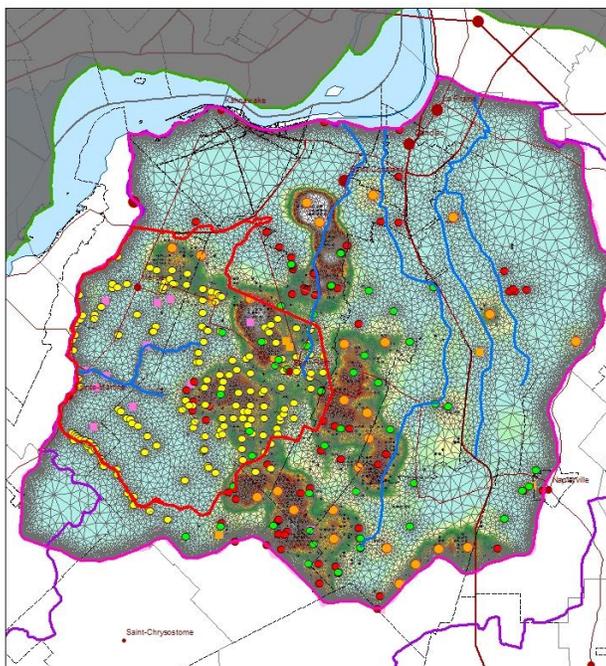


RAPPORT FINAL

Modélisation numérique régionale des conditions actuelles
et en climat futur des ressources en eau souterraine
dans la région des anciennes lagunes de Mercier

Jean-Marc Ballard, François Huchet
et René Lefebvre



Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau Terre Environnement

Rapport de recherche R2120
Juillet 2022

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2022
Tous droits réservés

ISBN : 978-2-925559-02-3 (version numérique)

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

RÉSUMÉ

Le présent rapport constitue la version finale de la documentation des travaux réalisés dans le cadre du mandat que le MELCC a donné à l'INRS pour la « Modélisation numérique régionale des conditions actuelles et en climat futur des ressources en eau souterraine dans la région des anciennes lagunes de Mercier ». Les travaux ont été réalisés entre décembre 2021 et juin 2022 en quatre étapes : (1) révision du modèle géologique régional ; (2) développement du modèle numérique d'écoulement régional ; (3) estimation (HELP) de la recharge actuelle et en climat futur ; et (4) application du modèle numérique à l'exploitation de l'aquifère régional.

C'est l'aquifère rocheux fracturé régional qui est exploité pour l'approvisionnement en eau souterraine dans la région d'étude. Une nouvelle carte piézométrique représentant le niveau de l'eau souterraine dans l'aquifère rocheux a été produite. Au centre de la région d'étude, on retrouve un dôme piézométrique à environ 60 m/NMM à partir duquel l'écoulement se fait radialement jusqu'à l'émergence aux cours d'eau.

Les dépôts meubles sur le roc exercent un important contrôle sur la recharge de l'aquifère rocheux. De la base au sommet, la séquence de dépôts meubles est composée de till peu perméable, d'argile marine très peu perméable et d'alluvions. Localement, des sédiments fluvio-glaciaires, tel l'esker de Mercier, érodent le till et sont partiellement recouverts par l'argile. Un nouveau modèle géologique a été développé pour définir la distribution spatiale des unités de dépôts meubles. Ce modèle a servi de base au modèle numérique d'écoulement régional. Des conditions confinées sont présentes surtout dans la partie aval du système d'écoulement, où la topographie est plus basse et où il y a des accumulations d'argile plus épaisses. Les conditions semi-confinées sont présentes surtout aux endroits où le till est présent. L'eau souterraine est évacuée de l'aquifère par des parties de l'aquifère rocheux en contact avec les cours d'eau. Les secteurs où il n'y a pas ou peu de sédiments sur le roc permet la recharge de l'aquifère rocheux.

Une nouvelle estimation de la recharge spatialement distribuée a été faite avec le modèle d'infiltration HELP pour les conditions météorologiques historiques (1981 à 2021 ; 41 ans) ainsi qu'en climat futur (2006 à 2095 ; 90 ans) sur la base de simulations climatiques obtenues d'Ouranos. L'estimation de la recharge historique faite lors du mandat précédent était de 72 mm/an dans la région d'étude, alors que la nouvelle estimation est de 90 mm/an. La recharge dans un futur proche (2041-2070) a été estimée à 115 mm/an, ce qui représente une augmentation considérable de 25 mm/an (28%).

Un modèle numérique d'écoulement régional a été développé sur la région d'étude d'environ 950 km², avec un maillage numérique de 73 907 éléments triangulaires prismatiques par couche, soit un total de 2 586 745 éléments pour les 35 couches du modèle numérique 3D. Le maillage a été générée de façon à reproduire cinq unités hydrostratigraphiques, soit le roc et les quatre unités de dépôts meubles au-dessus du roc (till, fluvio-glaciaire, argile, sédiments sur l'argile). La surface du modèle suit la topographie alors que la base est plane et fixée à -300 m d'élévation. La périphérie du modèle suit presque partout des cours d'eau où des charges hydrauliques ont été imposées. Des charges ont aussi été imposées sur les cours d'eau permanents et certaines parties de cours d'eau intermittents à l'intérieur du domaine modélisé. La recharge effective au roc a été appliquée à la surface du modèle en soustrayant de la recharge totale les usages de l'eau souterraine spatialement distribués (résidentiel, agricole, industriel-commercial-institutionnel, municipal).

Le calage du modèle a été fait (1) en comparant les charges simulées en condition naturelles (sans prélèvement) à la topographie et (2) en comparant les charges simulées en considérant les prélèvements à la carte piézométrique. Cette simulation avec les usages actuels de l'eau souterraine (S0) et la nouvelle estimation de la recharge (R1) constitue le « cas de base » (S0R1) auquel les autres simulations ont été comparées. Ce cas de base ne mène pas à des rabattements importants du niveau régional de la nappe dans l'aquifère rocheux par rapport aux conditions naturelles ; ces rabattements étant généralement inférieurs à 1 m. La recharge totale moyenne du cas de base est de 90 mm/an et la recharge effective moyenne considérant tous les types de prélèvements est de 75 mm/an.

À l'aide du modèle calé, le programme de simulation a considéré trois scénarii de pressions sur l'eau souterraine en climat futur avec différentes valeurs d'usage de l'eau souterraine et de recharge. Un scénario « pessimiste » (S3R0) a considéré que la recharge en climat futur serait plus basse que la nouvelle estimation de la recharge historique (R0 ; 73 mm/an), mais que les usages vont augmenter de 38% en climat futur (S3), ce qui mène à une recharge effective de 53 mm/an. Un scénario « intermédiaire » considère la même augmentation des usages (S3) mais aussi une augmentation de la recharge telle qu'estimée pour le futur proche (R3 ; 115 mm/an), ce qui induit une augmentation considérable de la recharge effective (96 mm/an). Enfin, un scénario « optimiste » considère le maintien des usages à leur niveau actuel (S0) et une augmentation de la recharge en climat futur (R3 ; 115 mm/an), ce qui mène à une recharge effective moyenne (100 mm/an).

Les scénarii intermédiaire et optimiste mènent à de légères augmentations du niveau de la nappe régionale au roc par rapport aux conditions actuelles, alors que le scénario pessimiste mène à des rabattements de l'ordre de 6 ou 7 m dans le dôme piézométrique en comparaison avec les conditions naturelles sans pompage. Ce rabattement est du même ordre que la baisse observée par le puits du RSESQ à l'ouest de Saint-Rémi depuis les années 1980. Des simulations du cas de base et du scénario pessimiste ont été réalisées en régime transitoire. Les simulations montrent qu'il y aurait atteinte d'un nouvel équilibre hydraulique menant à des niveaux de nappe à peu près stables en seulement une année.

Les travaux réalisés dans le cadre de ce mandat ont mené à une meilleure compréhension du système aquifère. L'aquifère rocheux s'avère assez productif, la recharge de la nappe dans l'aquifère rocheux est modérée et la piézométrie montre un dôme au centre de la région qui implique un écoulement radial vers les cours d'eau en périphérie. Ainsi, il n'y a pas d'apports d'eau souterraine provenant de l'extérieur de la région d'étude et seule la recharge à l'intérieur de la région renouvelle la nappe. Nos travaux indiquent qu'il pourrait y avoir une augmentation substantielle de la recharge en climat futur et que les pressions déjà très fortes sur l'eau souterraine n'augmenteraient pas dans le futur. Toutefois, le système aquifère étant très réactif, la variabilité interannuelle des précipitations et de la recharge pourrait mener à des variations importantes du niveau de la nappe.

Les conditions régionales de recharge et de prélèvements pourraient avoir une incidence sur les flux d'eau souterraine vers l'UTES aux anciennes lagunes de Mercier. L'UTES représente aussi régionalement un important site de prélèvement d'eau souterraine. Actuellement, toute cette eau souterraine prélevée pour maintenir le piège hydraulique est traitée puis déversée en surface. Considérant les fortes pressions sur l'eau souterraine dans la région et l'apport de l'UTES à ces pressions, il apparaît souhaitable que le nouveau système de confinement de l'UTES permette la récupération d'une partie de l'eau prélevée pour maintenir le piège hydraulique. L'utilisation de cette eau récupérée devra donc considérer les besoins en eau souterraine à l'échelle régionale.

Malgré les avancées faites au niveau de la compréhension du système d'écoulement, les travaux réalisés comportent des limitations et des incertitudes. D'abord, bien que le calage de la recharge historique soit très bon, une incertitude demeure sur l'estimation de la recharge en climat futur. Ensuite, il y a une incertitude sur l'estimation des usages de l'eau souterraine et le niveau de stress réel sur les ressources en eau souterraine, notamment en relation avec les usages agricoles.

Ainsi, à la suite de ces résultats, constats et incertitudes, nous formulons des recommandations par rapport au mandat qui nous a été donné. D'abord, il faut souligner l'importance cruciale du maintien du suivi de nappe en considération des incertitudes décrites précédemment. Considérant l'incertitude sur l'estimation de la recharge en climat futur, des travaux plus détaillés seraient requis pour vérifier la représentativité des résultats. L'une des plus importantes incertitudes de nos travaux est reliée à l'estimation des usages de l'eau souterraine, particulièrement les usages agricoles. Il serait important de faire une évaluation plus précise des usages actuels mais aussi de mieux préciser l'évolution future des usages municipaux, résidentiels (avec puits privés), industriels et agricoles. Enfin, pour mettre en perspective le rôle du nouveau piège hydraulique de l'UTES dans la disponibilité de l'eau souterraine dans la région, il faudrait effectuer un inventaire du potentiel des mesures de mitigation ou des sources d'approvisionnement alternatives qui pourraient s'appliquer aux différents usages de l'eau souterraine.

Les travaux ont permis de définir le contexte de l'exploitation régionale des ressources en eau souterraine dans les conditions présentes et en climat futur. Les résultats devraient donc soutenir le choix de la nouvelle technologie de contrôle hydraulique à l'UTES aux anciennes lagunes de Mercier. Les résultats pourraient aussi servir de base à une gestion active et participative des ressources en eau souterraine qui sont soumises à d'importantes pressions dans la région d'étude.

TABLE DES MATIÈRES

1	Contexte, mandat et région d'étude	13
1.1	Contexte	13
1.2	Mandat.....	14
1.3	Définition de la région d'étude	15
2	Travaux antérieurs et données disponibles	18
2.1	Travaux antérieurs.....	18
2.2	Données disponibles	21
3	Contexte de la région d'étude.....	23
3.1	Conditions générales	23
3.2	Hydrostratigraphie.....	23
3.3	Propriétés hydrauliques.....	25
3.4	Piézométrie et conditions d'écoulement	26
3.5	Usages de l'eau souterraine dans la région d'étude	29
4	Modèle géologique régional 3D	31
4.1	Données stratigraphiques disponibles.....	31
4.2	Traitement et intégration des données stratigraphiques	33
4.3	Construction du modèle géologique 3D.....	35
4.4	Discussion sur le modèle géologique 3D	37
5	Estimation de la recharge.....	38
5.1	Bilans hydrologiques des bassins Des Anglais et de L'Acadie	40
5.2	Méthode d'estimation de la recharge avec PyHELP	53
5.3	Préparation des données d'entrée.....	56
5.4	Intégration des données climatiques	63
5.5	Calage du modèle d'infiltration	66
5.6	Recharge historique.....	70
5.7	Recharge future	73
5.8	Évolution de la recharge et des autres composantes du bilan hydrologique.....	75
6	Pression sur la ressource en eau souterraine	84
6.1	Versions de recharge au roc sélectionnées.....	84
6.2	Scénarii d'usage de l'eau souterraine retenus	85

6.3	Évaluation de la pression actuelle et future sur la ressource en eau souterraine.....	86
7	Développement du modèle numérique d'écoulement régional.....	88
7.1	Modèle conceptuel d'écoulement de l'eau souterraine.....	88
7.2	Construction du maillage en 2D et 3D.....	91
7.3	Conditions aux limites du modèle.....	94
7.4	Imposition de la recharge et des prélèvements d'eau souterraine.....	95
7.5	Propriétés hydrauliques assignées aux unités du modèle.....	97
7.6	Calage et résultats du modèle.....	100
7.7	Résultats du modèle en régime transitoire.....	103
7.8	Effets des usages individuels sur les rabattements.....	105
7.9	Constats sur le modèle numérique du système aquifère.....	108
8	Conclusions, limitations et recommandations.....	110
8.1	Conclusions.....	110
8.2	Limitations.....	112
8.3	Recommandations.....	113
9	Références.....	114

ANNEXES

Les annexes sont présentées à la fin du rapport.

Annexe 1 – Municipalités couvertes par la région d'étude

Annexe 2 – Élaboration de la carte piézométrique

Annexe 3 – Élaboration du modèle géologique 3D

Annexe 4 – Estimation de la recharge historique avec un bilan hydrologique

Annexe 5 – Estimation de la recharge distribuée historique avec PyHELP

Annexe 6 – Estimation de la recharge en climat futur avec les modèles climatiques

Annexe 7 – Estimation de la recharge et de l'usage de l'eau souterraine à l'échelle municipale

Annexe 8 – Modèle numérique d'écoulement régional

Annexe 9 – Données disponibles et fichiers électroniques

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

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1. Compilation des conductivités hydrauliques des sédiments et du roc des études antérieures.....	25
Tableau 3.2. Estimation des prélèvements d'eau dans la région d'étude.....	29
Tableau 3.3. Comparaison de l'estimation de l'INRS des prélèvements d'eau souterraine (Mm ³ /an) dans la région d'étude avec les estimations de Technorem (2008a et 2008b) et de RADEAU 1 (Ageco 2019).....	30
Tableau 4.1. Sources de données utilisées pour développer le nouveau modèle géologique.	32
Tableau 4.2. Pourcentage de couverture du nouveau modèle géologique par les modèles existants.....	33
Tableau 4.3. Structure stratigraphique du nouveau modèle géologique.	33
Tableau 4.4. Compilation des données stratigraphiques en format simplifié.	34
Tableau 4.5. Statistique sur les épaisseurs des unités du modèle géologique.....	36
Tableau 5.1. Variables climatiques moyennes sur les bassins versants jaugés de L'Acadie et Des Anglais.	40
Tableau 5.2. Caractéristiques des stations hydrométriques sélectionnées.	43
Tableau 5.3. Estimés du débit de base par séparation des hydrogrammes de rivière sur les bassins versants jaugés.	46
Tableau 5.4. Estimés de l'infiltration et de la recharge à partir des filtres sur les bassins versants jaugés.....	47
Tableau 5.5. Composantes détaillées du bilan hydrique sur les bassins versants jaugés.	49
Tableau 5.6. Comparaison des bilans hydrologiques avec des anciens projets sur des secteurs proches.	51
Tableau 5.7. Composantes majeures du bilan hydrologique sur le bassin versant de L'Acadie (030421).	51
Tableau 5.8. Composantes majeures du bilan hydrologique sur le bassin versant Des Anglais (030907).	51
Tableau 5.9. Séquences des unités stratigraphiques et attribution des types de couche dans PyHELP.	60
Tableau 5.10. Contextes des mailles sur le secteur d'évaluation de la recharge et opérations appliquées.	62
Tableau 5.11. Sélection des mailles pour l'évaluation de la recharge.	63
Tableau 5.12. Modèles climatiques sélectionnés pour les simulations de la recharge en climat futur.	65
Tableau 5.13. Ajustement des paramètres de calage du modèle pour les deux bassins versants jaugés.	67
Tableau 5.14. Résultats des diverses phases de calage du modèle pour les deux bassins versants jaugés.	68
Tableau 5.15. Évolution des composantes annuelles moyennes du bilan hydrologique selon les estimations en période historique (1981-2021) et en climat futur (2022-2095) sur la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier.	79
Tableau 5.16. Comparatif entre les valeurs moyennes simulées sur la période historique et celles issues des modèles climatiques sur la période commune de simulations (2006-2021 / 16 ans) sur la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier.	79
Tableau 5.17. Composantes annuelles moyennes du bilan hydrologique exprimées en mm/an (et ratio par rapport aux précipitations totales) selon la période considérée sur la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier.	80
Tableau 5.18. Évolution des composantes annuelles moyennes du bilan hydrologique et de la température selon la période considérée sur la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier.....	81
Tableau 6.1. Scénario de recharge produits sur la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier.	84
Tableau 6.2. Scénario d'usage produits sur la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier.	85
Tableau 6.3. Apport (recharge nette), prélèvements d'eau (types d'usage) et estimés du volume d'eau disponible (recharge effective) selon les scénarii sur la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier.	86
Tableau 7.1. Définition stratigraphique du modèle numérique d'écoulement.	91

Tableau 7.2. Scénarii de recharges et prélèvements considérés dans le modèle numérique.....	95
Tableau 7.3. Comparaison de la recharge des modèles numériques antérieurs avec le nouveau modèle.	96
Tableau 7.4. Conductivités hydrauliques finales du modèle numérique.....	97
Tableau 7.5. Valeurs de conductivité hydraulique provenant de projets antérieurs.....	98
Tableau 7.6. Statistiques de conductivités hydrauliques en comparaison des valeurs du modèle numérique.	98
Tableau 7.7. Bilans de scénarii de recharge et des prélèvements utilisés pour les simulations.	101
Tableau 7.8. Comparaison des charges simulées aux charges observées.	101
Tableau 7.9. Bilan des entrées et sorties d'eau des six versions de simulations.	102
Tableau 7.10. Propriétés du modèle pour le régime transitoire.	104
Tableau 7.11. Recharge nette des scénarii de recharge et d'usage utilisés pour les simulations.	106
Tableau 7.12. Charges simulées comparées à la piézométrie de référence pour les quatre simulations.	106
Tableau 7.13. Bilan des entrées et sorties d'eau des six simulations sans et avec exploitation.	106

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1. Localisation des secteurs couverts par des travaux : modèle numérique d'écoulement local du site des anciennes lagunes de Mercier ; modèle géologique à haute résolution ; modèle géologique « étendu » couvrant le territoire où sera faite l'évaluation de la recharge et secteur où a été faite l'estimation de l'usage de l'eau et qui correspond aussi aux limites du modèle numérique régional du présent mandat (figure tirée de Ballard et al., 2021).....	16
Figure 2.1. Secteurs couverts par les études antérieures de Pontlevoy (2004), dans le bassin de la rivière Châteauguay (Côté et al., 2006 ; Tremblay, 2008), du programme CDAQ – Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (Technorem, 2008a et 2008b) et du PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013) (figure tirée de Ballard et al., 2021).	19
Figure 2.2. Hydrogramme du puits 03097102 du RSESQ à l'ouest de Saint-Rémi associé aux données météorologiques de la maille 48948 de la grille Info-Climat (centroïde de la maille situé à 4.0 km du puits) ...	22
Figure 3.1. Stratigraphie détaillée des dépôts meubles (a : Tremblay et al., 2010) et hydrostratigraphie des dépôts meubles dans la région d'étude (b : Croteau et al., 2010).....	24
Figure 3.2. Comparaison de l'estimation des prélèvements annuels d'eau souterraine par catégorie d'usage de la présente étude (INRS) par rapport aux estimations de Technorem (2008a et 2018b) et de RADEAU 1 (Ageco, 2019).....	30
Figure 4.1. Modèles géologiques antérieurs couvrant l'étendue du nouveau modèle géologique : modèle Mercier (orange), modèle de Tremblay (2008) (bleu), modèle de Croteau (2006) (rouge) et modèle du PACES Montérégie Est (vert). Les forages disponibles (points mauves) sont indiqués dans le secteur non couvert par un modèle existant. Les affleurements (x) ont aussi servi de points de contrôle.....	32
Figure 5.1. Normales mensuelles de la température et des précipitations selon les données de la grille Info-Climat sur le bassin versant jaugé de L'Acadie (station hydrométrique 030421) entre 1960 et 2020.....	41
Figure 5.2. Normales mensuelles de la température et des précipitations selon les données de la grille Info-Climat sur le bassin versant jaugé Des Anglais (station hydrométrique 030907) entre 1960 et 2020.....	41
Figure 5.3. Évolution des précipitations totales et des températures moyennes annuelles sur (a) le bassin versant jaugé de L'Acadie (station hydrométrique 030421) et (b) le bassin versant jaugé Des Anglais (station hydrométrique 030907).....	42
Figure 5.4. Débit annuel moyen mesuré sur la rivière L'Acadie à la station hydrométrique 030421.....	44
Figure 5.5. Débit annuel moyen mesuré sur la rivière Des Anglais à la station hydrométrique 030907.	44
Figure 5.6. Débit mensuel moyen mesuré sur la rivière L'Acadie à la station hydrométrique 030421.	45
Figure 5.7. Débit mensuel moyen mesuré sur la rivière Des Anglais à la station hydrométrique 030907.	45
Figure 5.8. Exemple d'application des filtres sur l'hydrogramme de la station de L'Acadie (030421) pour l'année 2011 – Graphique semi-logarithmique.	47
Figure 5.9. Infiltration totale annuelle moyenne estimée à partir du débit de base sur la rivière L'Acadie à la station hydrométrique 030421.....	48
Figure 5.10. Infiltration totale annuelle moyenne estimée à partir du débit de base sur la rivière Des Anglais à la station hydrométrique 030907.....	48
Figure 5.11. Composantes simplifiées du bilan hydrologique sur le bassin versant de L'Acadie à la station hydrométrique 030421 sur la période de suivi complet (1980-2020).	50
Figure 5.12. Composantes simplifiées du bilan hydrologique sur le bassin versant Des Anglais à la station hydrométrique 030907 sur la période de suivi complet (1974-2020).	50
Figure 5.13. Principales composantes du bilan hydrologique par rapport aux précipitations totales (a) sur le bassin versant de L'Acadie (station hydrométrique 030421) et sur (b) le bassin versant jaugé Des Anglais (station hydrométrique 030907).....	52

Figure 5.14. Procédure d'estimation de la recharge avec PyHELP (Gosselin et al., 2019).	55
Figure 5.15. Modèle conceptuel (cas hypothétique représentant la séquence complète).	61
Figure 5.16. Résultats du calage des débits de base et totaux annuels sur le bassin versant jaugeé de L'Acadie (030421) : (a) comparatif entre les débits simulés et les débits observés et (b) variabilité des débits annuels simulés et observés sur le bassin entre 1980 et 2020.	69
Figure 5.17. Résultats du calage des débits de base et totaux annuels sur le bassin versant jaugeé Des Anglais (030907) : (a) comparatif entre les débits simulés et les débits observés et (b) variabilité des débits annuels simulés et observés sur le bassin entre 1980 et 2020.	69
Figure 5.18. Composantes annuelles moyennes du bilan hydrologique pour la période historique (1980-2021) sur la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier.	72
Figure 5.19. Composantes mensuelles moyennes du bilan hydrologique et température moyenne mensuelle pour la période historique (1980-2021) sur la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier.	72
Figure 5.20. Composantes annuelles moyennes du bilan hydrologique pour le futur proche (2041-2070) sur la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier.	74
Figure 5.21. Composantes mensuelles moyennes du bilan hydrologique et température moyenne mensuelle pour le futur proche (2041-2070) sur la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier.	74
Figure 5.22. Évolution des moyennes annuelles de la température entre 1981 et 2095 sur la zone du modèle d'écoulement.	76
Figure 5.23. Évolution des moyennes annuelles des précipitations totales entre 1981 et 2095 sur la zone du modèle d'écoulement.	76
Figure 5.24. Évolution des moyennes annuelles de l'évapotranspiration entre 1981 et 2095 sur la zone du modèle d'écoulement.	77
Figure 5.25. Évolution des moyennes annuelles du ruissellement de surface entre 1981 et 2095 sur la zone du modèle d'écoulement.	77
Figure 5.26. Évolution des moyennes annuelles du ruissellement hypodermique entre 1981 et 2095 sur la zone du modèle d'écoulement.	78
Figure 5.27. Évolution des moyennes annuelles de la recharge au roc entre 1981 et 2095 sur la zone du modèle d'écoulement.	78
Figure 5.28. Tendances des composantes du bilan hydrologique et de la température estimées sur quatre périodes distinctes (1981-2010 / 30 ans, 2011-2040 / 30 ans, 2041-2070 / 30 ans et 2071-2095 / 25 ans) sur la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier.	82
Figure 5.29. Évolution des composantes mensuelles moyennes du bilan hydrologique et de la température moyenne mensuelle entre la période historique (1980-2021) et le futur proche (2041-2070) sur la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier.	83
Figure 7.1. Modèle conceptuel d'écoulement de l'eau souterraine dans la région d'étude (extrait de Lavigne et al., 2010).	88
Figure 7.2. Bloc 3D du modèle numérique.	92
Figure 7.3. Bloc 3D avec une coupe est-ouest à travers le modèle numérique.	93
Figure 7.4. Distribution spatiale de la recharge effective assignée à la première couche du modèle numérique : (a) recharge sans prélèvement et (b) recharge nette incluant l'ensemble des prélèvements.	96
Figure 7.5. Comparaison des conductivités hydrauliques horizontales (a) et verticales (b) attribuées au modèle par rapport aux valeurs extraites des projets antérieurs.	99
Figure 7.6. Comparaison des niveaux piézométriques des points d'observation pour les simulations sans exploitations R1 et R0, comparés à l'élévation du sol (LiDAR).	100

Figure 7.7. Comparaison des niveaux piézométriques simulés et observés pour les scénarii S0R1, S0R3, S3R3 et S3R0.	102
Figure 7.8. Bilans d'entrée et de sortie d'eau des quatre scénarii avec exploitation modélisées.	103
Figure 7.9. Rabattements piézométriques comparatifs des simulations représentant l'état sans usage (R1) et l'état avec usages pour les modèles S0R1 et S3R0.	105
Figure 7.10. Comparaison des niveaux piézométriques des points d'observation pour les simulations avec exploitations individuelles comparés à la piézométrie interpolée.	107
Figure 7.11. Comparaison des scénarii de recharge du modèle avec les valeurs provenant des travaux antérieurs. .	109

LISTE DES CARTES

Les cartes suivantes sont présentées à la fin du rapport après les annexes.

Carte 1 – Municipalités dans la région d'étude.

Carte 2 – Suivi environnemental.

Carte 3 – Topographie, hydrographie et bassins versants.

Carte 4 – Utilisation du sol pour l'année 2017.

Carte 5 – Géologie des dépôts quaternaires.

Carte 6 – Géologie du roc.

Carte 7 – Piézométrie de l'aquifère rocheux régional.

Carte 8 – Prélèvement totaux (Mm^3/an) d'eau souterraine par municipalité.

Carte 9 – Usages de l'eau souterraine.

Carte 10 – Usage total de l'eau souterraine.

Carte 11 – Épaisseur totale des dépôts meubles.

Carte 12 – Épaisseur de l'unité de till.

Carte 13 – Épaisseur des unités sous-jacents à l'argile.

Carte 14 – Épaisseur de l'unité argileuse.

Carte 15 – Épaisseur des unités sus-jacentes à l'argile.

Carte 16 – Relief de la région d'étude.

Carte 17 – Recharge distribuée historique de l'aquifère rocheux.

Carte 18 – Recharge distribuée en climat futur de l'aquifère rocheux.

Carte 19 – Distribution spatiale de la recharge actuelle et future.

Carte 20 – Distribution spatiale de l'usage total actuel de l'eau souterraine.

Carte 21 – Distribution spatiale des types d'usage actuels de l'eau souterraine.

Carte 22 – Distribution spatiale de l'usage total futur de l'eau souterraine.

Carte 23 – Distribution spatiale des types d'usage futurs de l'eau souterraine.

Carte 24 – Distribution spatiale de l'usage total et des types d'usage actuels et futurs de l'eau souterraine.

Carte 25 – Distribution spatiale de la recharge effective actuelle et future.

Carte 26 – Distribution spatiale de la recharge effective sans l'effet des GPE actuelle et future.

Carte 27 – Distribution spatiale de la recharge et de l'usage total en climat futur par rapport à l'état actuel.

Carte 28 – Distribution spatiale des types d'usage en climat futur par rapport à l'état actuel.

Carte 29 – Distribution spatiale de la recharge effective en climat futur par rapport à l'état actuel.

Carte 30 – Maillage 2D et conditions aux limites du modèle.

Carte 31 – Rabattement du niveau piézométrique causé par l'ensemble des prélèvements en fonction des scénarii.

Carte 32 – Rabattement du niveau piézométrique causé par chaque type de prélèvement selon le scénario pessimiste.

1 CONTEXTE, MANDAT ET RÉGION D'ÉTUDE

1.1 Contexte

Le présent mandat s'inscrit dans une suite de travaux nécessaires à la conception du futur système de confinement des eaux souterraines des anciennes lagunes de Mercier. Le site des anciennes lagunes est inscrit au Passif environnemental du gouvernement du Québec. En mars 2018, le gouvernement s'est engagé à optimiser le système actuel de confinement des eaux contaminées du site qui est en opération depuis 1984. Dans cette perspective, un premier mandat a été accordé en décembre 2018 à l'INRS pour la modélisation de différents scénarios de confinement hydraulique à l'aide d'un modèle hydrogéologique numérique local en vue de choisir le système à mettre en place. Le mandat est toujours en cours et doit se terminer le 30 septembre 2022.

En août 2020, le MELCC a mandaté à nouveau l'INRS pour la réalisation de travaux de caractérisation complémentaire à la modélisation de l'écoulement des eaux souterraines et des scénarios de confinement hydraulique à Mercier. Ces travaux visaient à compléter l'information nécessaire au premier mandat en documentant mieux les conditions des ressources en eau souterraine dans la région et en amont des anciennes lagunes de Mercier. Ces travaux ont notamment permis d'estimer l'usage actuel de l'eau souterraine (résumé à la section 3.5) et les effets des changements climatiques sur la recharge dans la région et en amont du site des anciennes lagunes de Mercier (Ballard et al., 2021). Toutefois, l'effet des changements climatiques sur la recharge avait été estimé avec des approches simples à partir d'autres études et les résultats obtenus ont été ambigus. Une approche plus rigoureuse devait donc être tentée afin d'obtenir des résultats plus probants.

