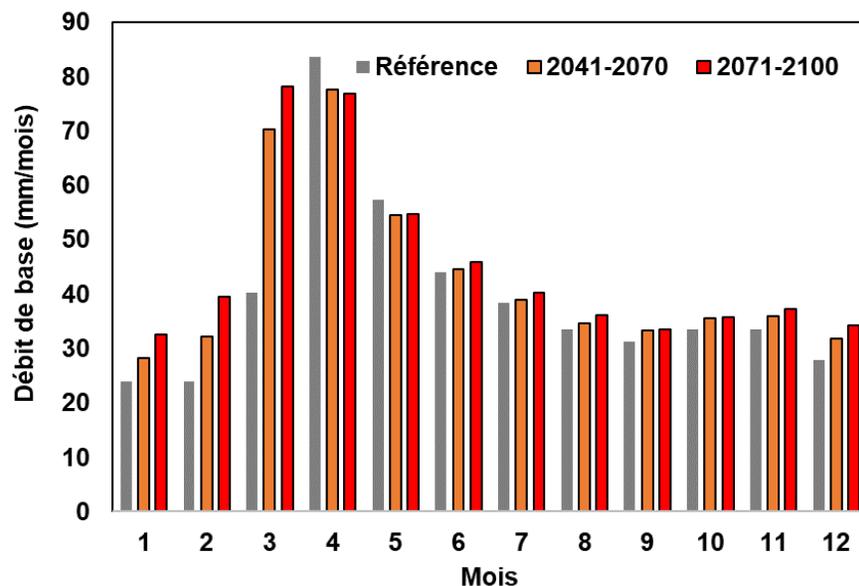


Figure 20 : Débits de base mensuels moyens (12 scénarios) simulée par le modèle HGS pour le bassin versant de la rivière Bécancour.

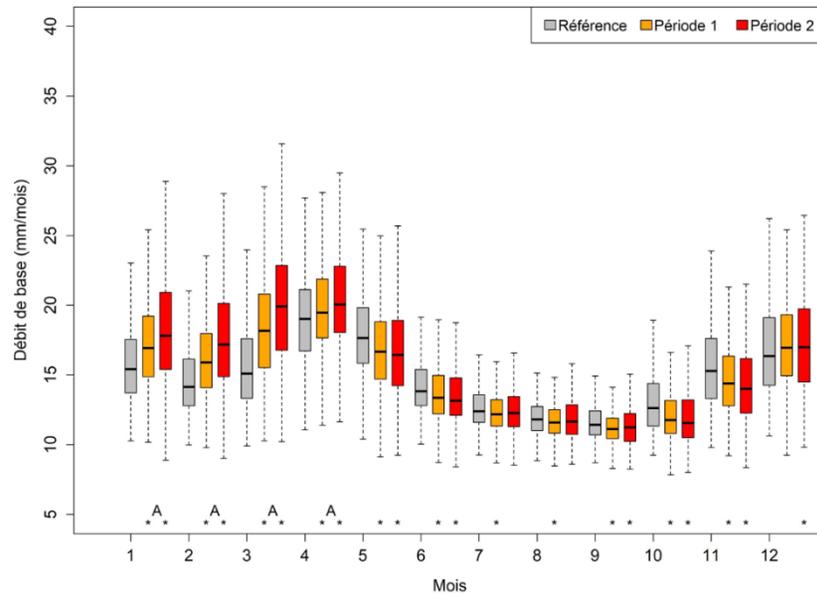


Figure 21: Débits de base mensuels simulés par MODFLOW selon les 12 scénarios climatiques pour le BV de la rivière Bécancour. L’astérisque indique que la valeur médiane pour cette période est significativement différente de la période référence et la lettre « A » indique que les deux périodes futures sont significativement différentes l’une de l’autre.

10 DÉVELOPPEMENT ET OPÉRATION DU RSESQ

10.1 Ajustements dans le réseau

Suite à une évaluation détaillée des conditions des puits du RSESQ dans la zone d'étude, certains puits se sont révélés avoir des conditions qui rendent difficile l'interprétation des mesures de niveau d'eau : installation non conventionnelle, scellement incertain, niveau d'eau variant dans des matériaux différents (notamment entre le roc et les dépôts granulaires), conditions locales affectant les niveaux d'eau (étangs qui pourraient fuir ou zone de recharge locale), pompages importants, notamment pour des applications saisonnières. Malgré ces conditions difficiles, nous ne recommandons toutefois pas de retirer ces stations du réseau à court terme, mais plutôt de bien évaluer d'abord s'il est possible de faire une certaine exploitation des données de ces puits. Il serait tout de même souhaitable que ces conditions particulières soient documentées et indiquées aux usagers des données du RSESQ.

10.2 Développement du réseau

Le tableau 11 résume les fonctions actuelles ainsi que les fonctions futures envisageables du RSESQ (Gosselin et al., 2020). Plus de détails sont donnés dans Gosselin et al. (2020), mais nous pouvons résumer ici les éléments principaux du tableau 11. Les projets de l'INRS et de l'UQAM ont d'abord montré que dans la zone d'étude le RSESQ peut assumer sa fonction première de suivi des niveaux d'eau souterraine en relation avec les variations climatiques, et devrait donc à plus long terme permettre de définir l'effet des changements climatiques. Dans la zone d'étude les puits du RSESQ représentent diverses conditions de confinement, mais ils sont en majorité crépinés dans les dépôts meubles (ou le niveau piézométrique varie dans les dépôts meubles). À moyen ou long terme, il serait donc souhaitable que de nouveaux puits du RSESQ soient implantés pour assurer la représentativité statistique des stations (roc vs granulaire ; niveau de confinement ; position relative dans les bassins ; proximité cours d'eau et milieux humides). Les éventuels nouveaux puits devraient aussi assurer une couverture adéquate de tous les bassins versants et secteurs hydroclimatiques (trois secteurs mal représentés ont été identifiés ; voir section 4.1). Pour l'implantation d'éventuels nouveaux puits, il faudra considérer aussi les aspects suivants : accessibilité du site, terrain municipal à prioriser (voir PACES Estrie) avec entente signée pour le suivi à long terme, profondeur suffisante pour assurer un enregistrement des battements de nappe, considérer aussi l'objectif (puits double niveaux, localisation dans des zones sous stress ou encore suivi de nappe pour la production du bulletin).

Le tableau 11 montre aussi que les projets réalisés par l'UQAM et l'INRS ont ajouté de nouvelles applications aux données du RSESQ, soit de définir les conditions de confinement avec la BRF, de mieux identifier les puits influencés par des effets anthropiques par la BRF, d'estimer la recharge avec GWHAT et d'évaluer la tendance des niveaux piézométriques. Tel qu'indiqué dans les recommandations, ces applications devraient être faites pour tous les puits du RSESQ en dehors de la zone d'étude. Enfin, le MELCC devrait poursuivre une réflexion par rapport à l'utilisation du RSESQ pour d'autres applications potentielles qui sont indiquées au **Tableau 11**. Ces applications exigent toutefois une certaine adaptation des puits du RSESQ, mais elles pourraient être faites uniquement dans des secteurs ciblés où des problématiques particulières exigent un suivi spécifique.

Tableau 11: Fonctions actuelles et futures du RSESQ

État des applications	Applications	Adaptation du réseau
Application actuelle	<ul style="list-style-type: none"> • Suivi de la variation des niveaux d'eau souterraine sous l'effet des conditions climatiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Réseau actuel adapté à cette application
Nouvelles applications (projets PACC)	<ul style="list-style-type: none"> • Conditions de confinement du puits de suivi (BRF) • Identification des puits influencés par des activités anthropiques (BRF) • Estimation de la recharge pour les puits en condition libre (GWHAT) • Tendances des niveaux d'eau et réactivité des aquifères (UQAM) 	<ul style="list-style-type: none"> • Mesures à haute fréquence (déjà faites sur les puits) • Exige l'évaluation de la BRF sur tous les nouveaux puits ajoutés au réseau • Privilégier les puits en condition libre pour évaluer la recharge • Couverture spatiale complète du territoire (c'est déjà le cas)
Applications futures potentielles	<ul style="list-style-type: none"> • Suivi de nappe dans les secteurs soumis à des prélèvements importants • Prédiction des étiages des cours d'eau • Relations entre nappes et cours d'eau ou milieux humides et apport d'eau souterraine • Évolution de la qualité de l'eau souterraine de secteurs sous fortes pressions anthropiques • Support au développement, au calage et à la validation de modèles numériques 	<ul style="list-style-type: none"> • Implantation de puits dans des secteurs à fort pompage ou intégrer des puits de suivi au réseau • Il faut déterminer les conditions les mieux reliées aux étiages • Il faut des nids de puits pour estimer la variation des gradients hydrauliques et des flux • Puits en aval de secteurs avec des activités affectant la qualité de l'eau souterraine • Conditions représentatives à plus grande échelle (pas uniquement locales)