Ces travaux précédents ont aussi démontré que le système actuel de confinement hydraulique contribue de façon significative aux prélèvements régionaux (approximativement 3 800 m³/jour). Ces travaux ont ainsi confirmé l'usage intense des ressources en eau dans la région autour des lagunes, ce qui pourrait affecter l'opération future du système de confinement optimisé. Par conséquent, dans le contexte régional d'utilisation des ressources en eau, le MELCC envisage que le scénario optimal qui sera retenu pour le nouveau système permette, si possible, de récupérer en partie l'usage de l'eau pour la population, ce qui permettrait de réduire les risques de conflits d'usages régionaux et de favoriser l'acceptation sociale du scénario. Cette perspective est d'un grand intérêt pour les municipalités environnantes.

Les travaux du présent mandat accordé à l'INRS consistent en une modélisation à l'échelle régionale pour évaluer si les effets potentiels des prélèvements régionaux d'eau souterraine et des changements climatiques affecteront l'intégrité et l'efficacité du système de confinement à long terme pour les différents scénarios envisagés. Ces travaux seront réalisés de façon concertée avec un projet parallèle réalisé par l'Université Laval. Le mandat de l'INRS a pour but de bien comprendre la nature et la dynamique des ressources en eau souterraine de la région d'étude tandis que le projet de l'Université Laval a pour objectif d'intégrer les besoins des acteurs de l'eau régionaux dans le choix du scénario, en considérant l'évolution future de ces besoins, notamment pour le développement économique de la région, et les objectifs de gestion durable de ces ressources, qui font l'objet de fortes pressions.

1.2 Mandat

Les travaux qui doivent être réalisés dans le cadre du présent mandat sont essentiels pour assurer une meilleure sélection du nouveau système de confinement hydraulique de l'UTES et pour s'assurer que ce système pourra être efficace à très long terme, même sous l'effet de l'évolution des conditions régionales. En effet, les impacts des prélèvements régionaux futurs sur les ressources et les changements climatiques doivent aussi être examinés, en considérant en particulier que les activités actuelles pour le confinement hydraulique prélèvent un volume significatif d'eau dans l'aquifère régional déjà très sollicité. Il est donc nécessaire de prendre en considération tous les prélèvements en relation avec les besoins actuels et futurs des autres usagers, ainsi que des Écosystèmes dépendants des eaux souterraines (EDES) afin de préserver l'intégrité du système de confinement. Une approche régionale et sur un horizon lointain est donc nécessaire.

C'est dans cette perspective que le présent mandat est confié à l'INRS dans le but d'examiner comment les prélèvements régionaux d'eau souterraine de tous les usagers vont influencer la piézométrie et la recharge de l'aquifère régional. L'influence de ces conditions régionales variables sur l'efficacité du confinement hydraulique des trois scénarios de confinement pourra ainsi être évaluée, ce qui va supporter le choix du système de confinement le plus adéquat. Les travaux réalisés dans le cadre des mandats parallèles confiés à l'INRS et à l'Université Laval vont contribuer à l'identification d'une nouvelle solution de contrôle environnemental du site contaminé des anciennes lagunes de Mercier qui soit socialement acceptable, et permettre la vérification de l'efficacité technique de cette solution en contexte de changements climatiques et d'évolution des prélèvements régionaux d'eau souterraine. Ils permettront également au MELCC de disposer d'un outil pour la gestion des prélèvements d'eau souterraine dans cette région où les ressources sont déjà sous pression et risquent d'être encore plus sollicitées dans le futur.

Les travaux vont impliquer le développement d'un modèle numérique d'écoulement régional qui permettra (1) de mieux comprendre le système aquifère régional, (2) d'évaluer l'effet des prélèvements actuels d'eau souterraine sur le niveau de la nappe, (3) d'anticiper l'effet que pourraient avoir les conditions climatiques futures sur la recharge des nappes, et (4) de représenter l'effet que pourraient avoir différents scénarios d'exploitation future de l'eau souterraine sur le niveau de la nappe, incluant le prélèvement d'eau du piège hydraulique aux anciennes lagunes de Mercier.

Les travaux à réaliser comprennent quatre étapes. L'étape 1 implique le développement d'un modèle géologique régional couvrant toute l'étendue du modèle régional d'écoulement ainsi que l'étendue de la zone à l'intérieur de laquelle la recharge des nappes sera estimée. L'étape 2 porte spécifiquement sur le développement du modèle numérique d'écoulement régional. L'étape 3 comprend l'estimation de la recharge de l'aquifère rocheux régional, à la fois en conditions présentes et en climat futur. Enfin, l'étape 4 couvre l'application du modèle d'écoulement à l'évaluation de l'effet des prélèvements actuels et futurs d'eau souterraine sur le niveau de la nappe régionale. Le modèle pourra aussi considérer l'effet potentiel de la récupération de l'usage de l'eau souterraine pompée au piège hydraulique, si elle peut être utilisée pour l'approvisionnement en eau régional. D'autres scénarios d'exploitation, qui découleront du projet parallèle de l'Université Laval, pourront aussi être considérés dans le futur à l'aide du modèle numérique élaboré dans le cadre de ce projet.

1.3 Définition de la région d'étude

La figure 1.1 montre l'étendue de la région d'étude. Le site des anciennes lagunes de Mercier est situé au sud de l'île de Montréal dans la région administrative de la Montérégie. Ce site est situé au sud-est du secteur urbanisé de la municipalité de Mercier. Il a été reconnu, il y a plusieurs années, que les ressources en eau souterraine dans la région de Mercier et de Saint-Rémi étaient très exploitées (Pontlevoay, 2004 ; Technorem, 2008a et 2008b). Le projet RADEAU 1 supporté par le MAPAQ a récemment confirmé que cette ressource est encore présentement soumise à de fortes pressions (Ageco, 2019). Les travaux récents de l'INRS ont également mis en évidence que les ressources en eau souterraine de la région d'étude subissent de très fortes pressions, reliées à une variété d'usages (industriel, municipal, résidentiel et agricole), qui sont susceptibles d'augmenter en climat futur (Ballard et al., 2021). Les effets anticipés des changements climatiques ainsi que le développement démographique et économique de la région (secteur agroalimentaire et cultures maraîchères) vont certainement augmenter dans le futur, ce qui mènerait à des besoins en eau accrus (Ageco, 2019). L'estimation des usages actuels de l'eau souterraine est résumée à la section 3.5, alors que la plage possible des pressions sur l'eau souterraine en climat futur est décrite à la section 6. L'effet potentiel de ces pressions en climat futur sur la nappe dans l'aquifère rocheux régional a été évalué avec le modèle numérique à la section 7.

La préservation des usages actuels de l'eau souterraine, particulièrement pour l'approvisionnement en eau potable et l'agriculture, nécessite que l'exploitation de l'eau souterraine fasse l'objet d'une gestion active qui doit impliquer les usagers de l'eau de la région, mais également tenir compte des effets de l'opération du système de confinement hydraulique du site des anciennes lagunes de Mercier. En effet, le site des anciennes lagunes émet des contaminants dissous dans l'eau souterraine qui forment un panache d'eau polluée impropre à la consommation, ce qui limite en partie l'usage de l'eau sur le territoire (Lefebvre, 2007). La migration du panache d'eau souterraine sous l'effet de l'écoulement naturel doit être arrêtée pour éviter que cette eau polluée atteigne des utilisateurs de l'eau souterraine ou des milieux récepteurs naturels en aval du site. C'est à cette fin que le système de confinement hydraulique des eaux souterraines contaminées des lagunes de Mercier est en opération depuis 1984. La méthode de confinement est restée la même depuis le début, soit un pompage intense des eaux souterraines contaminées et leur disposition après traitement dans le réseau hydrologique de surface. Ces opérations sont faites à l'Usine de traitement des eaux souterraines (UTES) qui arrive à la fin de sa vie utile et devra être remplacée.

Le MELCC désire profiter du remplacement de l'UTES pour optimiser le système de confinement hydraulique et, si possible, récupérer en partie l'usage de l'eau pour la population régionale. L'optimisation du système de confinement hydraulique nécessite une bonne compréhension du système hydrogéologique, mais également une connaissance détaillée de l'influence potentielle des différents usages de l'eau dans toute la région. En effet, les prélèvements d'eau souterraine dans la région sont importants et pourraient donc influencer à moyen ou long terme l'efficacité du système de confinement. Les travaux de modélisation qui seront effectués dans le cadre du présent mandat engloberont donc une région plus vaste, comprenant plusieurs bassins versants potentiellement en contact hydraulique avec la zone d'étude. Les nouvelles informations issues de ces travaux seront intégrées au modèle numérique local qui servira à simuler les différents scénarios d'optimisation.

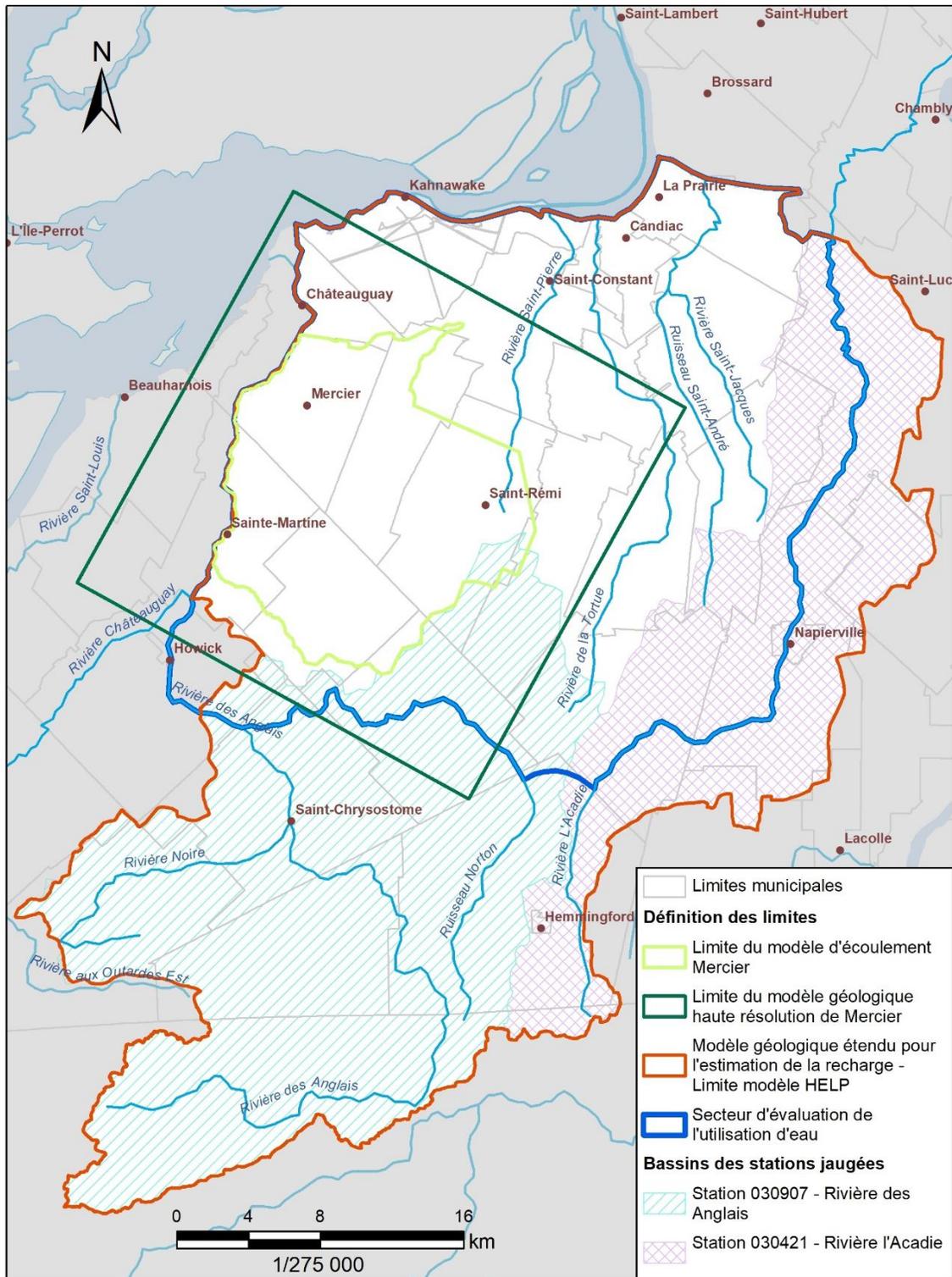


Figure 1.1. Localisation des secteurs couverts par des travaux : modèle numérique d'écoulement local du site des anciennes lagunes de Mercier ; modèle géologique à haute résolution ; modèle géologique « étendu » couvrant le territoire où sera faite l'évaluation de la recharge et secteur où a été faite l'estimation de l'usage de l'eau et qui correspond aussi aux limites du modèle numérique régional du présent mandat (figure tirée de Ballard et al., 2021).

La figure 1.1 montre l'étendue des secteurs où les travaux ont été réalisés par l'INRS. Dans le cadre d'un autre mandat en voie de réalisation, un modèle numérique d'écoulement local représente le site des anciennes lagunes de Mercier en détail. À cette fin, un modèle géologique des dépôts meubles à haute résolution a été développé. Dans le cadre des travaux documentés dans le présent rapport, un nouveau modèle géologique « étendu » couvrant le territoire où sera faite l'évaluation de la recharge a dû être développé, ce qui couvre une région plus grande que le secteur où a été faite l'estimation de l'usage de l'eau. Ce modèle géologique est aussi requis afin d'estimer la recharge du système aquifère régional à l'aide du modèle d'infiltration HELP (*Hydrologic Evaluation of Landfill Performance*) selon l'approche définie par Croteau et al. (2010) et utilisée notamment dans le cadre du projet PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013). Ce modèle géologique régional servira aussi de base au développement d'un modèle numérique d'écoulement régional. L'estimation de la recharge couvre un territoire plus grand que le modèle régional car il est nécessaire de couvrir au complet des bassins hydrologiques jaugés afin de permettre la calibration de l'estimation de la recharge (section 5.5). Dans la région d'étude, les bassins jaugés disponibles sont ceux des rivières Des Anglais et de L'Acadie qui représentent un vaste territoire (figure 1.1). Croteau et al. (2010) ont calé leur évaluation de la recharge couvrant le bassin versant de la rivière Châteauguay sur la station de jaugeage de la rivière Des Anglais (voir aussi Croteau, 2006). La recharge estimée dans le cadre du projet PACES Montérégie Est a été basée sur la station de jaugeage de la rivière de L'Acadie, en plus de trois autres stations hors de la région d'étude (Carrier et al., 2013).

Finalement, l'estimation de l'usage de l'eau souterraine réalisée dans le cadre de précédents travaux par l'INRS a couvert le même secteur que celui du modèle numérique d'écoulement régional (Ballard et al., 2021). Un tel modèle doit être limité le plus possible par des limites hydrologiques naturelles correspondant notamment aux cours d'eau importants de la région d'étude : rivière Châteauguay à l'ouest, fleuve Saint-Laurent au nord, rivière L'Acadie à l'est et ruisseau Norton au sud. C'est ce secteur couvrant une superficie totale de 954 km² qui est appelé « région d'étude » dans le présent rapport. La carte 1 montre la répartition des municipalités qui sont couvertes par la région d'étude alors que le tableau A1.1 à l'annexe 1 compile la superficie totale de ces municipalités et la proportion de leur territoire qui est comprise dans la région d'étude. La superficie totale des municipalités au tableau A1.1 (950 km²) est un peu moindre que la superficie de la région d'étude (954 km²) car les municipalités d'Hemmingford, de Brossard et d'Howick n'ont pas été considérées. En effet, les superficies des territoires municipaux incluses dans les limites du projet y étaient non significatives (respectivement 1.93, 0.23 et 0.04 km²).

2 TRAVAUX ANTÉRIEURS ET DONNÉES DISPONIBLES

2.1 Travaux antérieurs

La figure 2.1 montre la couverture de la région d'étude par certaines études antérieures. Tel que mentionné à la section précédente, les présents travaux sont reliés au contrôle de la contamination émise par le site des anciennes lagunes de Mercier. De nombreuses études locales ont été réalisées sur ce site, mais Pontlevoy (2004) a développé un modèle régional du secteur entourant le site de Mercier afin d'en définir le contexte (étendue du modèle régional indiquée à la figure 2.1 ; voir aussi Pontlevoy et al., 2002). Afin de permettre le développement d'un modèle d'écoulement régional, les travaux régionaux de Pontlevoy (2004) ont répertorié les données disponibles sur la stratigraphie des dépôts meubles, les propriétés hydrauliques des dépôts meubles et du roc, et la piézométrie. Ses travaux ont aussi documenté les débits des puits municipaux à l'époque ainsi que les problématiques liées au niveau d'exploitation de l'eau souterraine, notamment par les puits municipaux et les activités agricoles. Le modèle régional de Pontlevoy (2004) a aussi permis d'estimer la recharge de l'aquifère rocheux régional. Pontlevoy (2004) a également développé un modèle numérique d'écoulement local dans le secteur des anciennes lagunes de Mercier puis Racine (2005) a utilisé ce modèle pour évaluer des solutions de contrôle ou de réhabilitation qui pourraient être envisageables. Lefebvre (2007) a fait une synthèse du contexte hydrogéologique du site des anciennes lagunes de Mercier et du potentiel de réhabilitation du site. Martel et al. (2018) ont plus récemment fait une nouvelle évaluation des technologies de réhabilitation qui pourraient être appliquées au site.

À l'échelle régionale, la Commission géologique du Canada (CGC) et le MELCC ont réalisé conjointement une étude hydrogéologique couvrant le bassin versant de la rivière Châteauguay à l'intérieur duquel se trouve une grande partie de la région d'étude (Côté et al., 2006). Cette étude, qui a servi de modèle au PACES, a produit des résultats détaillés à plusieurs niveaux, notamment un modèle géologique 3D des dépôts meubles (Tremblay, 2008 ; Tremblay et al., 2010), la géochimie de l'eau souterraine (Blanchette, 2006 ; Blanchette et al., 2010), l'estimation de la recharge de l'aquifère rocheux régional (Croteau, 2006 ; Croteau et al., 2010) et la modélisation numérique de l'écoulement de l'eau souterraine (Lavigne, 2006 ; Lavigne et al., 2010). Les travaux de Lavigne (2006) ont notamment impliqué la compilation des propriétés hydrauliques du roc fracturé ainsi que des données piézométriques et des débits des puits d'approvisionnement en eau dont les aires d'alimentation ont été définies. Sur la figure 2.1, la trame jaune montre l'étendue de l'estimation de la recharge ainsi que du modèle numérique qui ont été faits dans le cadre du projet Châteauguay.

Le PACES Montérégie Est a impliqué une étude hydrogéologique régionale couvrant en détail les ressources régionales en eau souterraine de cette région (Carrier et al., 2013). En plus des aspects couverts de façon systématique dans le cadre des projets PACES, cette étude a aussi impliqué la définition des propriétés hydrauliques du roc fracturé, notamment la réduction de la conductivité hydraulique du roc fracturé avec la profondeur (Laurencelle, 2018). Sur la figure 2.1, la trame bleue montre la partie de la région d'étude qui a été couverte par le PACES Montérégie Est. Cette étude a notamment impliqué l'estimation de la recharge de l'aquifère rocheux dans le bassin versant de la rivière de L'Acadie qui fait partie de la région d'étude. Encore une fois à l'échelle régionale, la SCABRIC (Société de conservation et d'aménagement du bassin de la rivière Châteauguay), qui est l'OBV couvrant la zone du bassin versant de la rivière Châteauguay, a produit un portrait de ce bassin (Audet et al., 2015), incluant les eaux de surface et souterraines.

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

Deux études portant sur les ressources en eau souterraine et leur usage dans la région d'étude se démarquent particulièrement, soit l'étude de Technorem (2008a et 2008b) et le projet RADEAU 1 (Ageco, 2019). Technorem (2008a et 2008b) a caractérisé et modélisé le système aquifère régional des bassins versants des rivières Norton, Esturgeon, Saint-Pierre, de la Tortue et de L'Acadie qui se trouvent dans la partie amont de la région d'étude du présent rapport. Les travaux ont été réalisés pour les producteurs maraîchers de la région et avaient pour but « d'accroître les connaissances sur le potentiel des nappes à fournir de l'eau à long terme pour l'irrigation en tenant compte des changements climatiques et des besoins actuels et futurs » (Technorem, 2008a). À la figure 2.1, le polygone vert montre la région d'étude couverte par Technorem.

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

Les travaux précédents de l'équipe de l'INRS (Ballard et al., 2021) ont amélioré la caractérisation de la région d'étude, notamment aux niveaux suivants : (1) développement d'un modèle géologique régional des dépôts meubles, (2) estimation préliminaire de la recharge de l'aquifère rocheux régional, (3) estimation de l'usage de l'eau, (4) évaluation sommaire de l'incidence possible du présent niveau d'usage de l'eau souterraine, (5) formulation de scénarii de changement de la recharge et de l'usage de l'eau souterraine en climat futur, (6) définition des pressions sur l'eau souterraine à l'échelle intramunicipale, et (7) formulation de recommandations pour l'exploitation durable de l'eau souterraine dans la région d'étude.

Le premier rapport intérimaire (Ballard et al., 2022) est venu compléter l'information avec tout d'abord la production d'une carte piézométrique actualisée couvrant l'ensemble du territoire. De plus, un premier bilan hydrologique a été fait sur les deux bassins versants jaugés offrant alors des indications sur le taux d'infiltration totale et amorçant les travaux sur l'évaluation de la recharge du roc dont le présent rapport détaille les résultats.

Certains des résultats obtenus précédemment vont être utilisés directement dans le cadre du présent mandat. C'est notamment le cas de l'estimation des usages de l'eau souterraine (section 3.5). Toutefois, certains résultats vont être revus ou améliorés. C'est ainsi le cas du modèle géologique régional des dépôts meubles qui a été complètement revu à partir des données stratigraphiques existantes, alors que lors de notre mandat précédent, le modèle avait été produit à partir de modèles géologiques existants. Ensuite, la recharge estimée par des travaux antérieurs avait été utilisée dans le cadre de notre mandat précédent. Pour le présent mandat, la recharge a fait l'objet d'une nouvelle évaluation complète sur tout le territoire à l'aide du modèle d'infiltration HELP (section 5.2). Cette nouvelle évaluation a permis de non seulement évaluer la recharge historique (section 5.6), mais aussi la recharge en climat futur (section 5.7). Cette approche a été rendue nécessaire par l'ambiguïté des résultats de l'évaluation du changement potentiel de la recharge en climat futur dans le cadre de notre mandat précédent. Cette évaluation avait été faite à partir des résultats de travaux antérieurs qui indiquaient que la recharge en climat futur pourrait être réduite, rester stable ou augmenter. Cette nouvelle estimation de la recharge a aussi permis de revoir l'évaluation des pressions sur l'eau souterraine, notamment la proportion de la recharge utilisée, tant actuellement qu'en climat futur (section 6). Cette mise-à-jour de l'évaluation de la recharge et des pressions a servi de base à l'évaluation des conditions d'exploitation du système aquifère à l'aide du modèle d'écoulement régional, tant pour les conditions actuelles que pour des scénarii de conditions en climat futur (section 7).

2.2 Données disponibles

Le tableau A9.1 à l'annexe 9 compile les données disponibles sur la région d'étude, notamment les données obtenues du MELCC et du MAPAQ. Certaines données supplémentaires ont aussi été demandées à Technorem qui a réalisé des travaux importants dans la région d'étude, notamment les coordonnées des puits répertoriés dans leurs rapports (Technorem, 2008a et 2008b). Enfin, certaines données hydrogéologiques (piézométrie, propriétés hydrauliques) et « historiques » ont été compilées, notamment les débits des puits municipaux recensés par Technorem (2008a et 2008b), Pontlevoy (2004) et Lavigne (2006).

La carte 2 montre la localisation des stations actives de suivi environnemental dans la région d'étude (stations météorologiques, puits d'observation et stations de jaugeage) alors que le tableau A9.2 (annexe 9) indique leurs coordonnées et la période des mesures disponibles. Trois principales stations météorologiques sont présentes dans la région d'étude (Sainte-Martine, La Prairie et Hemmingford Four Winds). Toutefois, l'estimation de la recharge historique a été faite en utilisant la grille météorologique produite par Info-Climat tandis que la quantité de recharge en climat futur a pu être évaluée à partir de données issues de 12 modèles climatiques fournis par Ouranos (voir section 5.4). L'annexe 4 donne des détails sur la grille météorologique et présente des graphiques et tableaux des normales climatiques pour les mailles de la grille couvrant les bassins versants des rivières de L'Acadie et Des Anglais.

Plusieurs puits d'observation du RSESQ (Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec) d'intérêt sont présents dans la région d'étude, notamment les deux puits indiqués au tableau A9.2 (annexe 9). La figure 2.2 montre l'hydrogramme du puits du RSESQ localisé dans la région de Saint-Rémi qui est influencé par les captages présents dans ce secteur, notamment les puits d'irrigation dont l'effet saisonnier est visible sur l'hydrogramme. Ce puits montre que le niveau piézométrique a baissé de 6 à 8 m depuis les années 1980, ce qui indiquerait un effet important des prélèvements sur les conditions hydrogéologiques de l'aquifère rocheux régional.

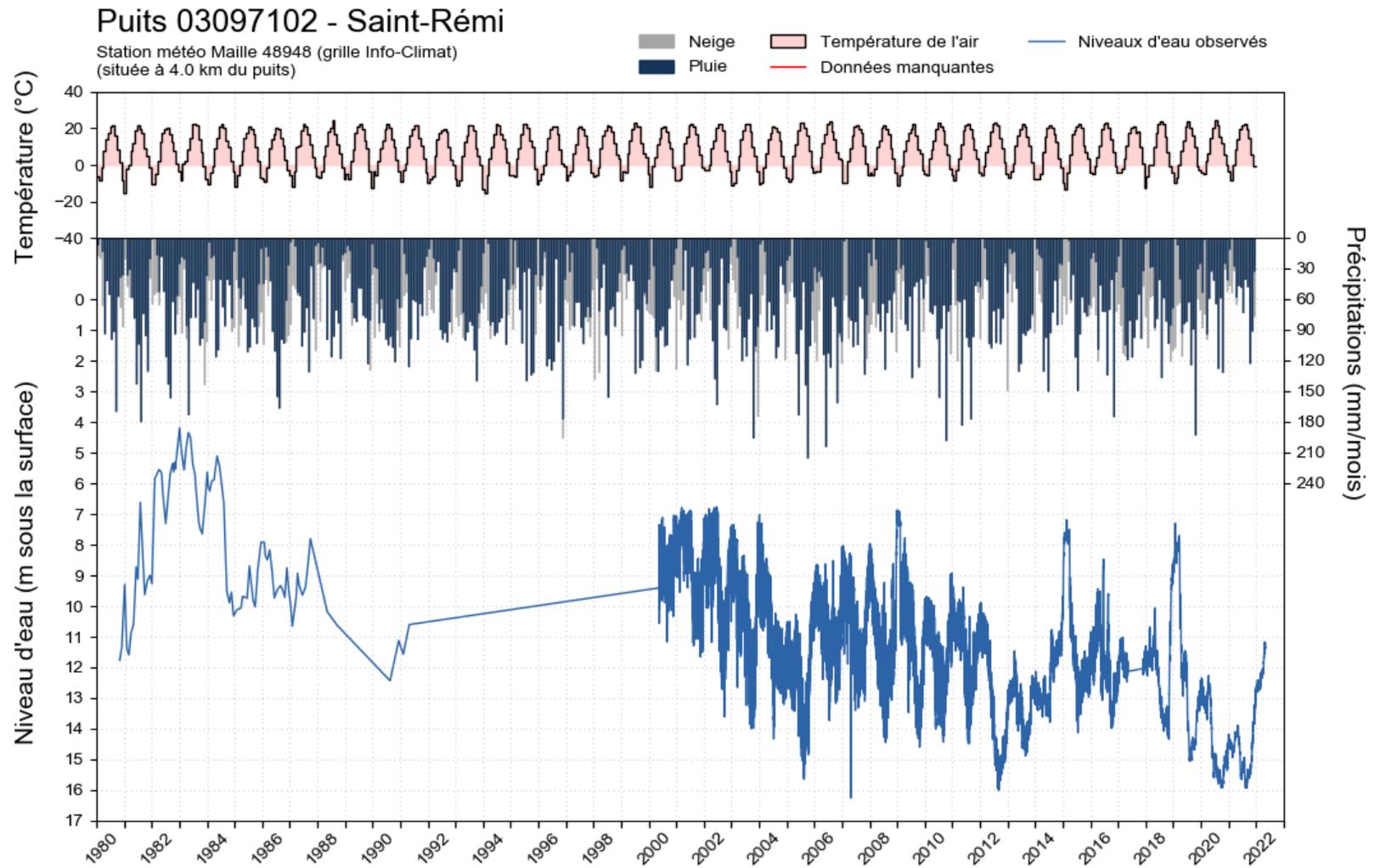


Figure 2.2. Hydrogramme du puits 03097102 du RSESQ à l'ouest de Saint-Rémi associé aux données météorologiques de la maille 48948 de la grille Info-Climat (centroïde de la maille situé à 4.0 km du puits).

3 CONTEXTE DE LA RÉGION D'ÉTUDE

3.1 Conditions générales

La carte 3 montre la topographie de la région d'étude qui est relativement plane. Un haut topographique à un peu plus de 70 m d'altitude est présent au sud et à l'est de Saint-Rémi et l'élévation est réduite dans toutes les directions, jusqu'à environ 50 m au sud où se trouve le ruisseau Norton, à environ 40 m à l'ouest en bordure de la rivière Châteauguay ainsi qu'à l'est en bordure de la rivière L'Acadie et à environ 25 m au nord près du fleuve Saint-Laurent. Le bassin versant de la rivière Des Anglais, incluant le ruisseau Norton, occupe la limite sud de la région d'étude, alors que la moitié ouest de la région fait partie du bassin de la rivière Châteauguay. L'important bassin de la rivière de L'Acadie recouvre la partie est de la région d'étude. Plusieurs bassins de taille plus réduite s'étendent vers le nord (rivières Saint-Régis, Suzanne, de la Tortue et Saint-Jacques).

La carte 4 montre l'utilisation du sol pour l'année 2017. La marge nord de la région d'étude en bordure du fleuve Saint-Laurent est fortement urbanisée, sauf pour Kahnawake dont le territoire est majoritairement boisé. On retrouve aussi des secteurs forestiers dans la partie sud de la région d'étude. Sinon, l'occupation du sol est majoritairement agricole, particulièrement au centre de la région où de 70 à 80% du territoire des municipalités est occupé par l'agriculture. Les cultures de soya et de maïs sont dominantes, mais les cultures maraîchères sont relativement importantes (autour de 10% des surfaces agricoles) dans certaines municipalités (Mercier, Saint-Constant, Sainte-Clotilde, Saint-Édouard, Saint-Isidore, Saint-Michel, Saint-Patrice-de-Sherrington et Saint-Rémi). Les secteurs où les cultures maraîchères sont présentes sont distingués sur la carte 4. Cette carte de l'utilisation du sol obtenue du MELCC semble toutefois sous-estimer la superficie du territoire des municipalités qui est dédié aux cultures maraîchères par rapport à la compilation des activités agricoles obtenue du MAPAQ (Ballard et al., 2021). Les secteurs identifiés comme étant dédiés aux cultures maraîchères de la carte 4 correspondent en partie aux endroits cartographiés comme ayant des sédiments de marécage ou organiques sur la carte des dépôts meubles (carte 5).

3.2 Hydrostratigraphie

La figure 3.1.a montre la séquence stratigraphique complète des dépôts meubles qui se retrouvent dans la région d'étude telle qu'établie par Tremblay et al. (2010) (détails dans Tremblay, 2008). Toutefois, pour les fins des études hydrogéologiques, cette séquence peut être considérablement simplifiée. La figure 3.1.b montre la séquence hydrostratigraphique considérée par Croteau et al. (2010) pour le bassin de la rivière Châteauguay (détails dans Croteau, 2006). C'est la même hydrostratigraphie simplifiée qui a été considérée pour le développement du modèle numérique d'écoulement local représentant le site des anciennes lagunes de Mercier ainsi que pour le modèle d'écoulement régional développé dans le cadre du présent mandat. De la base au sommet, la séquence de dépôts meubles est composée de till peu perméable, d'argile marine très peu perméable et d'alluvions. Localement, des sédiments fluvio-glaciaires (esker) érodent le till et sont partiellement recouverts par l'argile.

La topographie de la surface du roc contrôle l'épaisseur et la nature des dépôts meubles retrouvés en surface (carte 5). La section 4 décrit le modèle géologique 3D qui a été développé pour représenter la distribution spatiale de l'épaisseur des différentes unités.

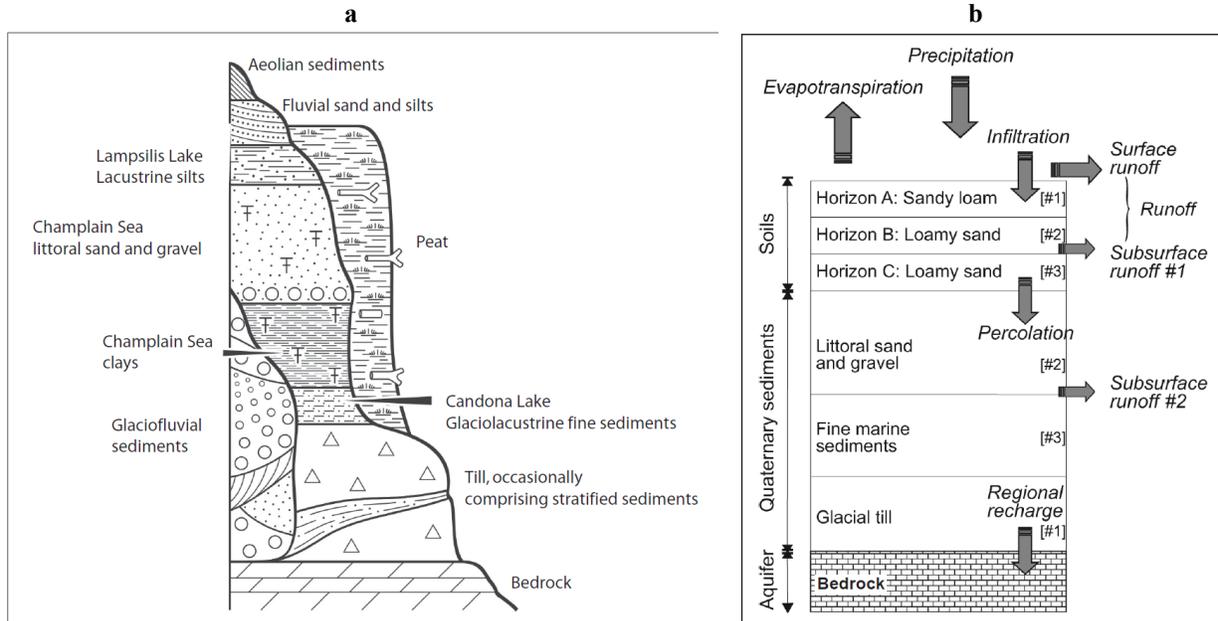


Figure 3.1. Stratigraphie détaillée des dépôts meubles (a : Tremblay et al., 2010) et hydrostratigraphie des dépôts meubles dans la région d'étude (b : Croteau et al., 2010).

Tel que mentionné précédemment, Tremblay (2008) a développé un modèle géologique 3D des dépôts meubles couvrant le bassin versant de la rivière Châteauguay. En fait, ce modèle excède les limites du bassin (figure 2.1) car il a servi de base à l'estimation de la recharge par Croteau et al. (2010) qui a aussi servi d'intrant dans le modèle numérique d'écoulement de Lavigne et al. (2010). Ce modèle géologique couvre tout le territoire du modèle numérique d'écoulement présentement en voie de réalisation pour évaluer les concepts de contrôle de la contamination émise par le site des anciennes lagunes de Mercier (polygone vert pâle à la figure 1.1). D'importants travaux de caractérisation géophysique et hydrogéologique ont toutefois été réalisés récemment dans le secteur du site contaminé, ce qui fait qu'un nouveau modèle géologique à haute résolution a été développé pour les fins du développement du modèle numérique d'écoulement (rectangle vert foncé à la figure 1.1). Ce nouveau modèle géologique utilise la même hydrostratigraphie simplifiée que Croteau et al. (2010) visible sur la figure 3.1.b. Toutefois, ce modèle géologique ne couvre pas tout le territoire de la région d'étude. Ce modèle géologique récent a aussi une résolution spatiale détaillée qui n'est pas requise dans le cadre des travaux documentés dans le présent rapport.

Un autre modèle géologique développé par la Commission géologique du Canada (CGC) couvre tout le sud du Québec (Nastev et al., 2016a et 2016b). Ce modèle a généralement une faible résolution spatiale et une précision limitée, mais il est plus précis dans la région d'étude car il est basé sur les travaux réalisés dans le bassin de la rivière Châteauguay (Tremblay, 2008) ainsi que du PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013) auxquels la CGC a participé.

3.3 Propriétés hydrauliques

La carte 6 montre la géologie du roc dans la région d'étude qui se trouve à l'intérieur de la Plateforme du Saint-Laurent. L'aquifère régional est constitué de roc sédimentaire peu déformé mais fracturé du Paléozoïque inférieur. Lavigne et al. (2005) ont montré que la conductivité hydraulique des unités géologiques de la région d'étude est similaire. Laurencelle (2018) a défini un profil de conductivité hydraulique qui diminue avec la profondeur, passant de valeurs de l'ordre de 10^{-5} m/s dans la partie supérieure du roc jusqu'à des valeurs de l'ordre de 10^{-9} m/s à 100 m de profondeur. Lavigne et al. (2005) ont obtenu une conductivité hydraulique K moyenne de 5.1×10^{-5} m/s sur la base d'une compilation des essais hydrauliques disponibles sur l'ensemble du bassin de la rivière Châteauguay. La moyenne géométrique des 281 valeurs de K compilées par Technorem (2008a et 2008b) est de 3.7×10^{-5} m/s, pour une région un peu plus restreinte que la présente région d'étude. Toutefois, les valeurs de K compilées par Lavigne et al. (2005) ainsi que Technorem (2008a et 2008b) variaient considérablement entre 10^{-6} et 10^{-3} m/s. Le tableau 3.1 présente une compilation des données de K des matériaux sédimentaires (section 3.2) et du roc.

Tableau 3.1. Compilation des conductivités hydrauliques des sédiments et du roc des études antérieures.

Source	K_h						
	Alluvion	Argile	Esker	Till remanié	Till compact	Roc fracturé	Roc sain
Modèle Maxime	5.0E-05	6.0E-08	2.0E-04	5.0E-06	-	5.0E-05	1.0E-07
Modèle régional Pontlevoy	-	5.1E-10	2.2E-04	1.3E-05	1.7E-08	2.2E-05	-
Modèle local Pontlevoy	-	5.0E-10	2.1E-04	1.1E-05	1.7E-08	2.2E-06	-
Modèle Lavigne	-	-	-	-	-	5.0E-05	2.3E-05
Modèle Technorem	-	6.0E-08	2.0E-04	5.0E-06	-	2.8E-05	-
Mesures Paradis	2.9E-04	-	2.8E-04	1.8E-05	1.1E-05	1.8E-05	-
Moyenne géométrique	1.2E-04	5.5E-09	2.2E-04	9.3E-06	1.1E-05	2.0E-05	2.3E-05
Minimum	5.0E-05	5.0E-10	2.0E-04	5.0E-06	1.1E-05	2.2E-06	2.3E-05
Maximum	2.9E-04	6.0E-08	2.8E-04	1.8E-05	1.1E-05	5.0E-05	2.3E-05

Source	K_v						
	Alluvion	Argile	Esker	Till remanié	Till compact	Roc fracturé	Roc sain
Croteau	2.8E-02	1.2E-09	3.4E-03	1.3E-04	4.5E-08	-	-
Modèle Maxime	5.0E-05	6.0E-09	2.0E-05	5.0E-08	-	5.0E-06	1.0E-07
Modèle local Pontlevoy	-	1.0E-11	2.1E-04	1.1E-05	1.7E-09	2.2E-06	-
Modèle Lavigne	-	-	-	-	-	1.0E-06	1.7E-07
Modèle Technorem	-	-	-	-	-	-	-
Mesures Paradis	5.1E-06	-	1.3E-05	4.6E-08	5.2E-07	2.9E-07	-
Moyenne géométrique	1.9E-04	4.1E-10	1.2E-04	1.4E-06	1.5E-07	1.3E-06	1.7E-07
Minimum	5.1E-06	1.0E-11	1.3E-05	4.6E-08	4.5E-08	2.9E-07	1.7E-07
Maximum	2.8E-02	6.0E-09	3.4E-03	1.3E-04	5.2E-07	5.0E-06	1.7E-07

Le tableau 3.1 compile les valeurs de conductivité hydraulique horizontale K_h et verticale K_v provenant de nombreuses sources et donne la moyenne géométrique ainsi que les valeurs maximales et minimales des valeurs compilées. Cette compilation recense les valeurs de K utilisés dans des modèles numériques couvrant l'ensemble ou une partie de la région d'étude : le modèle numérique en voie de réalisation pour évaluer les options de contrôle hydraulique en remplacement de l'actuelle UTES au site des anciennes lagunes de Mercier (« Modèle Maxime » ; Claprod et al., 2021), le modèle régional qui couvrirait un secteur similaire au nouveau modèle des anciennes lagunes de Mercier (« Mod. régional Pontlevoy » ; Pontlevoy, 2004), un modèle plus local du site des anciennes lagunes de Mercier (« Mod. local Pontlevoy » ; Pontlevoy, 2004), un modèle régional ayant couvert l'ensemble du bassin de la rivière Châteauguay (« Modèle Lavigne » ; Lavigne, 2006), et un modèle ayant couvert le centre de l'actuelle région d'étude (« Modèle Technorem » ; Technorem, 2008a et 2008b). Le tableau considère aussi des mesures récentes de la conductivité hydraulique qui ont été faites dans le secteur des anciennes lagunes de Mercier (« Mesures Paradis » ; Paradis et Gloaguen, 2021). Une version détaillée de cette compilation de valeurs de conductivité hydraulique est fournie dans le fichier Excel « *DonneesdeBaseModele9.xlsx* » en annexe électronique. Ces valeurs de conductivité hydraulique ont servi de base pour l'assignation des propriétés des unités dans le modèle hydrogéologique régional (section 7.5) ainsi que pour définir une « enveloppe » des valeurs plausibles de K pour chaque unité.

3.4 Piézométrie et conditions d'écoulement

Une carte piézométrique de l'aquifère rocheux a été produite. Une telle carte est nécessaire à la fois pour contraindre le modèle numérique d'écoulement et aussi pour estimer la recharge avec le modèle d'infiltration HELP. Cette carte couvre donc tout le territoire considéré pour les travaux, soit la zone d'estimation de la recharge qui déborde du secteur couvert par le modèle numérique régional (figure 2.1). L'annexe 2 donne les détails de la procédure suivie pour produire la carte piézométrique.

La figure A2.1 (annexe 2) montre le secteur délimité pour extraire les données de niveau de nappe. Ce secteur considère les limites de la zone d'évaluation de la recharge qui englobe les limites du modèle numérique régional d'écoulement. Afin d'éviter les effets de bordure dans l'interpolation de la surface piézométrique, une zone d'extraction rectangulaire de 71 750 m (en longitude) par 79 000 m (en latitude) a donc tenu compte d'une zone tampon de 10 km autour de la zone d'évaluation de la recharge avec HELP.

Puisque les données réfèrent généralement à la profondeur du niveau d'eau souterraine par rapport à la surface du sol, il est nécessaire de rattacher ces données à l'élévation de la surface du sol afin d'obtenir des valeurs d'élévation du niveau de l'eau souterraine. Ainsi, à partir de trois sources de données d'élévation, une altitude de référence a été retenue pour chaque point de niveau d'eau en se basant sur l'ordre de priorité suivant : (1) arpentage, (2) LiDAR 1 m et (3) MNE SRTM 90 m.

Neuf bases de données (BD) sont disponibles dans le secteur d'extraction des données de niveau de nappe. Le tableau A2.1 donne un aperçu de l'ensemble des 13 281 données recensées alors que la figure A2.2 montre leur distribution spatiale dans le secteur d'extraction. Il a toutefois été nécessaire d'enlever les doublons correspondant à des puits multiniveaux où plusieurs niveaux d'eau souterraine étaient à la même localisation, ce qui a réduit le nombre de puits à 13 270 (tableau A2.2). Le tableau A2.3 compile les données en fonction de leur fiabilité. Enfin, pour sélectionner les données les plus représentatives, une analyse statistique des mesures de profondeur d'eau a été faite afin d'éliminer les données extrêmes qui ne semblent pas représenter le comportement réel de

la nappe. D'abord, ce ne sont que les puits au roc qui sont d'intérêt pour définir la piézométrie de l'aquifère rocheux. Ensuite, les données avec un niveau d'eau excédant 15 m de profondeur ont été jugées non représentatives. Enfin, cette analyse a montré des différences notables entre les données au Québec par rapport à celles aux États-Unis. Ainsi, pour la production du variogramme, seules les données des puits ouverts au roc situés au Québec dont la profondeur d'eau est inférieure à 15 m/sol ont été conservées. Sur les 11 152 données au roc de la province, cela supprime 269 points tout en conservant donc 10 883 données pour l'analyse (tableau A2.5).

Le choix a été fait d'interpoler les niveaux d'eau souterraine par krigeage. Compte tenu de la forte corrélation entre l'élévation du niveau d'eau et la topographie (figures A2.12b et A2.13b), le krigeage ordinaire ainsi que le krigeage avec dérive externe reliée à la topographie ont été testés. Le modèle numérique d'élévation (MNE) avec 90 m de résolution disponible pour tout le secteur considéré a été utilisé comme dérive externe. Le logiciel SGeMS a été utilisé à la fois pour la variographie et le krigeage (Remy et al., 2009). L'ajustement d'un modèle analytique a été fait à partir du variogramme expérimental produit avec les 10 883 données retenues pour les puits au roc situés au Québec (figure A2.14 et tableau A2.6). L'interpolation par krigeage a ensuite été appliquée sur l'ensemble des points au roc retenus (soient ceux au Québec et aux États-Unis). Au total, 12 interpolations ont été testées en faisant varier les paramètres de l'ellipse de recherche : trois gammes de rayon de recherche (4 000, 6 000 et 8 000 m) combinées à deux gammes de nombre de voisins (3 à 12 et 5 à 10). Ces divers paramètres ont été appliqués à la fois sur un krigeage ordinaire, utilisant donc uniquement les 12 639 données d'entrée (mesures du niveau de nappe), et un krigeage avec dérive externe ajoutant alors de l'information sur la topographie en plus des données d'entrée. Comme la piézométrie ne présente pas de structure particulière, l'ellipse de recherche est isotrope et correspond donc à un cercle (tableau A2.7).

Afin de retenir l'interpolation représentant le plus fidèlement possible les conditions d'écoulement de l'eau souterraine dans le roc sur le territoire tout en minimisant les erreurs associées au processus d'interpolation, une stratégie de vérification des résultats en trois étapes a été appliquée : (1) évaluation de la performance du modèle par validation croisée, (2) estimation des erreurs sur la profondeur de la nappe par comparaison avec la topographie, puis (3) visualisation de l'allure de la surface piézométrique modélisée via des coupes transversales. La représentation de la surface piézométrique selon le type de krigeage appliqué (ordinaire ou avec dérive externe) indique que le krigeage ordinaire traduit mieux le comportement attendu de la surface piézométrique. Toutefois, le krigeage avec dérive externe offre une meilleure retranscription du niveau piézométrique aux États-Unis par rapport au krigeage ordinaire. Afin de profiter des points forts de chaque méthode d'interpolation et de réduire les biais, il a été décidé de conserver les résultats du krigeage ordinaire sur le territoire québécois et de considérer les résultats du krigeage avec dérive externe sur la portion sud de la zone correspondant au territoire américain. Cette procédure a déjà été appliquée pour produire la carte piézométrique de l'aquifère régional de roc fracturé dans le cadre du PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013). Les deux cartes interpolées retenues ont alors été assemblées en conservant les résultats du krigeage ordinaire pour la partie nord (au Québec) et les résultats du krigeage avec dérive externe basé sur la topographie pour la partie sud (aux États-Unis). Afin d'adoucir la transition entre les deux cartes au niveau de la frontière, la moyenne de la hauteur piézométrique estimée avec les deux types de krigeage a été calculée pour les 102 mailles de la grille d'interpolation situées aux États-Unis et couverte par le LiDAR. La combinaison des deux cartes permet de réduire la proportion de zones où le niveau piézométrique dépasse la surface du

sol. Ces erreurs d'interpolation peuvent être reliées à des secteurs sans données. Afin de s'affranchir de ces biais, l'élévation du niveau piézométrique a été ramenée à l'élévation du sol pour les mailles où la surface piézométrique est supérieure à la topographie.

La carte piézométrique finale du roc est présentée à la figure A2.26 ainsi que sur la carte 7. Régionalement, la piézométrie un gradient orienté du sud au nord, avec des niveaux élevés dans le massif montagneux des Adirondacks aux États-Unis (> 200 m/NMM) et les niveaux généralement les plus faibles en bordure du fleuve Saint-Laurent au nord (< 25 m/NMM). Le niveau piézométrique est également faible à l'ouest en bordure de la rivière Châteauguay (< 35 m/NMM). Les bas piézométriques d'importance (< 0 m/NMM) correspondent à plusieurs carrières localisées au nord de la zone d'étude entre Saint-Rémi et Saint-Constant (indiquées sur la figure A2.29).

Le patron d'écoulement de la nappe suit donc globalement les structures topographiques et les cours d'eau drainent une bonne partie de la nappe. C'est notamment le cas au nord du Mont Covey Hill où de nombreuses ramifications de cours d'eau témoignent de plusieurs résurgences de l'eau souterraine. Une situation similaire est observée en relation avec le dôme piézométrique présent au sud-est de Saint-Rémi où plusieurs tronçons initiaux de cours d'eau pourraient indiquer l'émergence d'eau souterraine au nord du dôme piézométrique. À l'est de la zone d'évaluation de la recharge, la rivière de L'Acadie draine une bonne partie des eaux souterraines alors que la rivière Châteauguay constitue l'autre axe de drainage majeur à la limite ouest de cette zone. Au centre de la zone du modèle d'écoulement local de Mercier, la rivière de l'Esturgeon constitue l'axe de drainage principal du système d'écoulement. C'est la rivière des Fèves qui forme la limite sud de cette zone restreinte tandis que la rivière Châteauguay constitue l'exutoire principal des eaux souterraines à l'ouest.

Des lignes de partage des eaux souterraines recoupent également la zone d'étude. L'une d'elles traverse d'est en ouest la partie nord du modèle d'écoulement local entre Mercier et Saint-Rémi. Ainsi, les flux au nord de cette ligne sont dirigés vers le nord et ceux au sud vers la rivière l'Esturgeon. Une ligne de partage des eaux souterraines majeure est localisée au centre du territoire et marque la présence d'un dôme piézométrique (délimité sur la figure A2.28) au sud et à l'est de Saint-Rémi à partir duquel l'écoulement des eaux souterraines se fait de façon radiale. Ce dôme piézométrique est d'ailleurs mis en évidence sur les coupes A (figure A2.30) et D (figure A2.33). Sur ces deux coupes ainsi que sur les coupes B (figure A2.31) et C (figure A2.32), la connexion entre les cours d'eau principaux et la nappe est bien visible de même que le contrôle de la topographie sur l'allure de la piézométrie qui suit généralement les variations topographiques en surface. L'interface entre les dépôts meubles et le roc est également indiquée sur les quatre coupes (figures A2.30 à A2.33). Cette surface a été extraite à partir du modèle géologique produit dans le cadre de la présente étude. De même, les conditions de confinement établies par Croteau (2006) sont aussi précisées sur les coupes.

La carte finale de la piézométrie du roc s'appuie sur de nombreuses données dont les processus de tri et de traitement ont permis de produire à une carte jugée représentative des conditions d'écoulement de la nappe dans l'aquifère rocheux régional. La validation croisée a permis de minimiser les erreurs liées au krigeage et les diverses étapes de vérification visuelle (via les coupes et les cartes) des niveaux piézométriques et des profondeurs d'eau ont assuré la meilleure représentativité des résultats. La comparaison avec les études antérieures (figures A2.34 et A2.35) témoigne de la cohérence de la carte piézométrique qui couvre tout le territoire des présents travaux, contrairement aux cartes préalablement disponibles.

3.5 Usages de l'eau souterraine dans la région d'étude

Dans le cadre de nos précédents travaux (Ballard et al., 2021), une estimation a été faite des usages de l'eau dans la région d'étude (tableau 3.2). L'usage total de l'eau dans la région d'étude est évalué à 46.2 Mm³/an, dont 41% des prélèvements proviennent de l'eau souterraine (18.8 Mm³/an) et 59% des eaux de surface (27.4 Mm³/an). Les usages de l'eau sont à 40% résidentiels (18.7 Mm³/an), 47% industriel-commercial-institutionnel (ICI) (21.7 Mm³/an) et 13% agricoles (5.8 Mm³/an). Les prélèvements totaux en eau souterraine de 18.8 Mm³/an sont utilisés pour des usages à 32% résidentiels (6.0 Mm³/an), 51% ICI (9.6 Mm³/an) et 17% agricoles (3.2 Mm³/an). Les usages ICI de l'eau souterraine sont en grande partie attribuables aux carrières alors que les usages agricoles sont dominés par l'irrigation des cultures maraîchères (71%).

Tableau 3.2. Estimation des prélèvements d'eau dans la région d'étude.

Source des prélèvements totaux (Mm ³ /an)			
Souterrain	Surface		Total
18.8	27.4		46.2
41%	59%		100%
Utilisation des prélèvements totaux (Mm ³ /an)			
Résidentiel	ICI	Agricole	Total
18.7	21.7	5.8	46.2
40%	47%	13%	100%
Utilisation de l'eau souterraine (Mm ³ /an)			
Résidentiel	ICI	Agricole	Total
6.0	9.6	3.2	18.8
32%	51%	17%	100%
Utilisation de l'eau de surface (Mm ³ /an)			
Résidentiel	ICI	Agricole	Total
12.6	12.1	2.6	27.4
46%	44%	10%	100%

Comme l'indiquent le tableau 3.3 et la figure 3.2, nos estimations des prélèvements d'eau souterraine à des fins résidentielles et agricoles sont du même ordre que celles de Technorem (2008a et 2008b) et du projet RADEAU 1 (Ageco, 2019), mais notre estimation des prélèvements ICI est plus élevée et appuyée par les données sur les Grands préleveurs d'eau (GPE) qui n'étaient pas disponibles lors des études antérieures. Nos travaux précédents avaient estimé que l'ensemble des usages de l'eau souterraine utilisent près de 30% de la recharge dans l'aquifère rocheux (Ballard et al., 2021). À la suite de la nouvelle estimation de la recharge (section 5), la section 6 détaille la proportion de la recharge à laquelle correspondent les prélèvements d'eau souterraine dans la région d'étude. À l'aide de la modélisation numérique, la section 7 indique l'effet de ces prélèvements sur le niveau de la nappe ainsi que l'effet de chaque type de prélèvement.

La carte 8 présente les prélèvements totaux d'eau souterraine qui ont été estimés à l'échelle municipale. L'annexe 7 compile l'estimation des différents types d'usage à l'échelle municipale. Afin de préciser la distribution spatiale des pressions sur la ressource en eau souterraine, l'usage de l'eau souterraine à l'échelle intramunicipale a été spatialisé grâce au développement récent d'un indicateur intramunicipal sur grille (Huchet et al., 2021). Cette approche permet de répartir quatre types d'usage sur le territoire : (1) usage total réseau, (2) usage agricole hors réseau, (3) usage ICI hors

réseau et (4) usage résidentiel hors réseau. La carte 9 révèle ainsi les secteurs où l’usage de l’eau souterraine est localement important permettant ainsi d’identifier les types de prélèvements d’importance et de vérifier les potentiels conflits d’usage.

Tableau 3.3. Comparaison de l’estimation de l’INRS des prélèvements d’eau souterraine (Mm³/an) dans la région d’étude avec les estimations de Technorem (2008a et 2008b) et de RADEAU 1 (Ageco 2019).

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

Prélèvements annuels d'eau souterraine

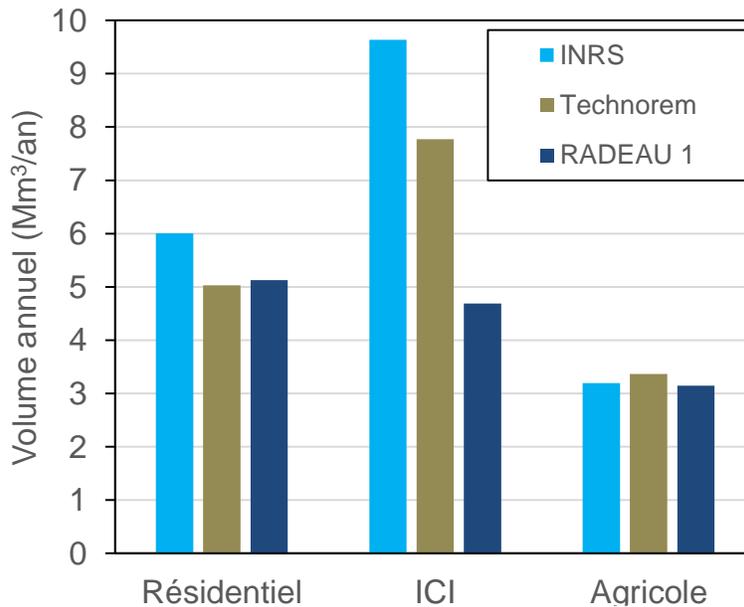


Figure 3.2. Comparaison de l’estimation des prélèvements annuels d’eau souterraine par catégorie d’usage de la présente étude (INRS) par rapport aux estimations de Technorem (2008a et 2018b) et de RADEAU 1 (Ageco, 2019).

Sur la région d’étude, la répartition de l’usage total de l’eau souterraine est hétérogène (carte 10). Plusieurs zones sous pression ont un niveau d’usage qui excède 20 000 m³/an/km² (équivalent à 20 mm/an) : (1) un axe est-ouest incluant les municipalités de Mercier, Saint-Isidore, Saint-Rémi et Saint-Michel où les usages sont diversifiés (piège hydraulique de l’UTES, captages municipaux, usages agricoles, usage résidentiel et même un GPE ICI) ; (2) plusieurs prélèvements ICI ponctuels qui sont reliés aux carrières ; et (3) une zone d’usage agricole au sud de la municipalité de Saint-Constant.

4 MODÈLE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL 3D

Cette section décrit le modèle géologique 3D qui a été développé pour représenter la distribution spatiale de l'épaisseur des différentes unités des sédiments meubles de la région à l'étude. La carte de la figure 1.1 montre l'étendue du nouveau modèle géologique 3D des dépôts meubles qui couvrent une superficie de 2 508 km². Une partie du nouveau modèle s'étend au-delà de la frontière avec les États-Unis afin de couvrir au complet les bassins hydrologiques jaugés des rivières Des Anglais et de L'Acadie et qui sont nécessaires à la calibration de la recharge. Dans le rapport sur les travaux de Saint-Rémi (Ballard et al., 2021), un premier modèle géologique a été produit afin de permettre de compiler les données de recharge provenant de Croteau (2006). Ce modèle avait été produit en combinant le modèle de la CGC (Nastev et al., 2016a et 2016b) avec le nouveau modèle géologique de Mercier (Claprood et al., 2021). Le modèle de la CGC avait été choisi parce qu'il couvrait toute la zone d'étude jusqu'à la frontière avec les États-Unis. Cependant, ce modèle ne représentait pas les détails stratigraphiques des modèles plus locaux. La création d'un nouveau modèle est justifiée afin d'obtenir un modèle plus réaliste et plus détaillé au niveau de la stratigraphie, notamment dans les secteurs de Saint-Rémi et de Mercier. Ce modèle géologique servira ensuite de base au développement d'un modèle hydrogéologique (section 7).

4.1 Données stratigraphiques disponibles

Le nouveau modèle géologique a été construit en combinant les modèles existants extraits sur un maillage de 250 m et complété par des données ponctuelles. Le tableau 4.1 présente l'ensemble des sources de données utilisées pour construire le modèle géologique. La carte de la figure 4.1 montre l'étendue des quatre différents modèles géologiques existants sur la zone d'étude ainsi que le secteur non couvert par ces modèles avec la position des données de forage. Les quatre modèles existants comprennent le nouveau modèle haute résolution de Mercier (Claprood et al., 2021), le modèle développé par Tremblay (2008) sur la partie québécoise du bassin de la rivière Châteauguay, le modèle utilisé par Croteau (2006) aux États-Unis dans le cadre de l'estimation de la recharge et le modèle développé dans le cadre du PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013).

Les travaux de Tremblay (2008) et le modèle géologique 3D qu'il a développé ont servi de base pour la construction du nouveau modèle géologique puisqu'il constitue le modèle le plus détaillé et le plus étendu sur la région à couvrir avec le nouveau modèle géologique. Pour réaliser son modèle, Tremblay (2008) a combiné les données de plusieurs sources provenant de la base de données ministérielle (SIH - Système d'information hydrogéologique), des données de géophysique en sismique réflexion, des données de forage portable (*Pionjar*) dans les matériaux mous et différents rapports privés ou de consultants. Tremblay (2008) a aussi utilisé la carte des dépôts meubles (Tremblay et Lamothe, 2005) pour contrôler le modèle 3D développé.

En plus du modèle de Tremblay (2008), le nouveau modèle géologique est construit à partir de trois autres modèles existants. Le modèle géologique de Croteau (2006) couvre la partie de notre modèle située aux États-Unis et ce modèle est en fait le même modèle que celui de Tremblay (2008). Le modèle géologique produit dans le cadre du PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013) couvre le bassin de la rivière de L'Acadie à l'est du secteur d'intérêt. Le nouveau modèle géologique à haute résolution de Mercier mis à jour en septembre 2021 (Claprood et al., 2021) a été développé à partir du modèle de Tremblay (2008) en y intégrant aussi de nouvelles données de forages et de levés géophysiques. Pour le secteur où il est disponible, ce nouveau modèle est substitué au modèle de Tremblay (2008).