10.3 Opération du réseau

- Poursuivre l'opération du RSESQ à long terme. La majorité des stations du RSESQ n'ont que 10 années de mesures et la valeur des données acquises sera de plus en plus importante à mesure que de plus longues chroniques de mesures seront disponibles.
- Pour les puits où cela n'a pas été fait ou pour les nouveaux puits du RSESQ, réaliser un suivi horaire pour 1 année dans le but d'identifier l'efficacité barométrique à utiliser pour traiter les données de chaque station.
- Reprendre l'ensemble des protocoles pour l'analyse des séries temporelles chaque fois qu'une nouvelle année de données est disponible.
- Tester l'usage de la télémétrie pour permettre l'obtention rapide des mesures, particulièrement pour les puits considérés pour le développement des indicateurs et la mise à jour biennuel d'un bulletin d'état des nappes.

11 RECOMMANDATIONS POUR TRAVAUX FUTURS

11.1 Appliquer les approches de l'INRS et de l'UQAM à l'échelle de tout le Québec

1. Définir les secteurs hydroclimatiques sur tout le territoire municipalisé du Québec
2. Modéliser la recharge avec HydroBudget sur tout le territoire (déjà fait au sud du fleuve, dans le PACES KRT, dans le PACES Laurentides et les Moulins)
3. Analyser les séries temporelles du RSESQ sur tout le territoire
4. Appliquer la BRF pour identifier le niveau de confinement et les effets anthropiques
5. Estimer la recharge aux puits avec GWHAT et définir les paramètres hydrologiques pour les puits dont les conditions le permettent

11.2 Modélisation en continu des écoulements souterrains sur les principaux bassins versants du Québec

- Il est envisageable de développer des modèles numériques à l'échelle régionale pour les principaux bassins versants du Québec. Ces modèles pourraient être utilisés en mode opérationnel pour simuler la dynamique des écoulements souterrains et les débits de base, à une fréquence variable, par exemple annuelle, mensuelle, ou saisonnière. Ces résultats de simulations pourraient contribuer à la gestion de la ressource et justifier ainsi le maintien et l'amélioration continue de ces modèles. Leur complexité pourrait être définie en fonction des objectifs de simulation.

11.3 Prédiction des étiages

- Étudier le potentiel des outils développés pour la prédiction des étiages (puits du RSESQ, modèles intégrés, modèles d'écoulement souterrain).
- Inclure la prédiction des étiages par modélisation des écoulements souterrains dans l'Atlas hydroclimatique
- Utiliser au moins deux méthodes pour l'estimation des étiages pour l'ensemble des stations débitmétriques de la DEH et rendre accessibles les paramètres de ces stations
- Poursuivre la recherche pour développer des méthodes d'estimation des étiages complémentaires à celles basées sur les filtres récursifs.

12 CONCLUSION

Les trois projets ainsi que la mise en commun des résultats a permis de générer à la fois des avancées scientifiques importantes et des retombées pratiques. Les nouvelles connaissances acquises par le projet apportent des nouvelles connaissances qui contribueront à former les assises du rapport quinquennal du MELCC sur l'état des ressources en eau souterraine au Québec.

Les projets apportent au MELCC des outils très concrets qui lui permettront de comprendre et gérer les ressources en eau souterraine: bases de données dynamiques et évolutives, indicateurs des conditions des aquifères facilitant le transfert de connaissances aux partenaires régionaux faisant la gestion des ressources (OBV et MRC), modèle simple pour l'estimation régionalisée de la recharge, modèles couplés surface-souterrain, capacités de prédire les effets des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine, recommandations pour le développement du RSESQ, lignes directrices pour l'interprétation annuelle des résultats. Ces outils permettront au Ministère de poser des diagnostics sur l'état des ressources en eau souterraine, mais aussi de prédire leur évolution future. Les nouvelles connaissances produites par les trois projets serviront d'assise à la gestion des ressources en eau souterraine aux échelles locale, régionale et nationale. Des activités de transfert réalisées par le Réseau québécois sur les eaux souterraines (RQES) et d'autres initiatives doivent aussi être réalisées pour permettre le développement d'une telle gestion.

13 RÉFÉRENCES

Bergeron, O. (2016). Guide d'utilisation 2016 - Grilles climatiques quotidiennes du Programme de surveillance du climat du Québec, version 2, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction du suivi de l'état de l'environnement, Québec (Canada).

Carrier, M.A., Lefebvre, R., Rivard, C., Parent, M., Ballard, J.-M., Benoît, N., Vigneault, H., Beaudry, C., Malet, X., Laurencelle, M., Gosselin, J.-S., Ladevèze, P., Thériault, R., Beaudin, I., Michaud, A., Pugin, A., Morin, R., Crow, H., Gloaguen, E., Bleser, J., Martin, A., Lavoie, D. (2013). Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES) en Montérégie Est - 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. (No. Research Report R-1433). Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau Terre Environnement, Quebec City, Quebec, Canada.

Direction de l'expertise hydrique (DEH). (2021). Atlas Hydroclimatique Du Québec Méridional (Hydroclimatic Atlas of Southern Quebec) Available online: <https://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/Hydraulicite/Qmoy.htm>.

Delottier, H., Therrien, R., Young, N.L., Paradis, D. (2021). A Hybrid Approach for Integrated Surface and Subsurface Hydrologic Simulation of Baseflow with Iterative Ensemble Smoother, soumis, *Journal of Hydrology*.

Dubois, E., Larocque, M., Gagné, S., Meyzonnat, G. (2021). HydroBudget User Guide – version 1.0. Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec (Canada). 30 p.

Dubois, E., Larocque, M., Gagné, S., Meyzonnat, G. (2021). Simulating long-term spatiotemporal variations in regional-scale groundwater recharge: Contributions of a water budget approach in southern Quebec. En révision *Hydrology and Earth System Sciences*.

Dubois, E., Larocque, M., Gagné, S., Braun, M. (2021). Climate change impacts on groundwater recharge in cold and humid climates: controlling processes and thresholds. Soumis *Climate*.

Eckhardt K. 2005. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes*, 19(2), 507515.

Gagné, S., Larocque, M., Pinti, D. L., Saby, M., Meyzonnat, G. et Méjean, P. (2018). Benefits and limitations of using isotope-derived groundwater travel times and major ion chemistry to validate a regional groundwater flow model: example from the Centre-du-Québec region, Canada. *Canadian Water Resources Journal*, 43(2), 195213. doi: 10.1080/07011784.2017.1394801

Gosselin, J.-S., Lefebvre, R., Vigneault, H., Huchet, F. et Raynauld, M. (2020). Rapport final – Développement de méthodologies d'analyse des données du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ). Rapport de recherche R1942, soumis au Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) en décembre 2020.

Gosselin, J.-S., Huchet, F., 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.

Larocque, M., Pharand, M.-C. (2010). Dynamique de l'écoulement souterrain et vulnérabilité d'un aquifère du piémont appalachien (Québec, Canada). *Revue des sciences de l'eau* 23(1) :73-88.

Ladson, A. R., Brown, R., Neal, B., Nathan, R. (2013). A Standard approach to baseflow separation using the Lyne and Hollick filter. *Australasian Journal of Water Resources*, 17(1), 2534. doi: 10.7158/13241583.2013.11465417.

Larocque, M., Gagné, S., Dubois, E., Vu, T.A. 2021. Recharge des aquifères et contribution des eaux souterraines aux débits de base des cours d'eau - conditions passées, actuelles et futures en présence de changements climatiques – Rapport final. Rapport déposé au Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec. 155 p.

Ledoux, E., Girard, G., Villeneuve, J.-P. (1984). Proposition d'un modèle couplé pour la simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. *La houille blanche*, EDP Sciences, 1-2, 101-120

Nastev, M., Parent, M., Ross, M., Howlett, D., Benoit, N. (2016). Geospatial modelling of shear-wave velocity and fundamental site period of Quaternary marine and glacial sediments in the Ottawa and St. Lawrence Valleys, Canada. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 85, 103-116.

Partington, D., et al. (2012). Evaluation of outputs from automated baseflow separation methods against simulated baseflow from a physically based, surface water-groundwater flow model. *Journal of Hydrology*, 458-459: 28-39.

Therrien, R., Delottier, H., Paradis, D. (2021). Simulation de l'impact des variations climatiques sur les eaux souterraines et les eaux de surface : contribution au développement d'outils de gestion de l'eau- Rapport final. Rapport déposé au Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. Université Laval, Québec, Québec. 71 p.

Thornton, P. E., Running, S. W., White, M. A. (1997). Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain, *Journal of Hydrology*, vol. 190, Issues 3-4, pp. 214–251.