Le tableau 4.2 montre qu'ensemble, les modèles de Tremblay (2008) et de Croteau (2006) couvrent 51% du nouveau modèle, alors que les modèles du PACES Montérégie Est et de Mercier couvrent respectivement 35% et 8% de la superficie. Seulement 5% de la zone d'étude n'est pas couverte par un modèle géologique existant et cette partie du nouveau modèle géologique doit être développée à partir des données de forage provenant principalement du SIH et de quelques forages du MTQ. Ces données ont ainsi permis de combler la partie nord-est du modèle, en aval des sous-bassins des rivières Saint-Jacques et Saint-André (figure 4.1). En plus des modèles existants, des localisations d'affleurements provenant des projets de Technorem et du PACES Montérégie Est ont aussi été utilisées pour développer le nouveau modèle géologique.

Tableau 4.2. Pourcentage de couverture du nouveau modèle géologique par les modèles existants.

Sources de données	Couverture de la zone d'étude (%)
T. Tremblay	43
A. Croteau (USA)	8
PACES Montérégie Est	35
Modèle Mercier (2021)	8
BD H1	5
Total	100

La topographie du nouveau modèle géologique a été définie par le modèle numérique de terrain (MNT) provenant des levés LiDAR pour la partie canadienne de la zone d'étude et du levé SRTM de la NASA pour la partie aux États-Unis. La carte de la géologie du Quaternaire (Parent et al., 2017) a aussi servi à contraindre la géologie provenant de la combinaison des modèles existants.

4.2 Traitement et intégration des données stratigraphiques

La stratigraphie des dépôts quaternaires de la région d'étude est relativement complexe et le développement d'un modèle géologique 3D nécessite de la simplifier au préalable. Les données des modèles géologiques existants et les données de forage ont donc été traitées afin de représenter la stratigraphie avec une séquence de quatre unités résumées au tableau 4.3, soit de la base au sommet : (1) le till qui est en contact avec le roc ; (2) des sédiments fluvio-glaciaires qui ne sont présents que par endroits, comme dans l'esker de Mercier, et qui peuvent avoir érodé le till, parfois jusqu'au roc, et qui peuvent aussi être partiellement recouverts par l'argile ; (3) une unité de sédiments fins (argile et silt) présente dans les bas topographiques ; et (4) des alluvions ou d'autres types de matériaux, notamment en bordure de cours d'eau.

Tableau 4.3. Structure stratigraphique du nouveau modèle géologique.

Séquence	Unité	Note
4	Matériel sus-jacent (à l'argile)	Regroupe surtout les alluvions et les dépôts organiques
3	Dépôts glacio-lacustres ou glacio-marins argileux ou argilo-silteux	-
2	Matériel sous-jacent (à l'argile)	Regroupe surtout les séd. fluvio-glaciaires (esker de Mercier) ainsi que des séd. alluviaux sablo-graveleux, par exemple à la base du flanc nord du Mont Covey Hill
1	Till	-

Le tableau 4.4 décrit les unités originales des modèles géologiques existants et la façon dont ces unités ont été combinées selon les quatre unités du nouveau modèle géologique (tableau 4.3). Le tableau indique aussi le format des données et la façon dont elles ont été extraites sur le maillage du nouveau modèle (mailles carrées au 250 m). Les modèles de Tremblay (2008) et de Croteau (2006) comprenaient 10 unités de matériaux qui ont été regroupées selon leur nature et leur position par rapport à l'argile, soit les matériaux sus-jacents à l'argile incluant les alluvions, les matériaux organiques et les remblais. Les matériaux sous-jacents à l'argile comprennent les matériaux fluvio-glaciaires (Gx) et aussi les dépôts littoraux (Mb) composés de sables et graviers déposés sur le piémont du Mont Covey Hill. Le till constitue l'unité à la base de la séquence du modèle géologique et les matériaux sous-jacents à l'argile sont toujours situés directement sur le till.

Tableau 4.4. Compilation des données stratigraphiques en format simplifié.

Sources	Structure originale des données	Regroupement des classes de matériaux	Format des données
Modèle de Tremblay (2008)	10 couches classées selon les codes CGC : Rem, O, A, Lb, SiAS Mb, Ma, Gs, Gx, Till	1-Sus-jacent : Rem, O, A, Lb, SiAS Mb 2- Argile : Ma 3- Sous-jacent : Gs, Gx 4- Till	Fichier XY, Z des épaisseurs, maillage original 250 m
Modèle de Croteau (2006) aux É.-U.	10 couches classées selon les codes CGC : Rem, O, A, Lb, SiAS Mb, Ma, Gs, Gx, Till	1-Sus-jacent : Rem, O, A, Lb, SiAS Mb 2- Argile : Ma 3- Sous-jacent : Gs, Gx 4- Till	Fichier XY, Z des épaisseurs, maillage original 250 m
Données synthétiques É.-U.	Basé sur l'interpolation des données de Croteau	1-Sus-jacent : Rem, O, A, Lb, SiAS Mb 2- Argile : Ma 3- Sous-jacent : Gs, Gx 4- Till	Interpolation des épaisseurs et extraction sur maillage 250 m
Modèle Mercier (Claprood et al., 2021)	3 couches qui regroupent le matériel : 1- l'argile, 2- sous-jacent perméable de l'esker) et 3- le till	Aucune compilation, les données sont reproduites tel quelle sans traitement ni modification	Fichier XY, Z épaisseur du modèle Mercier sur maillage 250 m du nouveau modèle
PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013)	3 couches qui regroupent le matériel, 1- sus-jacent (à l'argile), 2- l'argile, 3- sous-jacent (à l'argile) (le till)	Aucune compilation, les données sont reproduites tel quelle sans traitement ni modification	Extraction des cellules d'épaisseurs sur le nouveau maillage 250 m
BD SIH et MTQ	Format CGC présentés en épaisseur	Données compilées en 4 couches qui regroupent le matériel, 1- sus-jacent (à l'argile), 2- l'argile, 3- sous-jacent (à l'argile), 4- le till	Données ponctuelles (3502 points)
Affleurements du PACES ME et Technorem (2008a et 2008b)	Utilisation des données originales, épaisseur des couches à 0	Imposition à 0 mètre d'épaisseur	Données ponctuelles (299 et 361 points)

Les modèles géologiques de Mercier (Claprood et al., 2021) et du PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013) ont des structures similaires à la séquence simplifiée du nouveau modèle géologique mais ne considèrent que trois unités. Pour le modèle de Mercier, ces unités sont de la surface à la base : l'argile, le matériel perméable sous-jacent à l'argile (esker de Mercier) puis le till. Pour le modèle du PACES Montérégie Est, de la surface à la base, les unités sont les suivantes : le matériel sus-jacent à l'argile, l'argile et le matériel sous-jacent à l'argile défini comme étant le till.

Pour compléter les jeux de données, les descriptions de forages provenant du SIH et du MTQ ont été transformées selon le format du code CGQ puis regroupés en unités simplifiées du nouveau modèle (sus-jacent, argile, sous-jacent et till). La standardisation des descriptions de matériaux selon le code CGQ du Centre géoscientifique de Québec (Parent et al., 2008) permet d'uniformiser l'information sur les matériaux et de les associer plus facilement aux unités géologiques. Les données ponctuelles comprennent aussi les localisations des affleurements répertoriés par Technorem (2008a et 2008b) et par le PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013).

4.3 Construction du modèle géologique 3D

En utilisant la stratigraphie simplifiée résumée au tableau 4.3, le nouveau modèle géologique a été construit du bas vers le haut à partir de l'élévation de la surface du roc et en ajoutant successivement les épaisseurs des quatre unités de dépôts meubles jusqu'à la surface du sol. D'abord, l'épaisseur totale des dépôts meubles de chaque modèle existant a été utilisée pour calculer l'élévation du toit du roc en utilisant la topographie de la surface du sol définie, au Canada, par le modèle numérique de terrain issu du LiDAR et, aux États-Unis, par le SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) de la NASA. Le traitement des données pour créer le nouveau modèle a été réalisé dans un tableur Excel qui regroupe toutes les données originales utilisées avec les étapes de compilation pour chacune des sources de données (voir annexe 3 pour plus de détails et au besoin consulter le fichier « *Compilation_Modele_Geologique.xlsx* »).

Pour la compilation, les données stratigraphiques de chaque modèle existant ont été extraites sur les points d'une grille aux 250 m. Les données ont été combinées et traitées dans un tableur Excel qui garde la trace de la source et de la description originale de la géologie détaillée avant la simplification de la stratigraphie en quatre unités du nouveau modèle géologique. La combinaison des modèles a permis d'éliminer les doublons sur les points de la grille afin de ne garder qu'une seule description par élément de grille. Un ordre de priorité a été établi dans le choix des données : d'abord les modèles de Tremblay (2008) au Canada et de Croteau (2006) aux États-Unis, ensuite le modèle de Mercier (Claprod et al., 2021), puis le modèle du PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013) et finalement les données stratigraphiques ponctuelles. En tout, 42 374 points de maillage qui couvrent la zone d'étude ont été obtenus, en plus des 4 162 données ponctuelles où il n'y a pas de modèle existant. En complément, certaines données stratigraphiques ont été générées de manière synthétique (par interpolation des données existantes) afin de combler des données manquantes au niveau de la frontière entre le Canada et les États-Unis ou en bordure de celle-ci.

La combinaison des modèles sur l'ensemble de la zone d'étude a permis de définir un bloc 3D du domaine du modèle. Au niveau des points de maille, les épaisseurs sont fixées à 0 m s'il n'y a pas de matériel présent. De la même manière si l'épaisseur d'argile est inférieure à 0.1 m, l'argile est retirée et l'épaisseur correspondante est assignée au till. Puisque les dépôts d'argile ou de till sont dominants sur la zone d'étude, le traitement des données stratigraphiques est d'abord contraint en fonction de ces deux unités. La première condition dans le traitement des données présume que s'il n'y a pas d'argile, il ne peut y avoir de matériel sus-jacent. Dans le cas où il n'y a pas d'argile, mais présence de matériel sus-jacent, celui-ci est transféré d'unité et devient, selon le cas, du matériel sous-jacent à l'argile ou du till. La dernière étape du traitement des données consiste à comparer le matériel du modèle avec la carte de la géologie des dépôts quaternaires (voir carte 5 ; Parent et al., 2017) afin de contraindre les portions des descriptions stratigraphiques qui ne sont pas cohérentes avec le contexte géologique local des dépôts présents en surface. Pour réaliser cette vérification, les attributs de la géologie, en code CGQ, ont été extraits sur les grilles du maillage de

chaque point du modèle et des points de forage. Les types de matériaux du modèle ont ensuite été comparés à la couverture de la carte de la géologie des dépôts quaternaires afin de contraindre leur présence, ou leur absence, en fonction des matériaux qui se retrouvent sur la carte quaternaire. Par exemple, si la carte quaternaire indique qu'il y a des dépôts de till en surface alors que les modèles géologiques indiquent la présence de dépôts de type alluvions, l'information de la carte quaternaire est priorisée et les épaisseurs d'alluvions sont assignées à l'unité de till. La carte des dépôts quaternaires permet ainsi de contraindre de manière simple et cohérente la géologie des matériaux présents sur l'ensemble de la zone d'étude. L'annexe 3 donne des détails sur la procédure de vérification appliquée dans le fichier Excel.

Les cartes 11 à 15 montrent les épaisseurs des unités représentées dans le nouveau modèle géologique. La carte 11 présente l'épaisseur totale de sédiments recouvrant le roc qui va de 0 à 45 m. L'épaisseur totale de sédiments varie généralement entre 5 et 20 m, mais il y a des accumulations plus importantes entre Mercier et Sainte-Martine ainsi qu'au sud de Sainte-Martine, alors que les épaisseurs sont généralement faibles à la limite sud de la région d'étude. La carte 12 montre que l'épaisseur de till est typiquement comprise entre 5 et 15 m, mais que cette épaisseur est assez variable. La carte 13 présente l'épaisseur de l'unité fluvio-glaciaire qui peut atteindre plus de 15 m à l'endroit de l'esker de Mercier. La carte 14 présente l'épaisseur d'argile qui est souvent absente et dont l'épaisseur maximale est généralement inférieure à 5 m, bien que cette épaisseur puisse atteindre plus de 10 m dans la partie nord-est de la région d'étude ainsi qu'entre Mercier et Sainte-Martine où il y a une forte accumulation dans une dépression présente au-dessus du till. La carte 15 détaille l'épaisseur des sédiments au-dessus de l'argile qui sont généralement minces et présents surtout à la limite nord de la région d'étude. Quant à la carte 16, elle représente la topographie de la surface du sol où un ensemble de collines représentant des drumlins reliés à la déformation du till sous la base du glacier est présent.

Le tableau 4.5 indique les statistiques sur les unités stratigraphiques du nouveau modèle géologique. Les épaisseurs minimums sont bien à 0 m et il n'y a pas de valeurs négatives résiduelles dans le jeu de données. Dans l'ensemble, les épaisseurs moyennes des quatre unités stratigraphiques du nouveau modèle demeurent assez faibles parce qu'elles sont calculées sur l'ensemble de la surface du modèle et qu'il y a beaucoup de points où il n'y a pas de matériel présent. Par exemple, pour l'argile, la valeur moyenne d'épaisseur là où l'argile est uniquement présente est de 6 m, pour un maximum de 35 m. Pour le till, la valeur moyenne est représentative avec une épaisseur de 7 m pour ce matériel qui est présent sur presque toute la surface du modèle. L'annexe 3 présente des histogrammes de la distribution de l'épaisseur des unités du modèle géologique (figure A3.1) ainsi que des détails sur les modifications faites aux modèles géologiques existants lors de la création du nouveau modèle géologique.

Tableau 4.5. Statistique sur les épaisseurs des unités du modèle géologique.

Couches	Minimum (m)	Maximum (m)	Moyenne (m)	Écart-type (m)
Sus-jacent (sur argile)	0	7.1	0.1	0.4
Argile	0	35.3	2.3	4.3
Fluvio-glaciaire	0	31.6	0.3	1.5
Sous-jacent (till)	0	47.9	7.1	5.3

4.4 Discussion sur le modèle géologique 3D

La construction du nouveau modèle géologique a été faite en combinant quatre modèles existants. Cela a nécessité l'adoption d'une séquence stratigraphique adaptée (tableau 4.3) qui a été imposée aux modèles existants dont la séquence a été simplifiée. Les quatre unités considérées dans le nouveau modèle géologique sont, du bas vers le haut : (1) le till, (2) le fluvio-glaciaire, (3) l'argile et (4) le matériel sus-jacent à l'argile. Ce dernier est constitué surtout de matériaux de type alluvions mais regroupe aussi les autres matériaux présents, surtout des matériaux organiques ou des remblais. Bien qu'au niveau hydrogéologique cette dernière unité ait peu d'influence sur l'écoulement de l'eau souterraine, surtout lorsque c'est l'aquifère de roc qui est considéré, l'ajout de cette unité en surface va permettre de simuler tous les types de matériaux présents en surface à l'échelle du modèle géologique et par la suite de reproduire cette unité au niveau du modèle numérique. Régionalement, les matériaux en surface et jusqu'à 1 ou 2 m sous la surface ont été érodés et remaniés, ce qui a augmenté leurs conductivités hydrauliques par rapport aux mêmes matériaux non remaniés. L'ajout de l'unité supérieure au-dessus de l'argile va ainsi permettre de recréer une classe de matériaux « remaniés » et d'attribuer des propriétés hydrauliques différentes de celles des matériaux situés plus en profondeur. De la même façon, cette unité va permettre de reproduire les matériaux de surface sur la version du modèle géologique utilisée pour l'estimation de la recharge.

Le développement du nouveau modèle géologique a permis d'obtenir une distribution plus cohérente des matériaux des quatre unités stratigraphiques simplifiées selon quelques règles de base sur les épaisseurs minimums possibles. C'est notamment le cas pour la présence de l'unité sus-jacente à l'argile qui n'est possible que s'il y a présence d'argile en dessous et surtout en fonction de la distribution des matériaux présents en surface indiqués sur la carte quaternaire (carte 5). Le nouveau modèle géologique a aussi permis d'intégrer le nouveau modèle géologique à haute résolution du projet du modèle local de Mercier (Claprood et al., 2021) qui a été reproduit tel quel, mais à plus faible résolution spatiale (sur un maillage au 250 m) permettant de respecter tout le travail de redéfinition de la stratigraphie dans ce secteur. L'approche de calcul qui définit le nouveau modèle en fonction de l'épaisseur des quatre unités permet de produire un bloc 3D du modèle géologique en partant du toit du roc et en ajoutant chaque contexte de la base jusqu'à la surface par l'ajout respectif des matériaux avec dans l'ordre, du till, du fluvio-glaciaire, de l'argile et du matériel sus-jacent.

5 ESTIMATION DE LA RECHARGE

Sur le territoire d'étude, deux types d'aquifère sont essentiellement présents : (1) les dépôts fluvio-glaciaires et (2) le roc fracturé. Les premiers sont généralement constitués de sables et de graviers sous-glaciaires très perméables d'étendue limitée (Tremblay, 2008), tel que l'esker de Mercier à l'ouest de la zone d'étude (voir carte 13). Quant au roc fracturé, il représente l'aquifère régional à partir duquel la plupart des prélèvements d'eau souterraine sont effectués et correspond donc à la principale ressource en eau souterraine de la région d'étude. Comme le projet actuel vise une meilleure compréhension de cette ressource en eau, il est donc nécessaire de connaître la recharge de cet aquifère régional afin de pouvoir estimer les diverses pressions qui peuvent être exercées sur cette ressource par les différents préleveurs identifiés sur le territoire : résidents, municipalités, agriculteurs ou encore industriels (Ballard et al., 2021).

Une première estimation de la recharge sur la zone d'étude avait été réalisée lors de précédents travaux (voir Ballard et al., 2021) à partir de données du PACES Montérégie Est (Carrier et al. 2013) et des travaux de Croteau (2006) couvrant le bassin versant de la rivière Châteauguay. Le but était alors de combiner ces deux sources de données de recharge distribuée afin d'obtenir une indication de la recharge de l'aquifère régional dans le but d'amorcer les travaux de modélisation et d'évaluer de façon préliminaire la pression sur la ressource en eau via l'indicateur de stress sur l'eau souterraine (usage / recharge). Ce travail a nécessité le comblement d'une zone de 150 km² non couverte par les modèles de recharge distribuée antérieurs afin de pouvoir estimer la recharge sur l'ensemble de la zone d'étude du modèle d'écoulement régional (voir section 6 dans Ballard et al., 2021). Cette zone de lacunes a été comblée en attribuant des valeurs typiques de recharge par type d'unité quaternaire en se référant à la carte Quaternaire éditée par Parent et al. (2017).

Bien qu'il s'agisse d'un portrait préliminaire de la recharge présentant certaines approximations, une carte de recharge distribuée de l'aquifère rocheux a ainsi pu être produite (carte 14 dans Ballard et al., 2021). Sur la zone du modèle d'écoulement régional, la recharge annuelle moyenne du roc est de l'ordre de 72 mm/an. Les secteurs où la recharge est la moins importante (inférieure à 50 mm/an) sont associés aux dépôts argileux. Localement, des secteurs de recharge importante (supérieure à 200 mm/an) sont localisés dans les sédiments fluvio-glaciaires, notamment l'esker de Mercier mais également sur des zones de roc affleurant. Au centre de la zone d'étude, soit dans le secteur du dôme piézométrique à l'est de Saint-Rémi (voir section 3.4 et annexe 2), la recharge avoisine plutôt les 100 mm/an, ce qui était d'ailleurs confirmé dans l'étude de Technorem (2008a) où cette recharge avait été antérieurement évaluée à 91 mm/an sur une zone d'étendue semblable. Le travail avait alors été poursuivi en estimant cette recharge par municipalité puis en utilisant cette valeur pour déterminer l'indicateur de stress sur l'eau souterraine à l'échelle municipale.

En parallèle, la recharge dans l'esker de Mercier a aussi pu être précisée en exploitant les données de niveau de nappe du puits de suivi de Mercier (03090001) du RSESQ (voir carte 2 du présent rapport et annexe 3 dans Ballard et al., 2021). La méthodologie implémentée dans le logiciel GWHAT (Gosselin et al., 2017) se base sur les travaux de thèse de Gosselin (2016). Sur ce puits représentatif des conditions au sein de l'esker, la recharge est en moyenne de 500 mm/an tout en présentant des variations interannuelles importantes (350 à 650 mm/an selon les années) sur la période analysée (1980-2020).

Cette estimation initiale de la recharge de l'aquifère régional est insuffisante pour effectuer de façon adéquate les travaux du présent mandat à savoir (1) estimer la recharge historique, (2) évaluer la recharge selon les projections climatiques futures, (3) déterminer l'indicateur de stress sur l'eau souterraine actuel (ratio usage / recharge) et (4) son évolution future tout en considérant donc également des modifications des prélèvements d'eau. En effet, la recharge a été approchée sur une large zone non couverte par les anciens projets en attribuant une valeur de recharge à un type de matériaux donné (voir section 6 dans Ballard et al., 2021). En travaillant sur une nouvelle grille de recharge correspondant au territoire étudié, il est alors possible d'estimer la recharge sur chaque maille avec une résolution de 250 m. De plus, les estimations antérieures de recharge au roc se basent sur des données climatiques couvrant des périodes différentes (1979-2010 pour le PACES Montérégie Est et 1963-2001 pour le projet Châteauguay) tout en utilisant des stations météorologiques ponctuelles peu représentatives lorsqu'elles ne sont pas uniformément réparties sur un territoire et pouvant présenter des données manquantes. En utilisant alors les données climatiques journalières (précipitations totales, températures minimales et maximales) de la grille Info-Climat de 0.1° de résolution (voir annexe 4 pour plus de détails), il est possible de s'affranchir de plusieurs problématiques reliées à l'usage des stations météorologiques en comblant les lacunes d'enregistrement et en offrant une couverture complète sur la province (Bergeron, 2017). Il est d'ailleurs plus facile d'intégrer de nouvelles données climatiques comme celles des projections futures (voir section 5.4) à partir d'une grille plutôt que de données ponctuelles distribuées de façon irrégulière sur le territoire. De plus, l'usage d'un nouveau modèle d'infiltration distribué de la recharge au roc permet de s'affranchir des éventuelles divergences de conceptualisation des couches de matériaux entre les deux anciens projets tout en permettant une actualisation des données climatiques. En effet, cette nouvelle modélisation récente avec HELP permet de simuler la recharge de l'aquifère régional sur la période historique mais également en climat futur grâce aux données de simulations climatique. Les détails sur le modèle d'infiltration HELP sont fournis dans la section 5.2.

En amont de l'estimation de la recharge distribuée de l'aquifère régional rocheux avec le modèle d'infiltration HELP (section 5.2), plusieurs tâches importantes et utiles ont été entreprises. Tout d'abord, les données quotidiennes de la grille Info-Climat ont été récupérées auprès du MELCC. Ensuite, les débits des quelques stations hydrométriques disponibles sur la zone d'étude ont été compilés afin de déterminer les débits de base de chaque cours d'eau par séparation des hydrogrammes de rivière. Enfin, à partir de ces données, un bilan hydrologique a pu être produit pour chaque bassin versant jaugé, donnant ainsi une idée de l'infiltration totale sur la région d'étude (voir section 5.1). L'ensemble de ces travaux finalisés est disponible dans l'annexe 4 du présent document. Finalement, après calage du modèle d'infiltration HELP, il a été possible de compléter et d'actualiser la section 5.3 sur la recharge historique (voir section 5.6 et détails dans l'annexe 5) et de mettre à jour les chiffres indiqués dans Ballard et al. (2021) sur l'état actuel des pressions exercées sur la ressource en eau souterraine. Dans un second temps, les simulations climatiques ont été intégrées dans le modèle HELP afin d'évaluer la recharge en climat futur (voir section 5.7 et détails en annexe 6) et les futures pressions sur cette ressource (section 6).

5.1 Bilans hydrologiques des bassins Des Anglais et de L'Acadie

Comme indiqué précédemment, les données climatiques utilisées pour définir le bilan hydrologique sur les deux bassins versants jaugés proviennent de la grille Info-Climat produite par le MELCC dont l'étendue des mailles est indiquée sur la figure A4.1 de l'annexe 4. En effet, les trois stations de suivi de la météo situées sur la région investiguée (voir carte 2) permettent de définir les précipitations et les températures caractérisant la zone d'étude (voir section 2.2) mais sont moins adaptées à l'estimation de la recharge sur un large territoire pouvant présenter des variations importantes de relief et de conditions climatiques. Comme indiqué dans Bergeron (2017), la grille Info-Climat fournit également des données climatiques interpolées de bonne qualité au sud du 50^{ème} parallèle – la région d'étude se trouvant autour de 45° de latitude nord – ce qui assure alors un certain degré de confiance quant à leur utilisation comme données de base pour le calcul des bilans hydrologiques mais également par la suite comme données d'entrée du modèle d'infiltration HELP.

Les deux bassins jaugés en question sont ceux de L'Acadie (station hydrométrique 030421) et Des Anglais (station hydrométrique 030907) dont les limites sont indiquées sur la carte 2. Le logiciel GWHAT (Gosselin et al., 2017) a été utilisé pour représenter les normales mensuelles de la température et des précipitations sur chaque bassin jaugé. Sur les 61 années de disponibilité des données de la grille climatique (1960-2020), les précipitations annuelles moyennes représentent environ 973 à 988 mm selon le bassin avec une part de pluie de l'ordre de 77 à 78%, le reste (22 à 23%) correspondant à la neige (tableau 5.1). Le logiciel GWHAT offre une première estimation de la part d'évapotranspiration potentielle (ETP) qui représenterait 63% des précipitations totales enregistrées sur chaque bassin. Quant aux températures moyennes, elles sont de l'ordre de 6.56 °C sur le bassin versant jaugé de L'Acadie et légèrement plus basses (6.27°C) sur celui Des Anglais. Sur l'ensemble de la période de suivi (1960-2020), les précipitations sont maximales entre juin et octobre sur chacun des bassins (figures 5.1 et 5.2) tandis qu'elles sont minimales entre janvier et mars. La neige représente la plupart des précipitations totales entre décembre et mars.

Tableau 5.1. Variables climatiques moyennes sur les bassins versants jaugés de L'Acadie et Des Anglais.

Bassin versant	Période de suivi	Précipitations (mm)			ETP (mm)	Températures journalière (°C)		
		Totales	Pluie	Neige		Minimales	Moyennes	Maximales
L'Acadie	1960-2020	988	776	211	625	1.64	6.56	11.56
Des Anglais	1960-2020	973	755	218	615	1.27	6.27	11.41

Depuis le début du suivi (1960), la variabilité interannuelle des précipitations totales et des températures moyennes est importante sur l'un et l'autre des bassins (figure 5.3). Une tendance à la hausse est d'ailleurs observée sur les 61 années de suivi pour ces deux variables climatiques. Selon l'équation de la droite de tendance, les précipitations augmenteraient de 181 mm (+20%) sur le bassin de L'Acadie et, dans une moindre mesure, de 138 mm (+15%) sur celui Des Anglais entre 1960 et 2020. De même, l'analyse par période décennale (voir annexe 4) confirme cette hausse des précipitations totales sur les deux bassins avec toutefois une baisse de la part solide (neige) par rapport à la part liquide (pluie) dans le temps. A noter que la période 1971-1980 fait figure d'exception avec des précipitations importantes bien visibles sur la figure 5.3. Sur cette même période (1960-2020), le constat est semblable pour les températures moyennes qui s'accroissent de 1.42 °C (+24%) et de 1.45 °C (+26%) sur les bassins respectifs de L'Acadie et Des Anglais. Les détails fournis dans l'annexe 4 indiquent également que cette hausse des températures est plus prononcée depuis les années 90, et ce surtout sur le bassin Des Anglais.

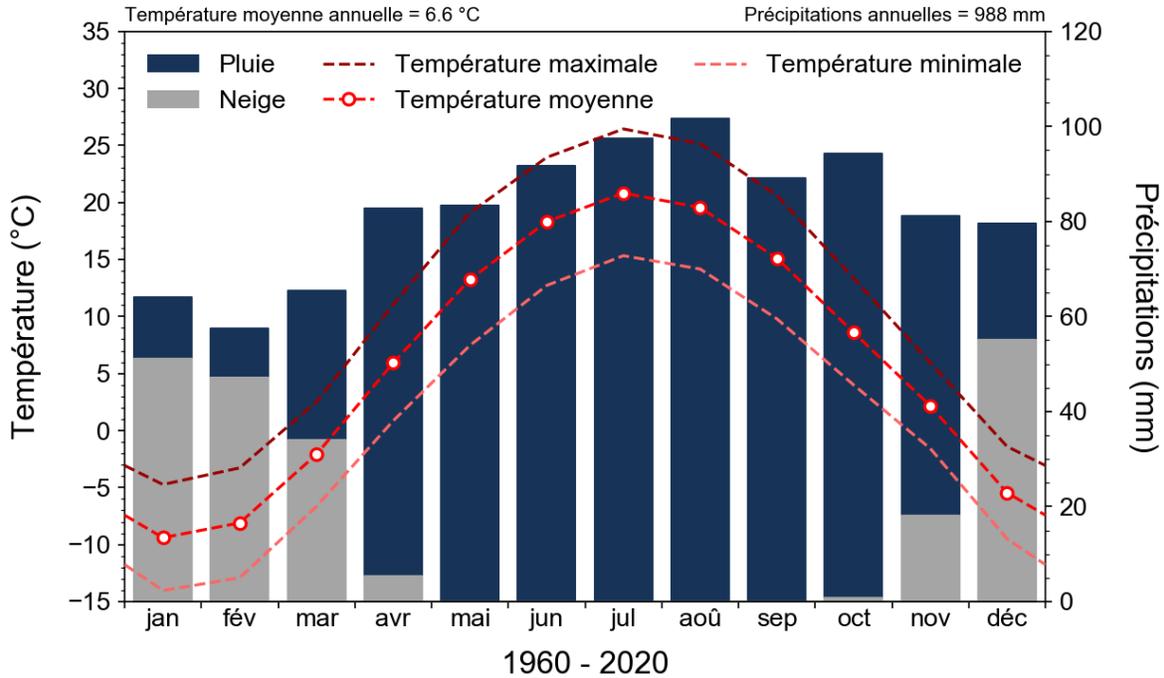


Figure 5.1. Normales mensuelles de la température et des précipitations selon les données de la grille Info-Climat sur le bassin versant jaugé de L'Acadie (station hydrométrique 030421) entre 1960 et 2020.

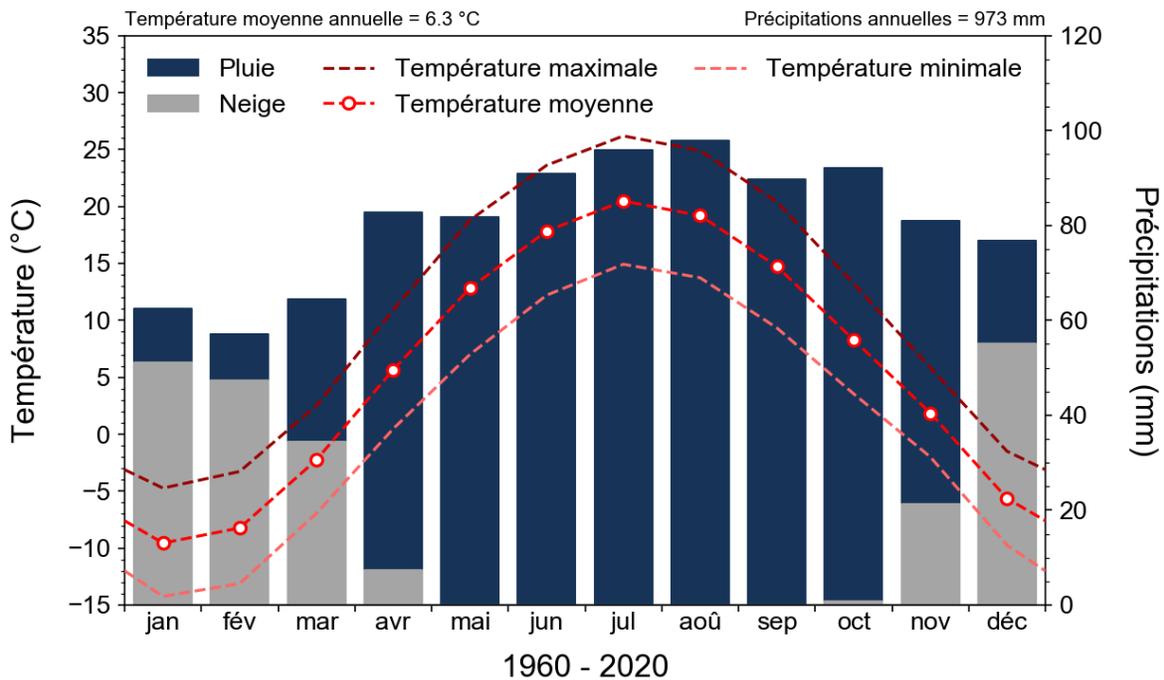


Figure 5.2. Normales mensuelles de la température et des précipitations selon les données de la grille Info-Climat sur le bassin versant jaugé Des Anglais (station hydrométrique 030907) entre 1960 et 2020.

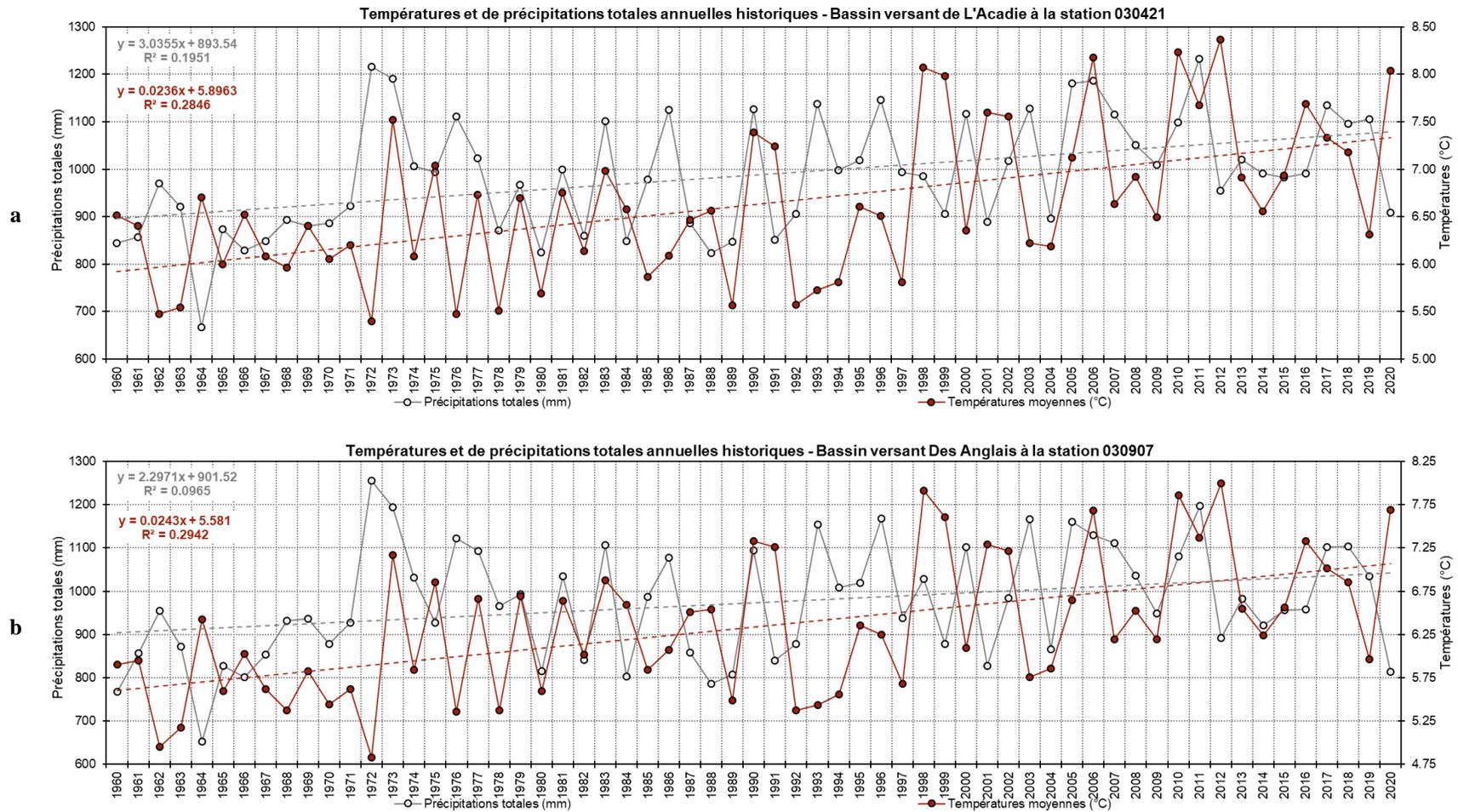


Figure 5.3. Évolution des précipitations totales et des températures moyennes annuelles sur (a) le bassin versant jaugé de L'Acadie (station hydrométrique 030421) et (b) le bassin versant jaugé Des Anglais (station hydrométrique 030907).

Le calcul d'un bilan hydrologique sur un bassin versant particulier nécessite l'exploitation des données de suivi des débits de rivière. En effet, en plus d'être requises pour l'étape de calage du modèle d'infiltration HELP (voir section 5.5), les chroniques de débit de cours d'eau constituent la donnée de base de la démarche appliquée ici, soit la séparation des hydrogrammes de rivière. Cette approche vise en effet à estimer le débit de base d'un cours d'eau qui correspond au taux d'infiltration totale, soit l'une des composantes principales du bilan hydrologique.

Plusieurs stations de jaugeage du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) sont répertoriées sur la région d'étude (voir carte 2). Toutefois, une procédure de sélection des stations a été entreprise afin de conserver uniquement celles dont les données peuvent être exploitées. Finalement, seules deux stations de jaugeage répondaient aux quatre critères de sélection : (1) enregistrer des données de débit, (2) avoir un régime naturel, (3) couvrir au moins la période des normales climatiques (1981-2010) et (4) être toujours en fonctionnement. Il s'agit donc de la station de suivi de L'Acadie (030421) dont l'aire de drainage couvre une région de 367 km² et la station hydrométrique Des Anglais (030907) dont l'impluvium est de 642 km² (tableau 5.2). Les stations de L'Acadie et Des Anglais fonctionnent respectivement depuis 1979 et 1973 mais couvrent respectivement des années complètes entre 1980 et 2020 et entre 1974 et 2020. Sur les 41 années de suivi complet à la station de L'Acadie, seules 2.2% de données étaient manquantes tandis que 0.9% des données quotidiennes de débit étaient absentes sur les 47 années de suivi complet à la station Des Anglais. Comme ces lacunes couvrent une très faible part des chroniques, il a été décidé de les compléter en appliquant une simple régression linéaire entre les données de débit mesurées et validées à jour (n-1) et à jour (n+1). Les hydrogrammes complets à chaque station de jaugeage sont disponibles dans l'annexe 4.

Tableau 5.2. Caractéristiques des stations hydrométriques sélectionnées.

Station	Nom	Aire drainée (km ²)	Municipalité	Coordonnées		Période de suivi
				Lat.	Long.	
030421	L'Acadie	367	Saint-Jean-sur-Richelieu	45.39	-73.37	1979 - Actuel
030907	Des Anglais	642	Très-Saint-Sacrement	45.16	-73.82	1973 - Actuel

Entre 1980 et 2000, le débit total moyen est de l'ordre de 4.80 m³/s à la station de L'Acadie. Il avoisine les 8.51 m³/s à la station Des Anglais entre 1974 et 2020, soit un débit moyen plus important à relier avec l'aire du bassin drainé (642 km² contre 367 km²). La variabilité interannuelle des débits des cours d'eau aux deux stations est indiquée sur les figures 5.4 et 5.5. À la station de L'Acadie, le débit augmente significativement entre 1980 et 2020 (+52%) selon l'équation de la droite de tendance et ce essentiellement dans les années 1980 (figure 5.4). Pour le bassin Des Anglais, la droite de tendance est proche du débit moyen (figure 5.5), indiquant une faible variation de débit (+7%) entre 1974 et 2020. L'analyse des débits mensuels moyens montre des variations typiques du climat québécois pour les deux bassins étudiés (figures 5.6 et 5.7). En effet, le débit maximal est mesuré en mars et avril, soit lors de la période fonte du stock de neige au sol à la fin de l'hiver qui alimente alors les cours d'eau. L'étiage correspond généralement à la période estivale (juillet, août et septembre) durant laquelle l'évapotranspiration est maximale. Entre la période de référence (1981-2011) et la période récente (2011-2020), quelques divergences sont observées sur les graphiques mensuels, dont une hausse des débits entre janvier et mai vraisemblablement due à des phases de redoux hivernaux. Sur la période de suivi des débits, d'autres tendances sont observées selon le bassin : hausse en août et baisse en novembre pour le bassin de L'Acadie (figure 5.6) et baisse automnale (octobre et novembre) sur celui Des Anglais (figure 5.7).

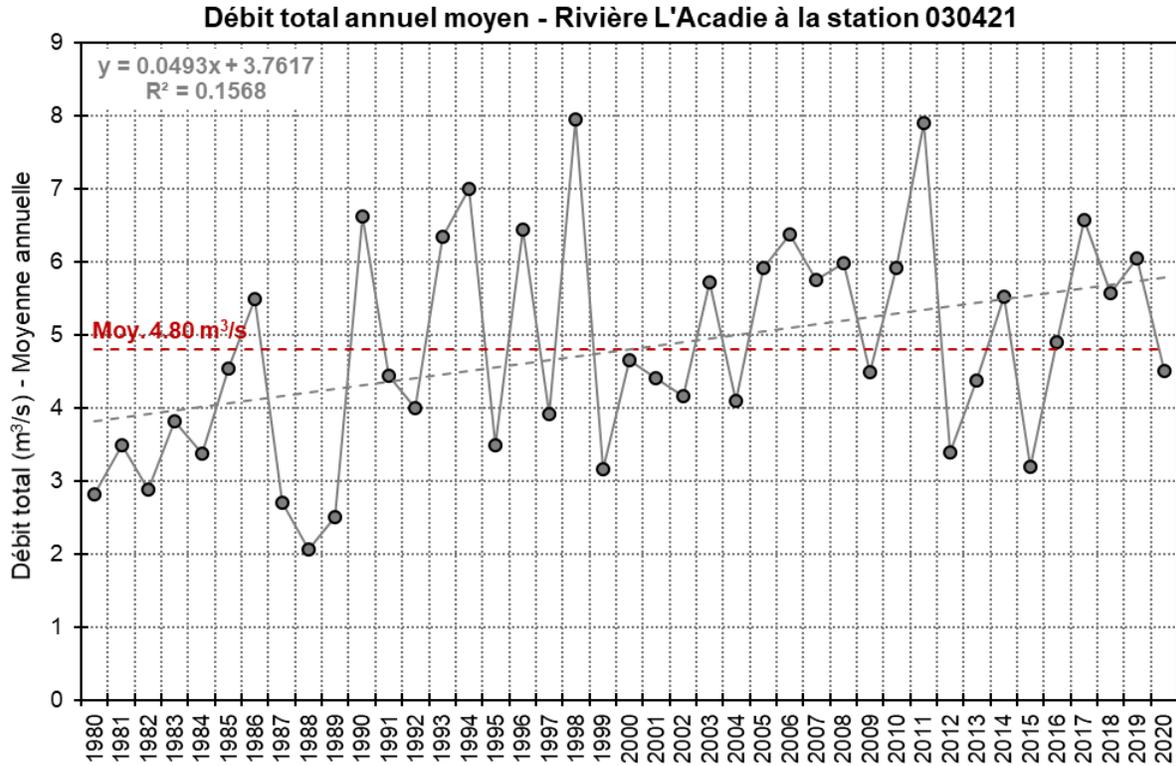


Figure 5.4. Débit annuel moyen mesuré sur la rivière L'Acadie à la station hydrométrique 030421.

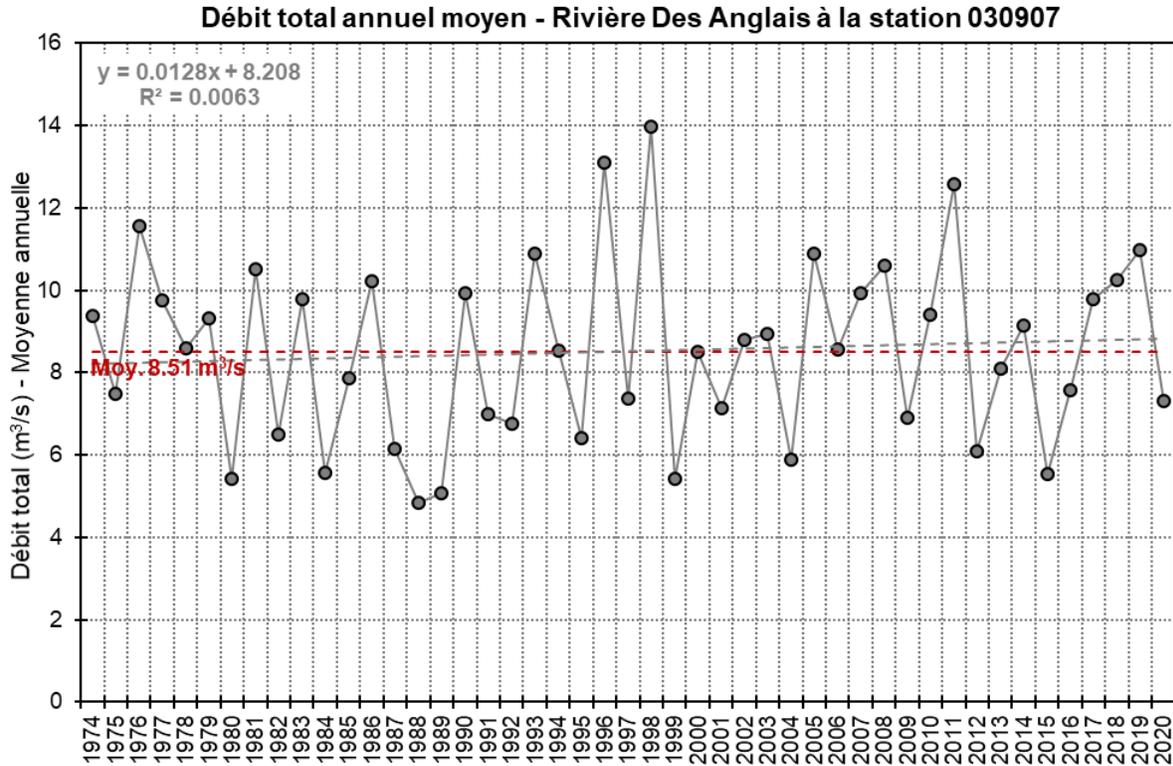


Figure 5.5. Débit annuel moyen mesuré sur la rivière Des Anglais à la station hydrométrique 030907.

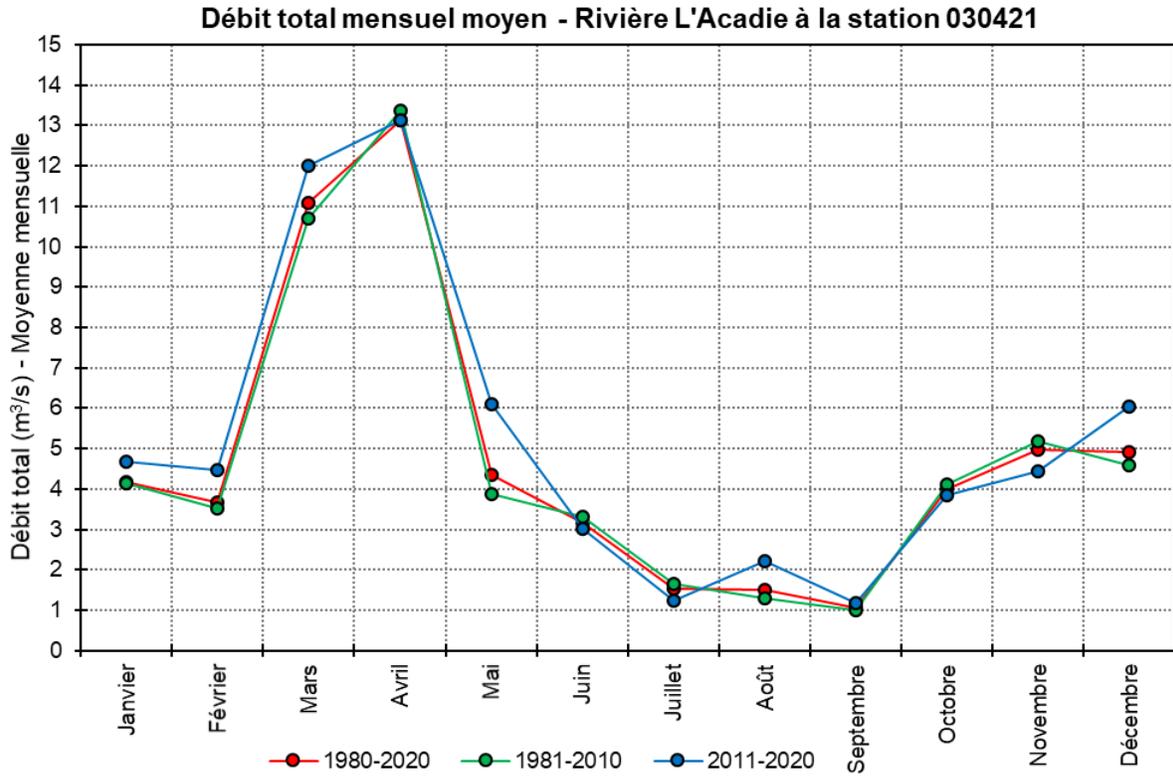


Figure 5.6. Débit mensuel moyen mesuré sur la rivière L'Acadie à la station hydrométrique 030421.

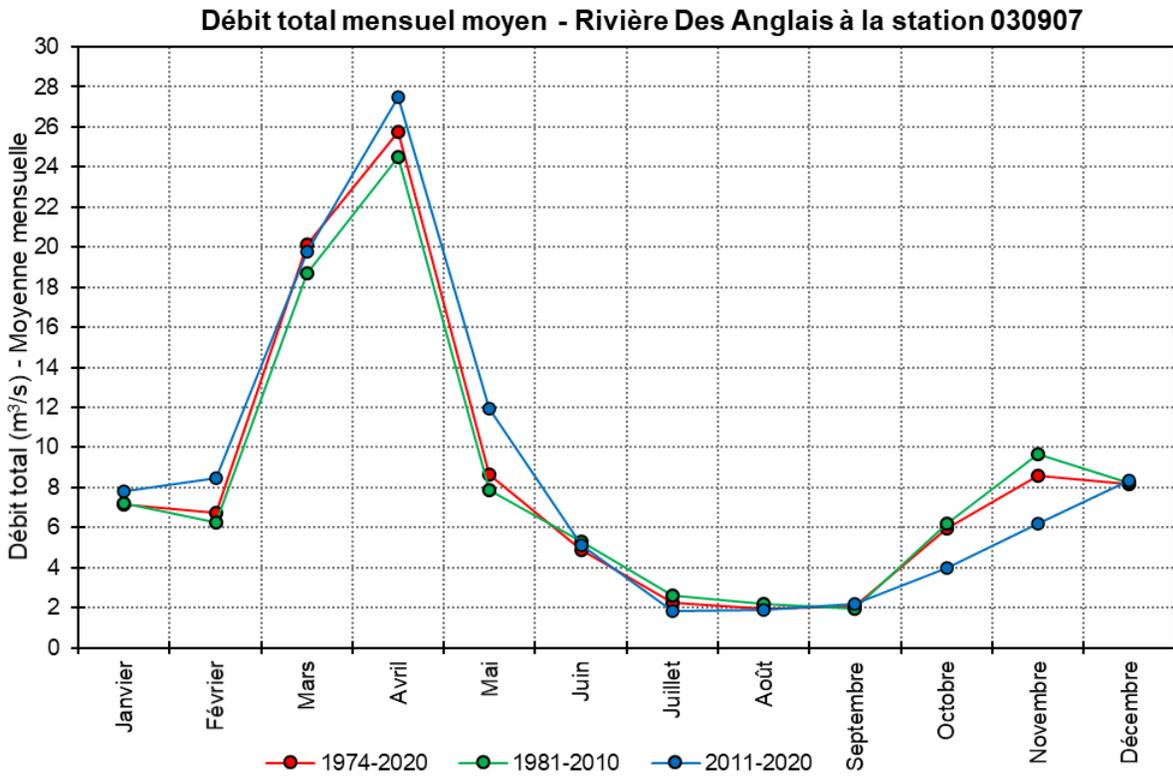


Figure 5.7. Débit mensuel moyen mesuré sur la rivière Des Anglais à la station hydrométrique 030907.

Les méthodes de séparation d'hydrogrammes de rivière assument que le débit total d'un cours d'eau peut être scindé en deux composantes : le ruissellement de surface et le débit de base (Healy, 2010). Pour appliquer ces approches, il est admis que le ruissellement de surface a un temps de réponse rapide par rapport aux apports souterrains de l'aquifère (Anctil et al., 2012). Ceci permet alors de filtrer les chroniques de débit afin d'extraire le débit de base qui correspond donc à la contribution de l'aquifère au régime des rivières. Lorsque rapporté à la surface drainée du bassin versant, ce débit de base fournit le taux d'infiltration totale qui correspond à une surestimation de la recharge réelle de l'aquifère rocheux puisque les filtres ne permettent pas de différencier le ruissellement hypodermique (ou de sous-surface) de la recharge réelle du roc à partir du débit de base. Même si elles présentent plusieurs limitations (voir annexe 4), ces méthodes sont facilement utilisables car elles nécessitent seulement des données quotidiennes de débit et permettent d'obtenir rapidement une approximation du taux de l'infiltration totale sur une région donnée.

La feuille de calcul ESPERE (Estimation de la Pluie Efficace et de la Recharge) développée par le BRGM en France (Lanini, 2020) a été utilisée pour déterminer le débit de base à partir des débits totaux mesurés quotidiennement aux deux stations de jaugeage. Ce fichier Excel permet un calcul rapide et automatique des débits de base puis de l'infiltration totale (journalière, mensuelle et annuelle) sur la période de disponibilité des données avec trois filtres : Wallingford (Gustard et al., 1992), Chapman (Chapman et Maxwell, 1996) et Eckhardt (2005). L'application de ces trois filtres sur une année particulière de suivi à la station de L'Acadie (030421) est indiquée sur la figure 5.8.

Le choix du filtre le plus représentatif se base ensuite sur un certain jugement professionnel. Le filtre de Chapman donne des gammes de débit de base intermédiaires par rapport aux deux autres filtres (tableau 5.3), surtout pour le bassin de L'Acadie. Il ne devrait donc pas sous-estimer ni surestimer les valeurs d'infiltration totale tout en offrant une assez bonne représentation de la contribution de l'aquifère que ce soit lors des périodes de ruissellement ou durant les périodes de récession (voir figure 5.8). De plus, ce filtre est largement utilisé par la communauté scientifique et notamment dans d'autres études hydrogéologiques régionales dans des contextes similaires (Croteau, 2006 ; Rivard et al., 2014 ; Huchet, 2018) ce qui est également confirmé par Benhamanne (2002) dans son analyse comparative des filtres à l'est du Canada.

Tableau 5.3. Estimés du débit de base par séparation des hydrogrammes de rivière sur les bassins versants jaugeés.

Station		L'Acadie (030421)	Des Anglais (030907)
Intervalle de temps		1980-2020	1974-2020
Nombre d'années		41	47
Débit de base moyen (m ³ /s)	Wallingford	1.36	3.02
	Chapman	2.00	3.90
	Eckhardt	2.87	3.96

En tenant compte de ces considérations mais aussi de la certaine incertitude de ces méthodes, le filtre de Chapman a été retenu pour obtenir une valeur approchée de la recharge réelle du roc en se basant sur l'approche décrite par Rivard et al. (2014). En effet, les filtres ne distinguent pas correctement le ruissellement de surface du débit de base pendant la fonte progressive du stock de neige à la fin de l'hiver, ce qui entraîne une surestimation des débits de base à cette période. Ainsi, en calculant la moyenne du débit de base pour les cinq mois de l'année pendant lesquels le ruissellement est négligeable (juin à octobre), il est alors possible d'obtenir une valeur approximative de la recharge réelle du roc car la part de ruissellement hypodermique est minimisée.

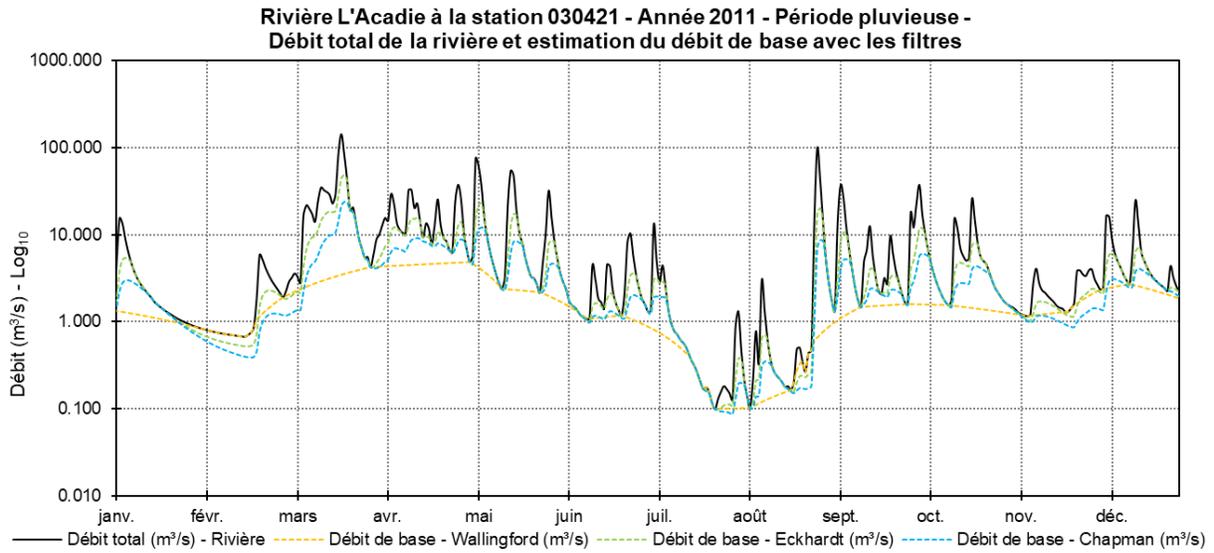


Figure 5.8. Exemple d'application des filtres sur l'hydrogramme de la station de L'Acadie (030421) pour l'année 2011 – Graphique semi-logarithmique.

Les résultats de la séparation des hydrogrammes de rivière sont indiqués dans le tableau 5.4 pour les deux bassins jaugés. Sur la période complète de suivi (1980-2020) du bassin de L'Acadie, l'infiltration totale moyenne est estimée à 172 mm/an tandis que la recharge réelle moyenne du roc serait de 74 mm/an, soit 43% de l'infiltration totale. Entre 1974 et 2020, l'infiltration totale est légèrement plus élevée (192 mm/an) sur le bassin voisin Des Anglais alors que la recharge réelle est similaire (74 mm/an), correspondant alors à 39% du taux de l'infiltration totale.

Tableau 5.4. Estimés de l'infiltration et de la recharge à partir des filtres sur les bassins versants jaugés.

Station		L'Acadie (030421)	Des Anglais (030907)
Intervalle de temps		1980-2020	1974-2020
Nombre d'années		41	47
Infiltration totale moyenne (mm/an) ¹	Wallingford	117	148
	Chapman	172	192
	Eckhardt	247	195
Recharge réelle moyenne (mm/an) ²	Chapman - 5 mois	74	74

1 : valeur estimée à partir d'une méthode de séparation des hydrogrammes par filtre présentant des approximations ;
 2 : valeur approchée en supposant que le ruissellement total (surface et sub-surface) est négligeable lors des mois secs.

La variabilité interannuelle du taux d'infiltration est visible sur les deux bassins (voir figures 5.9 et 5.10) même si les tendances sont distinctes selon le bassin considéré. En effet, en se référant à l'équation de la droite de tendance, une hausse de l'infiltration totale de l'ordre de +44% est constatée sur le bassin de L'Acadie entre 1980 et 2020 (figure 5.9). Cette augmentation de l'infiltration totale est beaucoup moins prononcée (+9% entre 1974 et 2020) sur le bassin Des Anglais (figure 5.10) où la droite de tendance s'approche même de la courbe maitresse moyenne. Pour les deux bassins, ces variations sont assez similaires à celles retranscrites par l'analyse des tendances sur les débits totaux (voir figures 5.4 et 5.5) : +52% pour le bassin de L'Acadie et +7% pour le bassin Des Anglais.

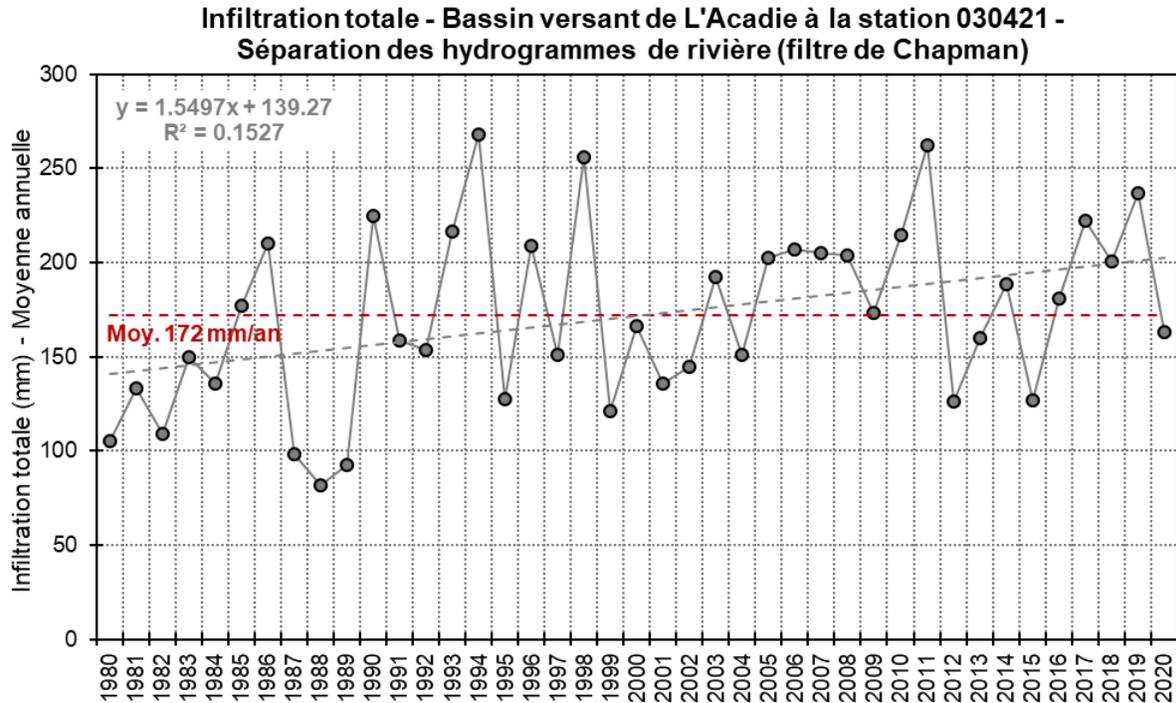


Figure 5.9. Infiltration totale annuelle moyenne estimée à partir du débit de base sur la rivière L'Acadie à la station hydrométrique 030421.

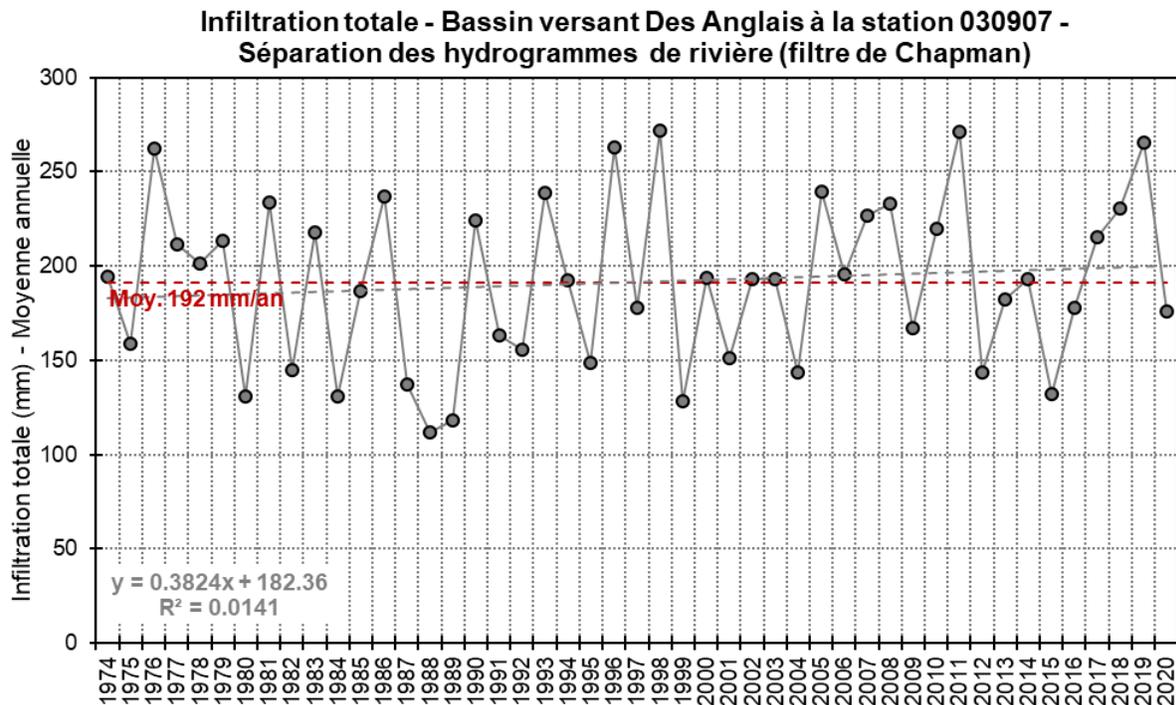


Figure 5.10. Infiltration totale annuelle moyenne estimée à partir du débit de base sur la rivière Des Anglais à la station hydrométrique 030907.

Avec les mesures du débit des rivières et les estimés du débit de base par la méthode de séparation des hydrogrammes de rivière, il est possible d'établir un bilan hydrologique préliminaire pour chaque bassin étudié en estimant la part de chaque composante de l'équation 1 (adaptée de Healy, 2010) en considérant que les variations de stockage de l'eau sont négligeables sur plusieurs années :

$$P_{(totales)} = EVP_{(réelle)} + Ru_{(surface)} + I_{(totale)} + \Delta RAS$$

Équation 1

$P_{(totales)}$	Précipitations totales
$EVP_{(réelle)}$	Évapotranspiration réelle
$Ru_{(surface)}$	Ruissellement de surface
$I_{(totale)}$	Infiltration totale
ΔRAS	Variations de stock de l'eau

L'estimation de chaque composante de ce bilan peut alors être réalisée sur une base annuelle. Tout d'abord, l'évapotranspiration réelle est calculée en soustrayant le débit total annuel moyen des précipitations totales puisque le débit d'une rivière combine le ruissellement de surface et l'infiltration totale. Ensuite, le taux d'infiltration estimé à partir du calcul du débit de base avec le filtre de Chapman est utilisé pour déterminer la dernière composante du bilan hydrologique, soit le ruissellement de surface (se référer à l'équation 1). Il est aussi possible de préciser ce bilan hydrologique en utilisant la valeur approchée de la recharge réelle du roc obtenue par l'approche des cinq mois les plus secs. Le ruissellement hypodermique peut alors être calculé en soustrayant la recharge nette de l'infiltration totale. Finalement, le ruissellement total est estimé en combinant les deux types de ruissellement (de surface et hypodermique). Les détails de l'estimation de chaque composante du bilan hydrologique sont fournis dans l'annexe 4.

Le tableau 5.5 détaille les composantes du bilan hydrologique pour les deux bassins jaugés. Les composantes principales sont aussi affichées sur les figures 5.11 et 5.12 pour les bassins respectifs de L'Acadie (1980-2020) et Des Anglais (1974-2020). Globalement, la part de chaque composante par rapport aux précipitations totales est semblable entre les deux bassins. L'évapotranspiration est la composante majeure du bilan avec 58 à 59% des apports. Le ruissellement de surface représente près du quart des précipitations totales (23 à 24%). L'infiltration totale est légèrement supérieure (19%) sur le bassin Des Anglais par rapport au bassin de L'Acadie (17%). La valeur obtenue, certes approximative, de recharge réelle du roc serait la même pour les deux bassins (74 mm/an en moyenne) ce qui représente seulement 7% des précipitations totales. Ainsi, le ruissellement hypodermique constitue la majeure partie du débit de base sur les deux bassins étudiés où il correspond à 56% de l'infiltration totale sur le bassin de L'Acadie et 61% sur celui Des Anglais.

Tableau 5.5. Composantes détaillées du bilan hydrique sur les bassins versants jaugés.

Station	L'Acadie (030421)	Des Anglais (030907)
Intervalle de temps	1980-2020	1974-2020
Nombre d'années	41	47
<i>Précipitations totales (mm/an)¹</i>	<i>1012 (100%)</i>	<i>992 (100%)</i>
<i>Évapotranspiration réelle (mm/an)¹</i>	<i>600 (59%)</i>	<i>574 (58%)</i>
Ruissellement total (mm/an)	338 (33%)	344 (35%)
<i>Ruissellement de surface (mm/an)¹</i>	<i>240 (24%)</i>	<i>227 (23%)</i>
Ruissellement hypodermique (mm/an)	97 (10%)	117 (12%)
Recharge réelle (mm/an)	74 (7%)	74 (7%)
<i>Infiltration totale (mm/an)¹</i>	<i>172 (17%)</i>	<i>191 (19%)</i>

1 : les valeurs en italique permettent le calcul du bilan hydrologique simplifié.

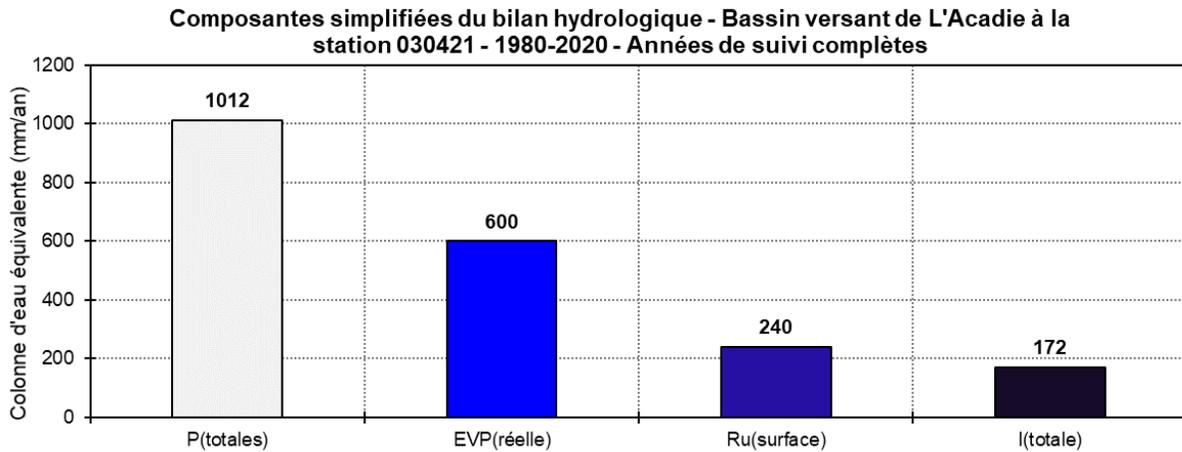


Figure 5.11. Composantes simplifiées du bilan hydrologique sur le bassin versant de L'Acadie à la station hydrométrique 030421 sur la période de suivi complet (1980-2020).

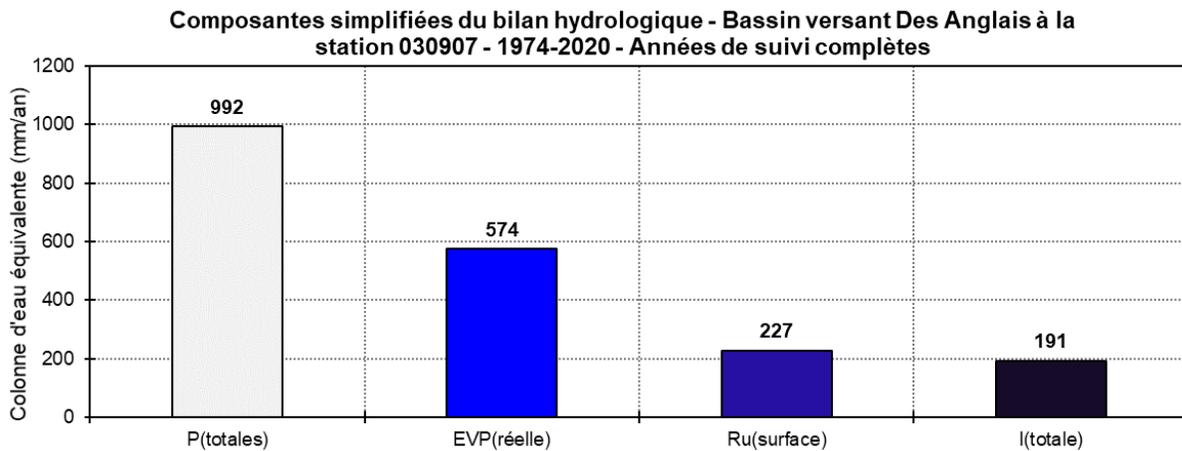


Figure 5.12. Composantes simplifiées du bilan hydrologique sur le bassin versant Des Anglais à la station hydrométrique 030907 sur la période de suivi complet (1974-2020).

Les composantes obtenues précédemment peuvent être comparées à celles de projets proches (section 2.1). Les limites du projet Châteauguay (Côté et al., 2006) et du PACES Montérégie Est (Carrier et al., 2013) recourent même en partie la zone d'étude (figure 2.1). Les valeurs extraites de ces deux anciens projets résultent du modèle HELP (tableau 5.6). Pour le PACES Montérégie Est, les résultats compilés sont ceux de la plateforme sud qui sont considérés comme les plus représentatifs du contexte du projet actuel. Pour le bassin versant de la rivière Châteauguay, les résultats ont été extraits de Croteau (2006). Même si cette analyse comparative considère des méthodes et des périodes variées, elle indique une certaine cohérence entre les derniers estimés des composantes et les anciens projets. En effet, hormis l'évapotranspiration qui est de l'ordre de 52% pour les anciens projets et de 58 à 59% pour les deux bassins investigués ici, les parts des autres composantes sont semblables par rapport aux précipitations totales. Le ruissellement de surface est similaire puisqu'il varie de 23 à 26% selon le projet. L'infiltration totale représente 17 à 19% des apports pour les deux bassins jaugés étudiés et 22 à 24% pour les zones d'étude des anciens projets. La recharge estimée avec HELP correspond à 9% des apports en Montérégie Est et sur le bassin de la Châteauguay soit seulement 2% de plus que sur les deux bassins jaugés du projet actuel (tableau 5.6).

Tableau 5.6. Comparaison des bilans hydrologiques avec des anciens projets sur des secteurs proches.

Projet	Mercier (actuel)		PACES ME	Châteauguay
	BV de L'Acadie	BV Des Anglais	Plateforme sud	BV Châteauguay
Intervalle de temps	1980-2020	1974-2020	1979-2010	1963-2001
Nombre d'années	41	47	31	39
Précipitations totales (mm/an) ¹	1012 (100%)	992 (100%)	1061 (100%)	943 (100%)
Évapotranspiration réelle (mm/an) ¹	600 (59%)	574 (58%)	553 (52%)	487 (52%)
Ruissellement total (mm/an)	338 (33%)	344 (35%)	394 (37%)	371 (39%)
Ruissellement de surface (mm/an) ¹	240 (24%)	227 (23%)	243 (23%)	245 (26%)
Ruissellement de sub-surface (mm/an)	97 (10%)	117 (12%)	151 (14%)	126 (13%)
Recharge réelle (mm/an)	74 (7%)	74 (7%)	100 (9%)	86 (9%)
Infiltration totale (mm/an) ¹	172 (17%)	191 (19%)	251 (24%)	212 (22%)

1 : valeurs extraites de Carrier et al. (2013) ;

2 : valeurs extraites de Croteau (2006).

En regroupant par décennie les principales composantes, il est possible de vérifier une éventuelle tendance. Sur le bassin de L'Acadie (tableau 5.7), l'évapotranspiration réelle est d'abord importante (66% des apports) dans les années 80 avant de se stabiliser autour de 56-57% à partir des années 90. Dans les années 80, le ruissellement de surface est assez bas (19%) avant d'augmenter dans les années 90 pour ne plus trop varier ensuite (25-26%). L'infiltration totale passe de 15 à 18% entre les années 80 et 90 avant une stabilisation autour de 17-18% des apports.

Tableau 5.7. Composantes majeures du bilan hydrologique sur le bassin versant de L'Acadie (030421).

Décennie	1981-1990	1991-2000	2001-2010	2011-2020
Précipitations totales	960 (100%)	1007 (100%)	1058 (100%)	1042 (100%)
Évapotranspiration réelle	638 (66%)	565 (56%)	603 (57%)	595 (57%)
Ruissellement de surface	181 (19%)	260 (26%)	272 (26%)	261 (25%)
Infiltration totale	141 (15%)	183 (18%)	183 (17%)	187 (18%)

L'évolution est similaire pour le bassin Des Anglais (tableau 5.8) hormis pour l'évapotranspiration réelle qui est d'abord relativement stable dans le temps (variations de $\pm 3\%$ selon la décennie). Également, les proportions des principales composantes (57% pour l'évapotranspiration réelle, 23% pour le ruissellement de surface et 20% pour l'infiltration totale) pour la période récente (2011-2020) sont similaires à celles estimées sur bassin voisin de L'Acadie (57% pour l'évapotranspiration réelle, 25% pour le ruissellement de surface et 20% pour l'infiltration totale).

Tableau 5.8. Composantes majeures du bilan hydrologique sur le bassin versant Des Anglais (030907).

Décennie	1981-1990	1991-2000	2001-2010	2011-2020
Précipitations totales	940 (100%)	1002 (100%)	1031 (100%)	996 (100%)
Évapotranspiration réelle	564 (60%)	569 (57%)	603 (59%)	567 (57%)
Ruissellement de surface	201 (21%)	239 (24%)	232 (22%)	230 (23%)
Infiltration totale	174 (19%)	193 (19%)	196 (19%)	199 (20%)

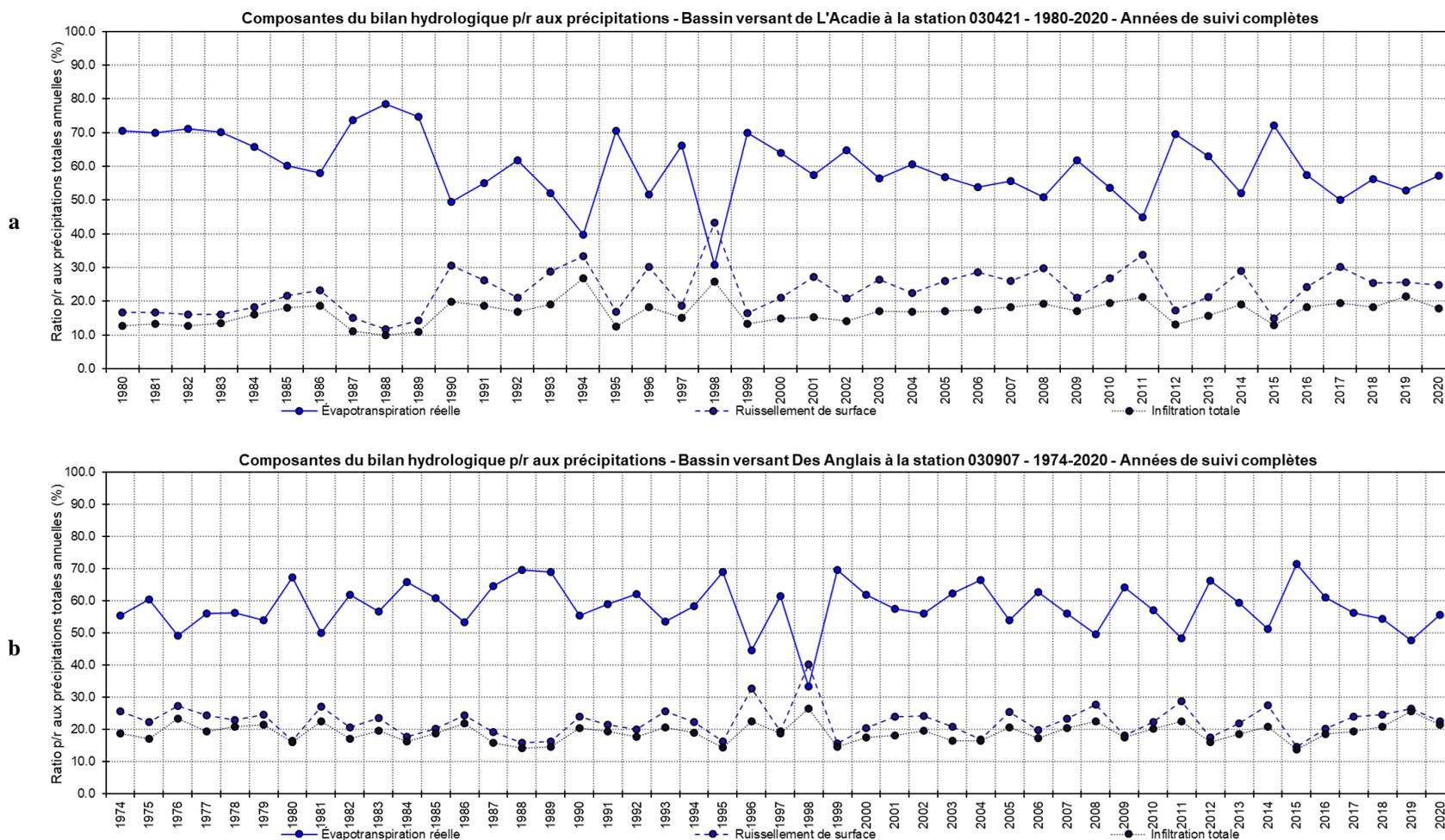


Figure 5.13. Principales composantes du bilan hydrologique par rapport aux précipitations totales (a) sur le bassin versant de L'Acadie (station hydrométrique 030421) et sur (b) le bassin versant jaugé Des Anglais (station hydrométrique 030907).

Ces constats sont également confirmés par l'analyse des variations interannuelles des principales composantes du bilan hydrologique pour chaque bassin (figure 5.13). En effet, pour le bassin de L'Acadie (figure 5.13.a), les années 80 se démarquent des autres périodes avec une évapotranspiration réelle importante par rapport au ruissellement de surface et à l'infiltration totale. Ensuite, les années 90 sont marquées par une variabilité importante qui n'est pas retrouvée dans les 2000. Finalement, les années récentes (2010 à l'actuel) sont de nouveau marquées par une variabilité, certes moindre que celle des années 90. Pour les deux bassins (figure 5.13), l'année 1998 fait figure d'exception avec une forte baisse de la part d'évapotranspiration par rapport aux deux autres composantes. Le bassin Des Anglais (figure 5.13.b) est quant à lui caractérisé par une variabilité interannuelle plutôt constante dans le temps.

Ces résultats sont donc encourageants dans la perspective d'utiliser les mesures de débit total et de débit de base des deux bassins versants jaugés (L'Acadie et Des Anglais) pour le calage du modèle d'infiltration HELP (voir section 5.5). En effet, le comparatif avec les anciens projets (voir tableau 5.7) montre que les parts des composantes estimées à partir des débits totaux et des débits de base aux deux stations hydrométriques de la région d'étude s'approchent de ce qui a déjà été estimé avec HELP dans des contextes proches. De plus, l'analyse des tendances depuis le début du suivi à chaque station n'a pas révélé de réduction des débits de base (et donc de l'infiltration totale) pouvant être relié à une hausse des pressions sur la ressource en eau souterraine, tout du moins sur les deux bassins étudiés (L'Acadie et Des Anglais). Cette absence de tendance en lien avec des prélèvements d'eau est peut-être reliée au fait que les principaux prélèvements sont localisés en périphérie ou en dehors même des limites des deux bassins étudiés (cartes 9 et 10). Ce constat vient confirmer l'usage des données de débit pour le calage du modèle HELP qui devrait donc retranscrire le processus naturel de recharge au roc sans influence de phénomènes anthropiques.

5.2 Méthode d'estimation de la recharge avec PyHELP

Comme indiqué en introduction de cette section, il est nécessaire de préciser le taux de recharge annuel de l'aquifère régional rocheux sur la région d'étude. En effet, les données antérieures ne permettent pas de déterminer avec précision la recharge distribuée sur l'ensemble de la région. De plus, il est utile de mettre à jour les anciennes estimations en intégrant des données climatiques récentes (1960-2020) à partir d'une grille climatique uniformisée. L'emploi de cette grille permettra d'estimer la recharge historique mais également d'évaluer assez simplement ce taux de recharge selon les projections futures. Il sera donc possible d'actualiser les indicateurs de stress sur l'eau souterraine initialement définis (Ballard et al., 2021) et de déterminer si la pression sur la ressource en eau souterraine évolue de manière significative dans le temps.

La recharge distribuée de l'aquifère régional rocheux a été estimée avec le modèle d'infiltration HELP (*Hydrologic Evaluation of Landfill Performance*) développé par Schroeder et al. (1994). Ce modèle d'infiltration a été très largement utilisé par le passé pour évaluer la recharge diffuse dans des contextes similaires et notamment dans plusieurs régions du Québec : bassin versant de la rivière Châteauguay (Croteau, 2006), en Montérégie Est (Carrier et al., 2013), en Chaudière-Appalaches (Lefebvre et al., 2015) ou encore dans les régions de Laval et des Laurentides (Raynauld et al., 2018). À partir de données climatiques (température moyenne, précipitations totales et radiation solaire), ce modèle physique d'infiltration quasi-2D fournit pour chaque cellule de la grille un bilan hydrologique quotidien comprenant (1) le ruissellement de surface, (2) l'évapotranspiration réelle, (3) le ruissellement hypodermique et (4) la recharge de l'aquifère ciblé.

La force de ce modèle est l'intégration de nombreux processus du cycle hydrologique : (1) l'accumulation de neige au sol, (2) la fonte de ce stock de neige, (3) le ruissellement de surface, (4) l'infiltration, (5) l'évapotranspiration potentielle, (6) la transpiration des plantes, (7) l'évapotranspiration des sols, (8) les variations de stockage en eau dans le sol, (9) le ruissellement hypodermique, (10) la percolation sous la zone racinaire et (11) le drainage latéral saturé (Huchet, 2018 ; Schroeder et al., 1994). De plus, le modèle est généralement fiable puisque directement basé sur les propriétés physiques des matériaux (sol, dépôts meubles et roc) et aussi sur des données climatiques journalières validées (grille Info-Climat). L'usage de cette grille permet également de s'affranchir de l'incertitude liée à la distribution non uniforme des stations climatiques et d'y intégrer des données climatiques futures. En plus d'obtenir une distribution spatiale et temporelle de la recharge, les résultats peuvent être calés à la fois sur le débit de base et le débit total d'un bassin jaugé, permettant ainsi d'assurer la cohérence du bilan hydrologique, notamment les valeurs représentatives de l'évapotranspiration réelle et du ruissellement de surface (Huchet, 2018).

Le but premier du modèle HELP n'étant pas l'estimation de la recharge distribuée sur une grille, les mailles fonctionnent donc de manière indépendante, c'est-à-dire qu'il ne peut pas y avoir d'écoulement entre deux mailles adjacentes. Le calage avec les débits d'un cours d'eau jaugé est donc possible uniquement sur une large échelle de temps, en général sur une année hydrologique, puisque le modèle ne permet pas de reproduire les hydrogrammes de rivières (Huchet, 2018). Les facteurs anthropiques, tels que la présence de pompes ponctuels ou les changements d'occupation des sols, ne peuvent également pas être considérés lors des simulations. De plus, le modèle HELP reproduit assez difficilement certains processus comme la fonte de la neige. Finalement, un autre inconvénient, identifié par Rivard et al. (2014), concerne la surestimation de la recharge. Il est en effet difficile d'évacuer l'eau lorsque celle-ci s'infiltré sous la zone racinaire. Pour s'affranchir de cet inconvénient, il est recommandé d'ajouter une couche peu perméable au modèle conceptuel de couches dans le but de générer du ruissellement hypodermique et donc de limiter la percolation sous la zone racinaire. Cette adaptation a déjà été appliquée avec succès dans le cadre du projet Châteauguay (Croteau, 2006) mais également au Nouveau-Brunswick (Huchet, 2018) et dans les Laurentides (Raynauld et al., 2018).

Puisque HELP fonctionne initialement à l'échelle d'une seule cellule (ou maille), il a été nécessaire de l'adapter dans le but de travailler sur des grilles composées d'une multitude de mailles aux propriétés spécifiques pour fournir un bilan hydrologique intégrateur sur l'ensemble d'un territoire donné. Ainsi, afin de faciliter l'application de HELP pour évaluer la recharge des eaux souterraines spatialement distribuée à l'échelle régionale, une nouvelle librairie Python nommé PyHELP a été développée récemment (Gosselin et al., 2019). Cette librairie inclut un ensemble d'outils facilitant l'intégration des données météorologiques sur grille ou par station, des conditions du sol définies par une série de cartes numériques (SIG - Système d'information géographique), ainsi que des propriétés du sol et des matériaux géologiques dans les fichiers d'entrée du logiciel HELP. PyHELP traite également les résultats des estimations de recharge avec HELP et permet de les afficher sous forme de cartes et de graphiques. Dans PyHELP, la procédure de calage est grandement facilitée par la production automatisée des comparaisons des résultats de simulation avec le débit total et le débit de base des hydrogrammes de cours d'eau pour calibrer les paramètres d'entrée du modèle. PyHELP accompagne ainsi les utilisateurs tout au long du processus d'estimation de la recharge avec le modèle HELP, de l'assemblage du fichier d'entrée, au calage du modèle et à la documentation des résultats.

La procédure de calcul pour l'estimation de la recharge avec PyHELP est illustrée à la figure 5.14. Une grille uniforme est d'abord créée. Par la suite, les données géomatiques (latitude, longitude et identification de la maille) et climatiques (latitude, vitesse du vent, humidité relative, période croissance) ainsi que les propriétés des couches de sols (indice de surface foliaire, profondeur racinaire, type de couche, porosité, capacité au champ, point de flétrissement, conductivité hydraulique, pente, distance de drainage, numéro de courbe et épaisseur) doivent être définies pour chacune des mailles de la grille. Le tout est ensuite formaté et sauvegardé dans un fichier csv selon le format prescrit dans la documentation (<https://pyhelp.readthedocs.io/en/latest/data.html>). Des scripts, développés à la suite du projet de Raynauld et al. (2018) simplifient la compilation de ces données de base sur chaque maille. Développés à l'interne sur Matlab, ces scripts permettent d'extraire certains paramètres à partir de couches SIG ou de base de données de façon automatisée. De même, si une mise à jour d'une couche SIG ou d'une base de données est disponible, il est alors possible d'actualiser assez rapidement les paramètres attribués à chaque maille de la grille. Ensuite, les données climatiques quotidiennes (précipitations totales, température moyenne de l'air et radiation solaire) doivent être préparées et sauvegardées dans des fichiers csv au format également recommandé dans la documentation de PyHELP. Une fois les données d'entrée préparées, PyHELP permet d'exécuter le modèle HELP pour calculer l'évapotranspiration réelle, le ruissellement de surface, le ruissellement hypodermique (superficiel et/ou profond) et la recharge de l'aquifère rocheux sur une base mensuelle pour chacune des cellules pour lesquelles les conditions le permettent. PyHELP permet ensuite de traiter les résultats et de les afficher sous forme de cartes ou de graphiques. Plus de détails sur la préparation des données d'entrée nécessaires à l'application du modèle PyHELP sont donnés dans les sections 5.4 et 5.5 (un protocole détaillé est joint à l'annexe 5).

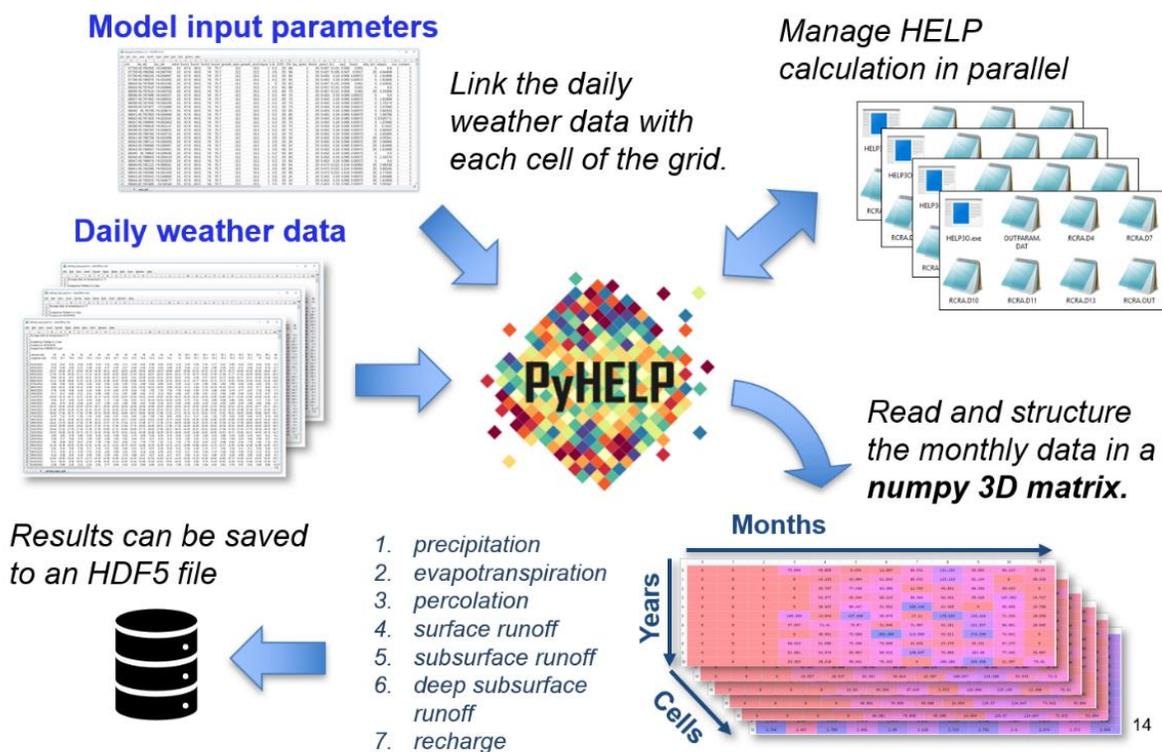


Figure 5.14. Procédure d'estimation de la recharge avec PyHELP (Gosselin et al., 2019).

La phase de calage de la recharge consiste à optimiser les paramètres du modèle (profondeur racinaire, conductivité hydraulique des sols, etc.) de façon à ajuster les composantes du bilan hydrique annuel calculées avec HELP au débit total mesuré et au débit de base estimé à une station de suivi d'un cours d'eau sur un bassin jaugé. Cette estimation du débit de base a été faite à l'aide d'un filtre appliqué au débit total, tel que décrit à la section 5.1. À partir des résultats de HELP, le débit total annuel est calculé en additionnant les valeurs obtenues pour chaque cellule pour la recharge réelle avec les ruissellements de surface et hypodermique tandis que le débit de base est obtenu en sommant la recharge réelle avec le ruissellement hypodermique. L'évapotranspiration réelle annuelle estimée avec HELP est calée à la valeur obtenue de la différence entre les précipitations totales et le débit total du cours d'eau par unité de superficie du bassin versant. L'infiltration totale (somme de la recharge au roc et du ruissellement hypodermique) obtenue de HELP est calée en la comparant au débit de base du cours d'eau rapportée en lame d'eau avec l'aire du bassin drainé qui a été obtenu précédemment de la séparation des hydrogrammes de cours d'eau (voir section 5.1). En plus des détails du calage fournis à la section 5.5, un exemple détaillé du processus d'estimation de la recharge avec PyHELP est aussi disponible dans Raynauld et al. (2018).

5.3 Préparation des données d'entrée

Comme indiqué dans la section précédente, la mise en œuvre de l'outil PyHELP pour estimer la recharge historique et future nécessite un travail de compilation de données d'entrée en amont. En plus des données météorologiques traitées dans la section suivante, une grille est créée regroupant l'ensemble des informations utiles au calcul de la recharge au roc. L'annexe 5 fournit plus de détails sur la préparation des données d'entrée utilisées pour la modélisation de la recharge au roc.

Dans le cadre du présent projet, la grille établie est constituée de 27 331 mailles carrées de 250 m de côté et couvrant une zone de l'ordre de 1 707 km². Ce territoire a été délimité afin d'intégrer à la fois les deux aires drainées des stations hydrométriques précédemment mentionnées (L'Acadie et Des Anglais) nécessaires au calage du modèle (section 5.5) ainsi que les deux modèles d'écoulement – local et régional – de Mercier (voir carte 2).

La première des données concerne la vitesse moyenne du vent extraite à partir du *Global Wind Atlas* (<https://globalwindatlas.info/download/gis-files>) sur deux grilles de 250 m de résolution horizontale : une aux USA et l'autre au Canada. Il s'agit là de la vitesse moyenne du vent à 10 m au-dessus du sol sur la période 2008-2017. Les données de réanalyse extraites en m/s à partir de cet atlas sont ensuite converties en km/h pour être utilisées dans PyHELP.

PyHELP nécessite également des données d'humidité relative ; une par trimestre : janvier à mars, avril à juin, juillet à septembre et octobre à décembre. Ces données proviennent du *Climate Data Store* (CDS) du programme d'observation de la Terre de l'Union Européenne, appelé « Copernicus », et plus spécifiquement du jeu de données *Essentiel Climate Variables for assessment of climate variability from 1979 to present* (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/ecv-for-climate-change?tab=overview>). Ce dernier contient un large éventail de variables climatiques sur une base mensuelle dont les données sont téléchargeables sur une grille mondiale de 0.25° de résolution horizontale. Pour l'humidité relative, les moyennes mensuelles sur la période des normales climatiques (1981-2010) ont été extraites puis moyennées par trimestre pour obtenir les quatre valeurs trimestrielles en % imposées par le modèle d'infiltration.

Le modèle impose également l'ajout de données relatives à la période de croissance des végétaux : la date de début et la date de fin, exprimées en jour julien. Deux grilles de 10 km de résolution horizontale ont été récupérées à partir de l'atlas agroclimatique du Québec de 2012 (<https://www.agrometeo.org/atlas/category/saiscrois/therm>). Elles correspondent à la date moyenne de début et de fin de la saison de croissance des végétaux sur la période 1979-2008. À noter que le début de la saison de croissance est défini comme le 5^{ième} jour consécutif où la moyenne mobile pondérée des températures moyennes quotidiennes devient supérieure à 5,5 °C tandis que la fin correspond au 5^{ième} jour consécutif où cette valeur passe sous les 5,5 °C. À noter que le gradient est quasiment nul sur le territoire où la recharge a été calculée (voir annexe 5 pour plus de détails) : cette période commence généralement entre le 18 et le 20 avril (108 à 110^e jour julien) et prend fin entre le 17 et le 20 novembre (321 à 324^e jour julien).

L'utilisation du territoire n'est pas directement utilisée par le modèle PyHELP mais sert au calcul de plusieurs paramètres utiles au modèle d'infiltration : l'indice de surface foliaire (seulement aux États-Unis), la profondeur d'évapotranspiration, le numéro de courbe et la distance au drain. Pour la portion québécoise, l'utilisation du territoire produite par le MELCC est issue du site Données Québec (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/utilisation-du-territoire>). La version de 2018 de 30 m de résolution horizontale a été utilisée dans le présent projet. Pour la portion américaine, les données ont été extraites de la *National Land Cover Database* (NCCD) gérée par le *Multi-Resolution Land Characteristics Consortium* (<https://www.mrlc.gov/data?f%5B0%5D=category%3Aland%20cover&f%5B1%5D=region%3Aconus>). La version de la NCCD produite en 2019 à une résolution horizontale de 30 m a ici été utilisée. À partir de l'utilisation du territoire extraite de ces deux couches d'information, une utilisation du territoire simplifiée en sept classes a été générée via un script Matlab et des dictionnaires : culture intensive, culture extensive, boisé, résidentielle commerciale dense, résidentielle commerciale peu denses, milieu humide et eau ou non classé.

L'indice de surface foliaire, souvent nommé LAI pour *Leaf Area Index*, représente le couvert végétal. Cet indice sans dimension est lui aussi nécessaire pour le calcul de la recharge avec PyHELP. Une grille de 100 m de résolution horizontale couvrant le territoire canadien et produite par Ressources naturelles Canada (RNCan) a été utilisée (<https://open.canada.ca/data/fr/dataset/37745ea7-d0cf-4ef6-b6b8-1cb3a7fce0b8>). Il s'agit d'une carte du LAI maximal pendant la saison de croissance (juin-juillet-août) et actualisée régulièrement. Celle de 2020 a été utilisée et un facteur de réduction d'échelle de 0.05 a dû être appliqué pour obtenir la valeur de LAI utilisée dans PyHELP (Fernandes et Sun, 2021). Un script Matlab développé en interne permet de calculer cet indice pour les mailles situées aux États-Unis à partir d'un dictionnaire. Ce dernier associe l'utilisation du territoire au LAI à partir de données compilées dans des travaux antérieurs par Huchet (2018) revus par Raynauld et al. (2018). Plus de détails sont disponibles dans l'annexe 5.

La profondeur d'évapotranspiration traduite par la profondeur racinaire et exprimée en cm dans PyHELP est également obtenue via ce même script Matlab à partir de deux dictionnaires : un pour les mailles situées au Québec ou l'autre pour celles localisées aux États-Unis. Les travaux antérieurs de Huchet (2018) complétés par ceux de Raynauld et al. (2018) ont en effet permis d'associer la profondeur racinaire communément rencontrée dans la bibliographie en fonction de l'utilisation du territoire extraite au droit de chaque maille. La démarche est décrite plus spécifiquement dans l'annexe 5.

La pente de la surface du sol (en %) au droit de chaque maille a été générée dans ArcGIS à partir du raster de référence combinant le LiDAR et le MNT sur les autres portions non couvertes. Afin d'être cohérent, ce dernier correspond au raster de l'élévation du sol en mètre par rapport au niveau moyen de la mer déjà utilisé pour la production de la carte piézométrique (voir annexe 2).

Les données relatives à la pédologie et donc aux types de sol sont également utiles pour plusieurs paramètres d'entrée du modèle comme le calcul du groupe hydrologique et l'attribution des propriétés hydrauliques des sols à partir des textures. Le protocole joint en annexe 5 offre plus d'informations sur la démarche appliquée selon les données disponibles au Québec ou aux États-Unis. Au Québec, une extraction de la pédologie a été directement demandée à l'IRDA (Institut de recherche et de développement en agroenvironnement) sur la zone d'évaluation de la recharge. Un groupe hydrologique (A, B, C ou D) a ensuite été attribué à chaque type de sol en se basant sur le code du sol et des informations extraites de Gagné et al. (2013), de Croteau (2006) et de Raynauld et al. (2018). La définition des textures de sol a été faite en utilisant une feuille de calcul intitulée *USDA Soil Texture Class Macro* (<https://glsi.agron.iastate.edu/2014/03/10/usda-soil-texture-class-macro/>) qui associe le nom du sol répertorié au Québec avec les textures de l'USDA (*U.S. Department of Agriculture*) via les proportions de sable, de silt et d'argile. Des ajustements ont été faits pour certains sols non répertoriés initialement afin de leur attribuer une texture dominante et un groupe hydrologique. De même, des opérations spécifiques détaillées dans l'annexe 5 ont dûes être appliquées sur les secteurs non cartographiés, dont les mailles au droit de la communauté autochtone de Kahanawake, où un lien a été fait avec le groupe hydrologique et la texture de sol en se basant sur la carte du Quaternaire (carte 5). Aux États-Unis, il est possible d'obtenir les données sur les groupes hydrologiques et les textures de sol de façon simplifiée à partir de la gNATSO (*Gridded National Soil Geographic Database*) et d'un outil à télécharger puis à ajouter à ArcGIS qui propose l'extraction de ces deux données sur grille à une résolution de 10 m (<https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/geo/?cid=nrcseprd1464625>). En outre, d'autres mailles particulières en nombre non significatif sur le territoire modélisé ont nécessité des opérations spécifiques manuelles (se référer à l'annexe 5 pour plus de détails).

Afin de prédire le ruissellement, le numéro de courbe (aussi appelé communément *Curve Number*) a lui aussi été calculé à l'aide du script Matlab développé à l'INRS. Il a initialement été défini par Monfet (1979) puis adapté par Croteau (2006) au contexte québécois et nécessite la collecte de trois paramètres : l'utilisation du territoire simplifiée, la pente de la surface du sol et le groupe hydrologique. À partir de dictionnaires, l'utilisation du territoire extraite au Québec et aux États-Unis a pu être simplifiée en cinq classes d'utilisation du sol (voir annexe 5). La pente de la surface du sol a aussi été calculée à partir du raster de référence d'élévation du sol (voir détails plus haut). Le groupe hydrologique, précédemment décrit, est d'abord traduit en code à l'aide d'un dictionnaire dans un script Matlab permettant finalement le calcul du numéro de courbe avec ce même script.

La distance au drain (en m) est établie pour chaque maille de la grille selon les six classes d'utilisation du territoire simplifié (la classe « eau ou non classé » ne permet pas d'établir de distance de drainage – voir annexe 5 pour les détails). Cette opération est réalisée dans Matlab via un script qui associe ces classes d'utilisation aux valeurs de distance de drainage avec un dictionnaire. Les valeurs utilisées correspondent à celles de Croteau et al. (2010) révisées lors des travaux de Raynauld et al. (2018).

L'établissement des couches nécessaires à PyHELP est plus complexe (voir détails dans l'annexe 5) car il intègre des données reliées à la pédologie (épaisseur et propriétés des sols), aux dépôts meubles (succession des unités stratigraphiques, épaisseur et propriétés de chaque unité) au roc (propriétés et base du modèle via la piézométrie). Le modèle géologique régional 3D détaillant les quatre unités stratigraphiques de la région (section 4) a été utilisé comme modèle hydrostratigraphique de base. En se fiant aux travaux de Croteau (2006), une épaisseur de till remanié de 1 m a toutefois été ajoutée lorsque l'épaisseur totale de till le permettait. Lorsque complète, la succession des cinq unités implémentées dans PyHELP était la suivante du roc jusqu'au sol : till compact, till remanié, matériel sous-jacent à l'argile, argile puis matériel sus-jacent à l'argile. Lorsque l'épaisseur totale de dépôts était inférieure à 1 m, alors le roc était considéré comme affleurant (via un script Matlab). Toujours dans Matlab, un dictionnaire a aussi permis l'attribution des propriétés (porosité, capacité au champ, point de flétrissement et conductivité hydraulique saturée) de chaque unité quaternaire en se basant sur les indications fournies dans Croteau (2006). C'est aussi le cas pour le roc où les propriétés ont été extraites de Croteau (2006) via ce même dictionnaire. Les propriétés des unités quaternaires et du roc sont d'ailleurs utilisées comme paramètre de calage du modèle (voir section 5.5).

Au-dessus des dépôts meubles, une épaisseur totale de sol de 1 m a systématiquement été ajoutée pour les mailles où le roc n'affleurait pas, à l'aide de Matlab. À ces sols ont été attribuées les textures et propriétés (porosité, capacité au champ, point de flétrissement et conductivité hydraulique saturée) en se fiant aux valeurs par défaut proposées par Schroeder et al. (1994) dans HELP. Les propriétés des sols sont fixes et ne sont donc pas modifiées lors de l'étape de calage (voir section 5.5).

L'élévation de la surface piézométrique (en m/NMM) produite dans le cadre du projet (section 3.4) est un élément essentiel puisqu'elle marque la base de la séquence des couches considérées dans le modèle HELP pour chaque maille. Quand le roc affleure, la piézométrie sert à définir l'épaisseur de roc considérée pour atteindre la nappe. Après extraction en chaque maille de la grille, ces opérations sont réalisées dans Matlab avec un script.

Le nombre de couches et les types de couche sont ensuite attribués directement dans Matlab avec un script. Le nombre de couche correspond à la séquence des unités hydrostratigraphiques (quaternaire et roc) complétées des horizons de sol à l'exception du cas où le roc est affleurant. Ensuite, le code HELP nécessite d'associer à chaque couche de la séquence un type traduisant le rôle de la couche. Trois types de couche sont considérés dans PyHELP : une couche de type 1 assure la percolation verticale de l'eau, une couche de type 2 permet le drainage latéral de l'eau et une couche de type 3 forme une barrière hydraulique qui limite l'infiltration de l'eau et favorise le drainage latéral dans la couche sus-jacente.

La succession des séquences et des types de couche sur l'ensemble de la zone où la recharge a été calculée sont indiquées dans le tableau 5.9. Les trois séquences suivantes représentent au total près de 90% du territoire où la recharge a été estimée : (1) sol, till remanié, till compact puis roc (55%), (2) sol, argile, till remanié, till compact puis roc (24%) et (3) sol, unités sus-jacentes à l'argile, argile, till remanié, till compact puis roc (11%). Le reste des séquences sont peu représentées avec généralement moins de 2% du territoire à l'exception des deux séquences suivantes : (1) sol, unités sous-jacentes à l'argile, till remanié, till compact puis roc (3%) et (2) sol, argile, unités sous-jacentes à l'argile, till remanié, till compact puis roc (3%).

Tableau 5.9. Séquences des unités stratigraphiques et attribution des types de couche dans PyHELP.

ID	Séquence des unités hydrostratigraphiques	Séquence des unités géologiques	Types de couche (HELP)	Nombre de mailles (ratio en %)
S1	4-5-6	Sol, T_{rem}, T_{comp}, Roc	1-2-3-2-3	14957 (54.73%)
S2	6	Roc	1	185 (0.68%)
S3	4-6	Sol, T _{rem} , Roc	1-2-3-2-3	15 (0.05%)
S4	3-4-5-6	Sol, U _{sous} , T _{rem} , T _{comp} , Roc	1-2-3-1-2-3	734 (2.69%)
S5	3-4-6	Sol, U _{sous} , T _{rem} , Roc	1-2-3-1-2-3	514 (1.88%)
S6	3-6	Sol, U _{sous} , Roc	1-2-3-2-3	9 (0.03%)
S7	2-4-5-6	Sol, Arg., T_{rem}, T_{comp}, Roc	1-1-2-3-2-3	6440 (23.56%)
S8	2-3-4-5-6	Sol, Arg., U _{sous} , T _{rem} , T _{comp} , Roc	1-1-2-3-1-2-3	913 (3.34%)
S9	1-2-4-5-6	Sol, U_{sus}, Arg., T_{rem}, T_{comp}, Roc	1-2-3-2-3-2-3	3000 (10.98%)
S10	2-4-6	Sol, Arg., T _{rem} , Roc	1-1-2-3-2-3	248 (0.91%)
S11	2-3-4-6	Sol, Arg., U _{sous} , T _{rem} , Roc	1-1-2-3-1-2-3	1 (0.00%)
S12	1-2-4-6	Sol, U _{sus} , Arg., T _{rem} , Roc	1-2-3-2-3-2-3	178 (0.65%)
S13	1-4-5-6	Sol, U _{sus} , T _{rem} , T _{comp} , Roc	1-2-3-1-2-3	51 (0.19%)
S14	1-4-6	Sol, U _{sus} , T _{rem} , Roc	1-2-3-1-2-3	6 (0.02%)
S15	1-2-6	Sol, U _{sus} , Arg., Roc	1-2-3-2-3	20 (0.07%)
S16	2-6	Sol, Arg., Roc	1-1-2-3	53 (0.19%)
S17	1-6	Sol, U _{sus} , Roc	1-2-3-2-3	7 (0.03%)

En gras : séquences les plus représentées (plus de 10%) ;

En italique : séquences les moins représentées (moins de 2%)

Sol : correspond aux trois horizons de sol ;

Unités hydrostratigraphiques et géologiques : (1) unités sus-jacentes à l'argile (U_{sus}), (2) argile (Arg.), (3) unités sous-jacentes à l'argile (U_{sous}), (4) till remanié (T_{rem}), (5) till compact (T_{comp}) et (6) aquifère régional de roc fracturé (Roc) ;

Types de couche (HELP) : (1) couche de percolation verticale, (2) couche de drainage latéral et (3) couche de barrière hydraulique.

Le modèle conceptuel (figure 5.15) permet de visualiser la succession des couches intégrées dans PyHELP. La succession complète affichée (neuf couches en tout) n'est toutefois pas rencontrée sur le territoire (voir tableau 5.9 où le nombre de couches maximal est de sept). Lorsque présent, la couche de sol de 1 m d'épaisseur a été subdivisée en trois horizons selon les types de couche associés : 20 cm pour la couche de type 1 (percolation verticale), 60 cm pour la couche de type 2 (drainage latéral) et 20 cm pour la couche de type 3 (barrière hydraulique). Lorsque du sol est présent, l'évapotranspiration est donc limitée à une profondeur de 80 cm car la couche de type 3 ne permet pas l'élimination de l'eau par évapotranspiration. Quand le roc est affleurant, l'évapotranspiration n'est pas limitée en profondeur mais seulement contrainte par la profondeur racinaire puisqu'au roc est attribué une couche de type 1 (percolation verticale). Dans le sol, la couche de type 2 assure un drainage latéral retranscrivant le ruissellement de sous-surface (hypodermique) superficiel. En-dessous du sol, seule l'unité d'argile est associée à une couche de type 3 (barrière hydraulique). Lorsque présente, elle induit alors du ruissellement hypodermique profond dans les unités sus-jacentes. Sous l'argile, de l'écoulement hypodermique est induit dans le reste des unités sous-jacentes et dans les tills par l'imposition d'une couche de type 3 (barrière hydraulique) pour le roc. Finalement, l'eau qui peut s'infiltrer et percoler jusqu'à atteindre l'aquifère rocheux correspond à la recharge au roc. Afin de respecter les contraintes imposées par HELP dans les successions des types de couche (Schroeder et al., 1994), des ajustements ont dû être faits pour certaines séquences (voir l'annexe 5 pour plus de détails). Finalement, une table reliant les types de couches aux séquences a été produite puis intégrée dans Matlab pour faire l'association de façon automatisée.

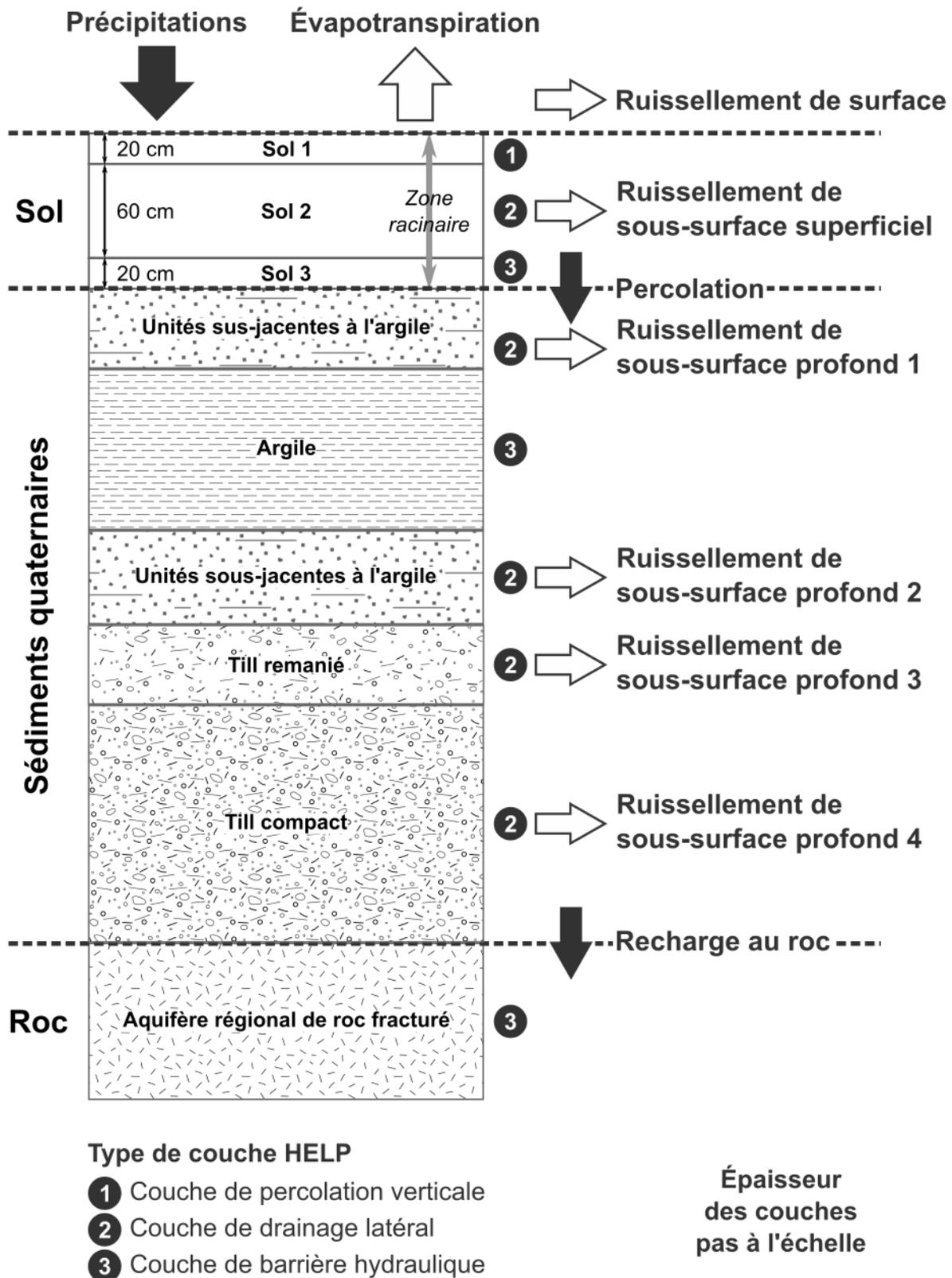


Figure 5.15. Modèle conceptuel (cas hypothétique représentant la séquence complète).

L'amélioration du modèle d'infiltration HELP avec l'outil PyHELP est notamment permise par l'ajout d'informations facilitant la sélection des mailles à utiliser pour le calcul de la recharge. En effet, certaines mailles ne sont pas incluses dans les calculs et doivent être identifiées. C'est le cas des mailles situées dans les zones urbaines ou encore des mailles non cartographiées. Ces deux contextes ont été identifiés en recoupant les informations issues de la couche d'utilisation du territoire et de la carte pédologique puis exclues des calculs. Afin de ne pas induire d'erreurs de calculs dans PyHELP, les mailles où il n'a pas été possible de définir un groupe hydrologique (-9999) ont été marquées comme « non cartographiées » et donc elles aussi retirées des calculs.

Les mailles en contexte « eau » ont été identifiées en combinant l'utilisation du territoire et la carte pédologique mais aussi grâce à deux bases de données (BD) disponibles sur le portail Données Québec et produites par le MERN : la BDAT (Base de données pour l'aménagement du territoire) à l'échelle 1/100000 (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/cartes-topographiques-a-l-echelle-de-1-100-000>) et la BDGA (Base de données géographiques et administratives) à l'échelle 1/1000000 (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/base-de-donnees-geographiques-et-administratives>). Les mailles incluses dans une zone tampon de 10 m autour des cours d'eau et des lacs de la BDAT et de 25 m autour de ces rivières et des étendues d'eau de la BDGA ont été associées aux mailles en contexte « eau ». Pour ces mailles, les précipitations sont directement converties en ruissellement en retirant la valeur moyenne annuelle de l'évaporation lacustre pour la zone d'étude de l'ordre de 759 mm/an (voir annexe 5 pour les détails du calcul). Ces cellules sont uniquement utilisées pour l'étape de calage décrite à la section 5.5.

Le dernier contexte de maille concerne celles localisées en bordure des cours d'eau qui sont incluses dans les calculs mais dont la recharge est entièrement convertie en ruissellement hypodermique. Ces mailles ont été sélectionnées à partir de la BDAT et BDGA lorsque comprises au sein de zones tampons respectives de 100 et 250 m autour des cours d'eau ou des lacs tout en se fiant aux conditions de confinement. Le calcul de niveau de confinement de l'aquifère rocheux a été établi grâce au modèle géologique en appliquant des critères de confinement similaires au PACES de Montérégie Est (Carrier et al., 2013) et aux travaux de Croteau (2006) dans le bassin de la rivière Châteauguay (voir annexe 5 pour les critères utilisés). Une maille située à la fois dans l'une des zones tampon et en conditions captive ou semi-captive a été classée en « bordure de cours d'eau ».

Le script Matlab créé ensuite un champ « Run » afin d'identifier les mailles utilisées dans PyHELP pour le calcul de la recharge, soit les mailles « normales » pour lesquelles la recharge est calculée et les mailles localisées en bordure de cours d'eau où la recharge est convertie en ruissellement de sous-surface. L'ensemble des contextes de maille sont identifiées dans le tableau 5.10.

Tableau 5.10. Contextes des mailles sur le secteur d'évaluation de la recharge et opérations appliquées.

ID	Maille	Nombre (ratio)	Usage dans PyHELP	Traitement de la maille
0	Eau	418 (1.53%)	Exclue du calcul	Calcul du ruissellement à partir de l'évaporation lacustre
1	Normale	22081 (80.79%)	Calculée dans PyHELP	Aucun
2	Bordure de cours d'eau	2329 (8.52%)	Calculée dans PyHELP	Ajout de la recharge au ruissellement hypodermique
4	Urbain	2425 (8.87%)	Exclue du calcul	Non concernée
5	Non cartographiée	78 (0.29%)	Exclue du calcul	Non concernée

Note : le contexte 3 n'a pas été considéré ici car pas utile (se référer aux travaux de Raynauld et al. (2018) pour plus d'informations).

Finalement, d'autres informations peuvent être ajoutées à la grille via la script Matlab dans le but de sélectionner les zones sur lesquelles le calcul doit être fait (par exemple un bassin en particulier ; tableau 5.11). Hormis la totalité de la zone d'évaluation de la recharge, l'étape de calage nécessite la sélection de mailles particulières incluses dans les deux bassins versants jaugés (L'Acadie et Des Anglais). À la suite du calage, c'est surtout la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier qui revêt un certain intérêt pour l'estimation de la recharge historique et en climat futur (sections 5.6 et 5.7) combinée aux modifications potentielles des usages (section 6).

Tableau 5.11. Sélection des mailles pour l'évaluation de la recharge.

Zone	Nombre (ratio)	Usage dans PyHELP
Secteur d'évaluation de la recharge	27331 (100.00%)	Zone élargie correspondant à l'ensemble du territoire d'évaluation de la recharge
Modèle d'écoulement régional de Mercier	15274 (55.89%)	Zone d'intérêt pour le calcul des recharges historiques et futures (sections 5.6 et 5.7)
Modèle d'écoulement local de Mercier	3614 (13.22%)	Zone restreinte délimitant le modèle local
Bassin versant de L'Acadie	11750 (42.99%)	Portion de bassin jaugée pour le calage du modèle d'infiltration (section 5.5)
Bassin versant Des Anglais	10263 (37.55%)	Portion de bassin jaugée pour le calage du modèle d'infiltration (section 5.5)

L'étape d'assemblage de toutes les informations extraites au droit de chaque maille de la grille et décrites dans la présente section est réalisée avec un script Matlab pour produire le fichier d'entrée formaté adéquatement pour PyHELP. L'outil développé par Gosselin et al. (2019) se charge ensuite du calcul de la recharge au roc et des autres paramètres (évapotranspiration, ruissellements de surface et hypodermique) en se basant sur les intrants climatiques fournies en entrée sur une base quotidienne : température moyenne, précipitations totales et radiation solaire. La compilation et le formatage des données climatiques est décrit dans la section 5.4.

5.4 Intégration des données climatiques

Les données climatiques nécessaires au lancement du modèle d'infiltration PyHELP doivent être produites sur une base journalière et comprennent : les précipitations totales (mm), la température moyenne (°C) et la radiation solaire (MJ/m²). Aux fins des présents travaux, une distinction doit être faite entre les données climatiques historiques (annexe 5) et celles issues des simulations climatiques futures qui ont nécessité un travail particulier (voir détails dans l'annexe 6).

Les données historiques de la grille Info-Climat ont été utilisées pour la production de deux fichiers d'entrée du modèle PyHELP : les précipitations totales et la température moyenne. Cette grille couvre le territoire provincial avec des mailles de 0.1° de résolution et résulte de l'interpolation de données ponctuelles issues de stations météorologiques distribuées au Québec (Bergeron, 2017). La grille fournie par le MELCC débute au 1^{er} janvier 1960 et se termine au 31 décembre 2021. Les fichiers transmis au format NetCDF sont compilés par année et par type de donnée : précipitations totales et températures moyennes. Un script Python développé en interne à l'INRS assure l'association des mailles de la grille Info-Climat avec les mailles au 250 m de la grille de recharge. Ce script se charge également du formatage des deux fichiers pour PyHELP et aussi de la sélection de la période souhaitée en l'occurrence du 1^{er} janvier 1980 au 31 décembre 2021. Pour les 28 mailles de la grille Info-Climat recoupant la zone d'évaluation de la recharge, des tables de connexion assurent le lien avec les 27331 mailles de la grille de recharge.

Une autre grille a dû être utilisée pour générer le fichier d'entrée formaté de radiation solaire. Celle-ci est issue du jeu de données *Agrometeorological indicators from 1979 to present derived from reanalysis* téléchargeable sur le site de la Commission européenne du *Climate Data Store* (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-agrometeorological-indicators?tab=overview>). La couverture de cette grille de 0.1° de résolution horizontale est mondiale et les données disponibles sur une base quotidienne depuis 1979. Les fichiers téléchargés sont au format NetCDF et les données agglomérées par année au sein desquels la radiation solaire est exprimée en J/m²/jour. Le script Python évoqué précédemment est également utilisé ici pour produire les fichiers de radiation solaire au format adapté à PyHELP selon la période souhaitée (du 1^{er} janvier 1980 au 31 décembre 2021) pour les 33 mailles de radiation solaire recoupant la zone d'évaluation de la recharge. Tout comme les données de température et de précipitations, le script de l'INRS permet l'association des mailles de cette grille de radiation solaire avec celles de la grille de recharge par l'intermédiaire d'une table de connexion associant les coordonnées (latitude et longitude) des centroïdes de chaque maille.

Après avoir calée (section 5.5) puis estimée la recharge historique (section 5.6), le travail nécessitait l'intégration de simulations climatiques afin d'évaluer la recharge en climat futur (section 5.7). De nombreux modèles climatiques existent ; il est donc suggéré de faire une sélection des quelques modèles représentatifs afin de ne pas alourdir le traitement de l'information avec cette importante quantité de données. À l'inverse, choisir seulement un modèle climatique ne permettait pas de bien représenter la variabilité attendue du climat dans le futur. Afin d'assurer une certaine cohérence avec les projets menés au sud du Québec dans le cadre du PACC (Plan d'action sur les changements climatiques) par l'INRS, l'UQAM et l'Université Laval (Larocque et al., 2021), le choix s'est porté sur les 12 modèles déjà sélectionnés par l'UQAM (tableau 5.12). Ces 12 modèles ont été sélectionnés par clustering car ils représentent le plus fidèlement les conditions moyennes envisagées en climat futur pour les précipitations et les températures (Dubois et al., 2022). Ils proviennent de la 5^{ième} phase du projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP5 : *Coupled Modelling Intercomparison Project Phase 5*). Huit de ces modèles sont basés sur un scénario RCP (*Representative Concentration Pathway*) de 4.5 et les quatre autres sur un RCP 8.5. La majorité des modèles (11 sur 12) proviennent du même ensemble (r11p1) hormis pour le GIR. À l'exception du modèle GF3 qui se termine au 31 décembre 2095, les simulations débutent au 1^{er} janvier 2006 pour se terminer au 31 décembre 2100. Ouranos a directement fourni à l'INRS les séries de données post-traitées de ces 12 modèles pour les variables quotidiennes suivantes : précipitations totales, températures minimales et maximales. Les fichiers sont regroupés par variables (3) et par simulation (12) soit un total de 36 fichiers transmis au format NetCDF. Un script Python permet de produire les fichiers d'entrée pour PyHELP selon la période souhaitée (1^{er} janvier 2006 au 31 décembre 2095) en sélectionnant les bonnes mailles des modèles à partir de tables de connexion reliées aux mailles de la grille de recharge. Comme six des 12 modèles ne tiennent pas compte des années bissextiles, le script comble aussi les quelques jours manquants en attribuant une valeur nulle aux précipitations pour cette journée et applique une interpolation linéaire entre les jours $n-1$ et $n+1$ pour estimer la température moyenne. Cette dernière valeur est d'ailleurs calculée pour chaque jour directement dans le script à partir des données initiales de températures minimales et maximales. Pour les données de précipitation, les modèles climatiques peuvent induire de très petites valeurs quotidiennes pouvant être assimilées à la rosée mais ne représentant pas la pluviométrie. Afin de minimiser cet effet, un seuil de 0.5 mm a été appliqué en-dessous duquel les précipitations journalières sont considérées comme nulles. Cette opération est directement appliquée dans le script Python.

Tableau 5.12. Modèles climatiques sélectionnés pour les simulations de la recharge en climat futur.

Modèle	Code	RCP	Ensemble	Période	Années bissextiles	Modèle de radiation solaire*
ACCESS1-0	A10	4.5	rlilp1	2006-2100	Oui	A10
ACCESS1-3	A13	8.5	rlilp1	2006-2100	Oui	A13
bcc-csm1-1-1m	B1M	4.5	rlilp1	2006-2100	Non	B1M
BNU-ESM	BNU	8.5	rlilp1	2006-2100	Non	BNU
CanESM2	CE2	4.5	rlilp1	2006-2100	Non	CE2
inmcm4	INM	4.5	rlilp1	2006-2100	Non	INM
GISS-E2-R	GIR	4.5	r6ilp3	2006-2100	Non	A10
CMCC-CMS	CMS	4.5	rlilp1	2006-2100	Oui	A10
GFDL-CM3	GF3	4.5	rlilp1	2006-2095	Non	A10
MIROC-ESM-CHEM	MIC	8.5	rlilp1	2006-2100	Oui	A13
MIROC-ESM	MIE	4.5	rlilp1	2006-2100	Oui	A10
MRI-ESM1	MRE	8.5	rlilp1	2006-2100	Oui	A13

*L'attribution du modèle de radiation solaire s'est basée sur un comparatif détaillé dans l'annexe 6.

Les données fournies par Ouranos ne comprennent pas de grilles de radiation solaire quotidiennes en climat futur. Ainsi, il a été nécessaire de télécharger ces données toujours par l'intermédiaire du *Climate Data Store* (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cmip5-daily-single-levels?tab=overview>). Seulement six des 12 modèles climatiques retenus disposent de données de radiation solaire (voir tableau 5.12). Pour les six autres, les données de radiation solaire des modèles A10 et A13 leur ont été attribuées selon le RCP après analyse des données de radiation solaire disponibles (voir description dans l'annexe 6). Le script Python développé pour produire les fichiers de températures et de précipitations a aussi été utilisé pour formater les données de radiation solaire pour PyHELP du 1^{er} janvier 2006 au 31 décembre 2095 en assurant également la conversion des données de rayonnement en MJ/m² à partir des W/m².

À partir du script principal du module PyHELP, il est alors possible de lire les données d'entrée produites sur une base quotidienne : précipitations totales, températures moyennes et radiation solaire. Les divers scripts développés permettent de produire un large éventail de fichiers en sortie au format csv et ce pour chaque composante du bilan hydrologique : les précipitations totales, l'évapotranspiration, le ruissellement de surface, le ruissellement hypodermique (superficiel et profond) et la recharge au roc. Ces fichiers comprennent des grilles pour l'export vers ArcGIS et la visualisation spatiale des données simulées ainsi que des tables présentant les moyennes annuelles et mensuelles de chaque composante sur le secteur modélisé. De plus, le script permet de sortir des graphiques des valeurs annuelles ainsi que des moyennes mensuelles et annuelles des cinq composantes du bilan hydrologique. Pour l'étape de calage (section 5.5) qui se base uniquement sur les données climatiques historiques, le script produit également deux graphiques : (1) la comparaison des débits de base et totaux annuels mesurés avec les valeurs estimées dans PyHELP et (2) les valeurs annuelles réelles et simulées des débits de base et totaux selon les années.

5.5 Calage du modèle d'infiltration

Le calage du modèle a nécessité l'emploi de deux fichiers – un par bassin versant jaugé – compilant les débits totaux annuels mesurés aux deux stations hydrométriques et les débits de base annuels auparavant calculés lors du calcul du bilan hydrologique préliminaire (voir section 5.1 et annexe 4). Ainsi, pour le bassin versant de L'Acadie (030421), le calage a pu être fait sur l'ensemble de la période de mesure à la station de jaugeage, soit entre 1980 et 2020 (41 ans). Quant au bassin versant Des Anglais (030907), il dispose de mesures de débit entre 1974 et 2020. Toutefois, comme les données récupérées de la grille Info-Climat couvraient seulement la période allant de 1980 à 2021, le calage a lui aussi été fait sur la période allant de 1980 à 2020.

Plusieurs étapes ont été nécessaires pour aboutir à un calage jugé optimal pour le calcul de la recharge historique (section 5.6) et future (section 5.7) en utilisant les paramètres finalement calés. Lors du calage, l'objectif est de minimiser les erreurs RMSE et ME sur le débit total et le débit de base simulé par rapport aux débits observés tout en vérifiant l'adéquation des débits obtenus par analyse visuelle grâce aux figures produites avec PyHELP (figures 5.16 et 5.17). Cette phase de calage a été réalisée en ajustant certains paramètres du modèle directement dans l'outil PyHELP ou en les modifiant en amont dans les fichiers d'entrée via les dictionnaires et le script Matlab. Pour le calage, les composantes du bilan hydrologique simulées pour les cellules « eau » sont utilisées en plus des valeurs des composantes obtenues pour les cellules « normales » et les cellules en « bordure de de cours d'eau ». Sur les deux bassins versants jaugés, une première simulation a donc été faite avec l'ensemble des paramètres par défaut afin d'orienter le calage du modèle.

La première phase de calage s'est concentrée sur l'estimation du débit total calculé dans PyHELP en additionnant le ruissellement de surface, les ruissellements hypodermiques et la recharge au roc. Le débit total simulé annuellement (en mm/an) est alors comparé au débit total mesuré aux deux stations de jaugeage pour chaque année de la période 1980-2020. Cette étape initiale vise à caler l'évapotranspiration qui influence directement la quantité d'eau contribuant au débit total du cours d'eau. Cette composante est sensible à la profondeur racinaire et à la température de gel. En effet, des études précédentes menées par Huchet (2018) et Raynauld et al (2018) ont démontré que le taux d'évapotranspiration était très sensible aux variations de profondeur des racines. De plus, la température de gel au sol est généralement inférieure à 0 °C puisque le sol est isolé thermiquement de l'air sous un épais couvert de neige durant la période hivernale au Québec. Ainsi, plusieurs combinaisons de valeurs ont été testées pour ces deux paramètres (voir tableau 5.13). Comme le modèle initial sous-estimait le débit total, il a fallu réduire la profondeur racinaire et donc le taux d'évapotranspiration tout en réduisant la période de gel. Par conséquent, la profondeur racinaire a été divisée par deux (facteur de 0.5) et la température de gel fixée à -2.5°C. Néanmoins, en prenant les deux bassins individuellement, il s'avère que le calage optimal est celui avec un facteur correctif de 0.40 pour le bassin de L'Acadie majoritairement composé de cultures intensives (61% de son territoire) et de 0.55 pour celui Des Anglais essentiellement marqué par du boisé (57% du territoire du bassin). Ainsi, une distinction a été faite selon les mailles en appliquant des facteurs correctifs différents pour la profondeur racinaire en se fiant à l'utilisation du territoire simplifiée : 0.40 pour les mailles en culture intensive, 0.55 pour celles en boisé et 0.50 pour les autres (culture extensive, résidentielle et commerciale dense, résidentielle et commerciale peu dense et milieu humide). Cette étape secondaire affine alors les résultats du calage pour la première phase (voir tableau 5.14).

Tableau 5.13. Ajustement des paramètres de calage du modèle pour les deux bassins versants jaugés.

Phase	Calage	Paramètre	Gamme	Nombre de simulations	
1	Évapotranspiration	Profondeur racinaire	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 et 1.0 (facteur)	40	
		Température de gel	0, -1, -2 et -3 (°C)		
		Profondeur racinaire	0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60 et 0.65 (facteur)	35	
		Température de gel	-3.5, -3.0, -2.5, -2.0 et -1.5 (°C)		
		c	Profondeur racinaire	0.40 pour les cultures intensives (facteur)	1
				0.55 pour les boisés (facteur)	
				0.50 pour le reste de l'utilisation du territoire (facteur)	
	Température de gel	Fixée à -2.5 (°C)			
2	Ruissellement	Numéro de courbe	1.10, 1.15 et 1.20 (facteur)	3	
3	Recharge	Conductivité hydraulique	K_{base} (selon Croteau, 2006)	33	
			$K_{base}/10$ et $K_{base} * 10$		Dépôts meubles et roc
					Dépôts meubles seulement
			$K_{base}/10$, $K_{base} * 10$, $K_{base}/100$ et $K_{base} * 100$		Sus-jacent
					Argile
					Sous-jacent
					Till remanié
					Till compact
Ensemble des tills					
Roc					
4	Optimisation	Conductivité hydraulique	K_s calée (K_{base} pour toutes les unités sauf $K_{sus-jacent}/10$)	125	
		Température de gel	-2.3, -2.4, -2.5, -2.6 et -2.7 (°C)		
		Profondeur racinaire	0.90, 0.95, 1.00, 1.05 et 1.10 (facteur)		
		Numéro de courbe	1.13, 1.14, 1.15, 1.16 et 1.17		

Après calage de l'évapotranspiration, le taux d'infiltration total contribuant au débit de base a d'abord été calé en ajustant le numéro de courbe via un facteur correctif (tableau 5.13). Comme les débits de base simulés après la première phase de calage étaient légèrement surestimés par rapport aux débits de base mesurés, le ruissellement a été rehaussé en testant trois facteurs correctifs. Ceci fait en sorte de diminuer le taux d'infiltration totale et donc le débit de base modélisé par PyHELP en combinant la recharge et les ruissellements hypodermiques. Le facteur correctif optimal appliqué au numéro de courbe est égal à 1.15 (tableau 5.14). À la fin de cette seconde phase de calage, l'année 1998 a été exclues du calage puisqu'elle avait auparavant été identifiée comme une année particulière dont les mesures de débits semblaient peu probables (voir section 5.1).

La troisième phase de calage a concerné la modification des conductivités hydrauliques saturées (K_s) des diverses unités stratigraphiques (tableau 5.13). L'analyse de sensibilité de ce paramètre a été faite selon la procédure développée par Raynauld et al. (2018). Elle consiste à faire varier les conductivités hydrauliques du cas de base extraites de Croteau (2006) selon quatre facteurs ($K_s/10$, $K_s/100$, K_s*10 et K_s*100). Les facteurs $K_s/10$ et K_s*10 ont été appliqués pour l'ensemble des dépôts meubles et du roc ainsi que pour les dépôts meubles seuls. Les quatre facteurs ont ensuite été testés pour chaque unité indépendamment (sus-jacent, argile, sous-jacent, till remanié, till compact et roc) et également pour l'ensemble des tills. Le modèle fournissant le meilleur calage est celui divisant par 10 la conductivité hydraulique de l'unité sus-jacente à l'argile (tableau 5.14).

La dernière phase de calage a consisté à optimiser les divers paramètres précédemment testés en conservant les conductivités hydrauliques calées en phase 3 et en réajustant légèrement les valeurs de température de gel, de profondeur racinaire et de numéro de courbe (tableau 5.13). Finalement, la température de gel a été maintenue à -2.5°C tandis que le facteur pour la profondeur racinaire a été ajusté à 1.10 (en conservant toujours la variabilité selon l'usage du territoire ce qui donne 0.44 pour les mailles en culture intensive, 0.605 pour celles en boisé et 0.55 pour le reste des mailles) et celui pour le numéro de courbe légèrement modifié à 1.16. Cette ultime étape de calage a de nouveau diminué les erreurs sur les débits simulés par rapport aux débits observés (tableau 5.14).

Tableau 5.14. Résultats des diverses phases de calage du modèle pour les deux bassins versants jaugés.

		Bassin versant	L'Acadie				Des Anglais			
		Débit	Total		De base		Total		De base	
		Erreur	RMSE	ME	RMSE	ME	RMSE	ME	RMSE	ME
Phase	Calage									
Modèle par défaut		-	75.4	-18	58.5	19.2	55.9	6.2	64.6	41.4
1	a	Évapotranspiration	-	-	-	-	-	-	-	-
	b		75.3	-16	56.8	16.4	55.8	8.4	62.2	38.2
	c		74.4	-8.5	58.5	20	55.8	7.4	61.9	37.9
2	Ruissellement		73.6	-3.2	50.8	-2.6	56.5	11.8	47.4	15.5
	(sans l'année 1998)		62.4	3.2	45	1.2	46.9	17.2	44.6	18.7
3	Recharge		61.5	0.3	42.9	-1.7	46.9	17	44.2	18.5
4	Optimisation*		60.8	-0.8	43.4	-11.8	45.5	13.6	40.2	9.8

*Il s'agit des résultats pour le modèle final calé.

Les figures 5.16 et 5.17 présentent les résultats du calage des débits de base et totaux simulés par rapport aux débits observés (figures a) et leur variabilité interannuelle (figures b) pour chaque bassin versant jaugé. Que ce soit pour le bassin versant de L'Acadie ou celui Des Anglais, les diverses étapes de calage ont permis d'aboutir à un modèle dont les paramètres calés sont jugés appropriés pour la poursuite des calculs de la recharge notamment historique (section 5.6). L'annexe 5 jointe au présent rapport offre également plus de détails sur la procédure de calage appliquée.

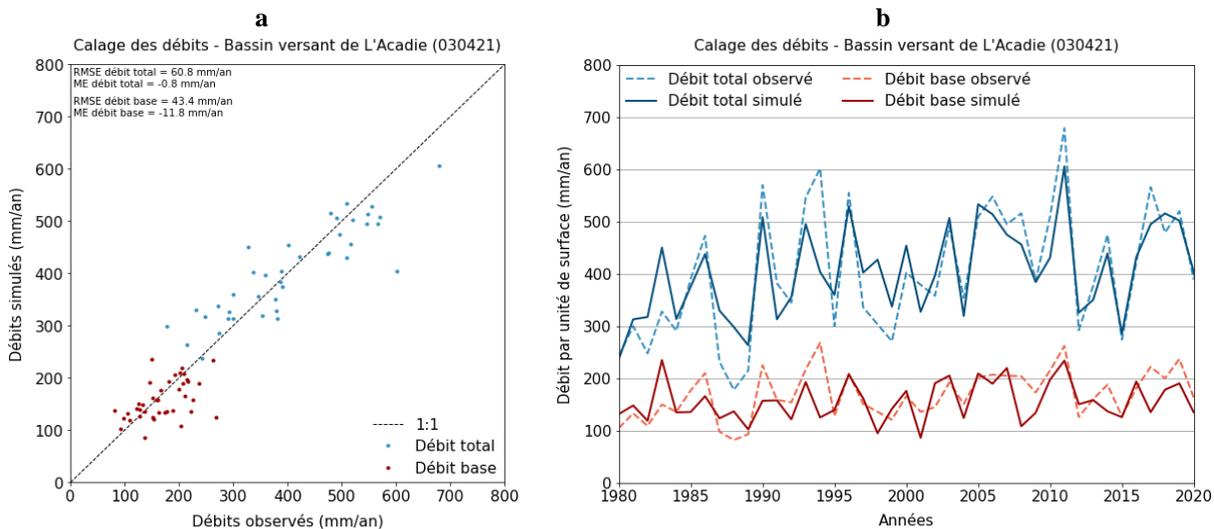


Figure 5.16. Résultats du calage des débits de base et totaux annuels sur le bassin versant jaugé de L'Acadie (030421) : (a) comparatif entre les débits simulés et les débits observés et (b) variabilité des débits annuels simulés et observés sur le bassin entre 1980 et 2020.

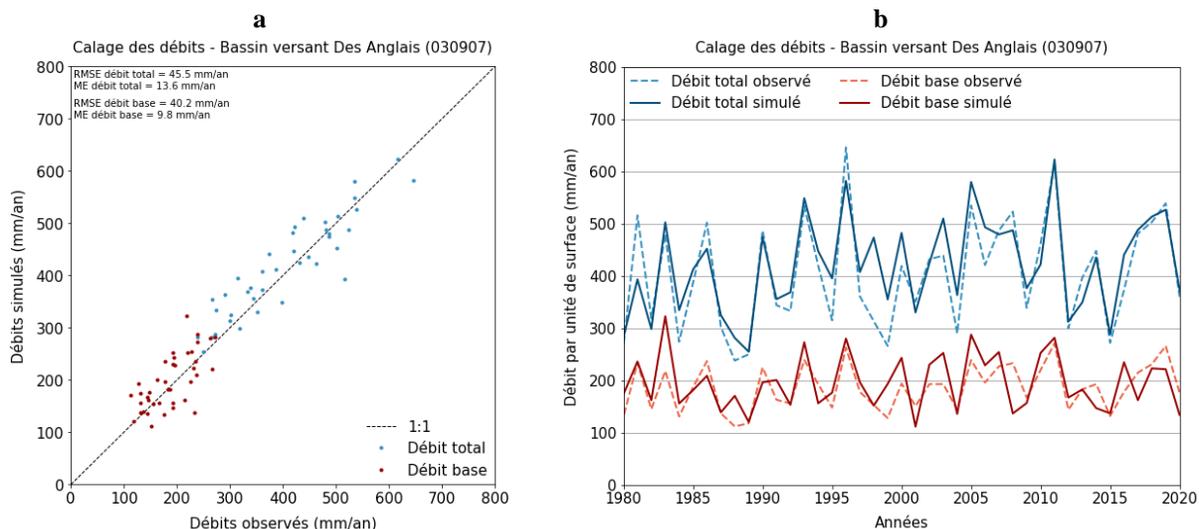


Figure 5.17. Résultats du calage des débits de base et totaux annuels sur le bassin versant jaugé Des Anglais (030907) : (a) comparatif entre les débits simulés et les débits observés et (b) variabilité des débits annuels simulés et observés sur le bassin entre 1980 et 2020.

5.6 Recharge historique

Après calage des paramètres du modèle d'infiltration, la recharge historique de l'aquifère rocheux a pu être estimée avec PyHELP sur l'ensemble de la grille de 27 331 mailles, soit sur un territoire de 1 707 km². Toutefois, pour les fins de la présente étude, les sections 5.5, 5.6 et 5.7 traitant de la recharge ainsi que la section 6 décrivant les pressions sur l'eau souterraine réfèrent uniquement à la zone délimitant le modèle d'écoulement régional de Mercier constitué de 15 274 mailles, soit une surface de l'ordre de 950 km². Les résultats sont toutefois disponibles à la fois pour l'ensemble du secteur d'évaluation de la recharge et aussi pour le secteur restreint du modèle d'écoulement local de Mercier (3 614 mailles soit une superficie d'environ 225 km²).

Avec les données climatiques disponibles issues de la grille Info-Climat du MELCC et des données de radiation solaire extraites du site du CDS du programme Copernicus, la recharge historique a pu être simulée sur une période de 42 ans entre le 1^{er} janvier 1980 et le 31 décembre 2021. Cette nouvelle carte de recharge distribuée historique (carte 17) produite avec PyHELP offre une image actualisée et homogénéisée de la recharge au roc sur la zone du modèle d'écoulement régional par rapport à la carte de recharge préliminaire produite dans un premier temps (Ballard et al., 2021). La recharge préliminaire est toutefois utilisée pour modéliser les divers scénarii de pression sur la ressource en eau souterraine (voir section 6) car elle brosse un portrait plus pessimiste de la recharge moyenne dans sa version lissée (73 mm/an contre 90 mm/an pour la version actuelle révisée). La version révisée de la recharge moyenne historique calculée entre 1980 et 2021 est aussi utilisée par la suite pour estimer les pressions actuelles sur l'eau souterraine (voir section 6.1). Elle constitue également un intrant au modèle d'écoulement régional dont les résultats seront développés dans le rapport final. À partir de cette recharge historique ont pu être extraites les statistiques des composantes du bilan hydrologique pour la période des normales climatiques (1981-2010) afin de pouvoir vérifier l'évolution des diverses composantes dans le temps (voir section 5.8).

À noter que la carte 17 jointe au présent rapport correspond à une simplification par lissage de la donnée de recharge brute estimée sur grille avec PyHELP. Cela représente plus fidèlement le processus de recharge et n'impacte pas le bilan final : recharge moyenne de 90 mm/an pour les deux versions (89.8 mm/an pour la version brute et 89.9 mm/an pour la version lissée) sur l'ensemble de la zone d'étude. Sur cette carte actualisée de la recharge, certains secteurs affichent une recharge nulle (aplats blancs) puisqu'ils sont associés à des mailles où la recharge n'a pas été calculée (voir section 5.3) : zones urbaines, lacs et cours d'eau ou encore secteurs non cartographiés. Les zones de recharge nulle sont ainsi surtout concentrées au nord du secteur d'étude dans la zone urbanisée correspondant aux municipalités de Saint-Constant, Candiac et La Prairie ainsi qu'au nord-ouest autour de la ville de Châteauguay puis plus localement associées aux municipalités de Mercier, Saint-Rémi, Napierville et Sainte-Martine.

Sur la carte de la recharge distribuée historique (carte 5.17), les secteurs présentant une faible recharge (< 50 mm/an) correspondent aux dépôts fins argileux identifiés sur la carte quaternaire (carte 5) mais aussi aux sédiments organiques. Le reste du secteur du modèle d'écoulement régional, très largement associé à des dépôts glaciaires (tills) en surface, présente une recharge plus importante (> 100 mm/an). Cette zone forme un arc de cercle allant de Mercier à l'ouest vers Saint-Clothilde au sud en passant par Saint-Rémi. C'est d'ailleurs essentiellement au sud de Saint-Rémi que la recharge est la plus importante (> 200 mm/an) atteignant même un maximum de 292 mm/an. À noter que la recharge au roc est également assez importante (> 100 mm/an) au droit de la communauté autochtone de Kahanawake.

En plus de la recharge au roc, PyHELP produit les statistiques annuelles (figure 5.18) et mensuelles (figure 5.19) des autres composantes du bilan hydrologique : précipitations totales, évapotranspiration, ruissellement de surface et ruissellement hypodermique. Les statistiques sur la températures moyenne de l'air ont aussi pu être compilées mensuellement grâce au développement d'un nouveau script Python. PyHELP affiche également en sortie un graphique de la variabilité interannuelle des composantes du bilan hydrologique présenté à l'annexe 5.

La figure 5.18 correspond au bilan établi dans PyHELP avec les mailles considérées dans le modèle (12 923 mailles sur les 15 274 du modèle d'écoulement régional soit un ratio de 84.6%). En effet, les mailles suivantes ne sont pas incluses dans le calcul des composantes moyennes du bilan hydrologique : les 226 mailles en contexte « eau », les 2 073 en zones urbaines et les 52 non cartographiées. C'est pour cela que la valeur de moyenne de recharge (101 mm/an) diffère de celle calculée sur l'ensemble des mailles du modèle d'écoulement régional (90 mm/an). Entre 1980 et 2021, la recharge représentait 10.3% des précipitations totales (979 mm/an) soit 101 mm/an en moyenne (figure 5.18). Une large part des précipitations totales (57.6% soit 565 mm/an) sont captées par évapotranspiration tandis que le ruissellement représente 26.1% des précipitations soit 256 mm/an en moyenne. Le ruissellement hypodermique – ici sans distinction des ruissellements superficiel ou profond – est égal à 46 mm/an ce qui équivaut à 4.7% des intrants.

Au cours de l'année, plusieurs périodes distinctes sont mises en évidence en regardant les variations mensuelles des composantes du bilan hydrologique (figure 5.19). En hiver, lorsque les températures mensuelles moyennes sont les plus faibles (≤ -2 °C), les précipitations sont peu importantes (entre 59 et 80 mm/mois) et majoritairement sous forme solide (neige). Du fait de la période de gel et du couvert neigeux, le volume d'eau pouvant s'infiltrer est quasi-nul et la plupart de l'eau de fonte disponible durant les brèves périodes de redoux hivernaux en janvier et février est évacuée par ruissellement. À la fin de l'hiver (mars et avril), lorsque les températures moyennes s'approchent puis dépassent les 0 °C, la part de ruissellement augmente fortement jusqu'à atteindre un maximum en mars (87 mm/mois). Cette hausse des températures au-dessus du point de gel au sol ainsi que l'augmentation de la pluviométrie permettent l'infiltration de l'eau qui peut alors atteindre l'aquifère rocheux. La période de fonte printanière marque d'ailleurs l'une des deux périodes de recharge annuelle du roc (13 à 15 mm/mois entre avril et mai). Ensuite, la hausse des précipitations associée au début de la période de croissance de la végétation fait en sorte que l'évapotranspiration augmente dès avril pour atteindre un maximum entre les mois de mai et août (80 à 91 mm/mois). Par conséquent, la recharge devient d'ailleurs non significative (≤ 7 mm/mois) puisque les précipitations sont presque intégralement évapotranspirées durant la période estivale. À la fin de l'été, l'évapotranspiration commence à diminuer. À l'inverse, l'automne marque un pic de précipitations (100 mm/mois en octobre) qui induit une hausse de la recharge dès octobre qui se poursuit en novembre et décembre qui correspondent à la deuxième période de recharge annuelle (14 et 18 mm/mois entre novembre et décembre). Celle-ci est dû à la fois à la hausse de la pluviométrie mais aussi à la baisse de l'évapotranspiration en raison de la chute des feuilles et de la fin de période de croissance des plantes. À noter que tout au long de l'année, le ruissellement hypodermique suit sensiblement les mêmes variations que la recharge au roc avec des valeurs moindres (environ deux fois moins de ruissellement hypodermique – 46 mm/an – que de recharge au roc sur l'année – 101 mm/an).

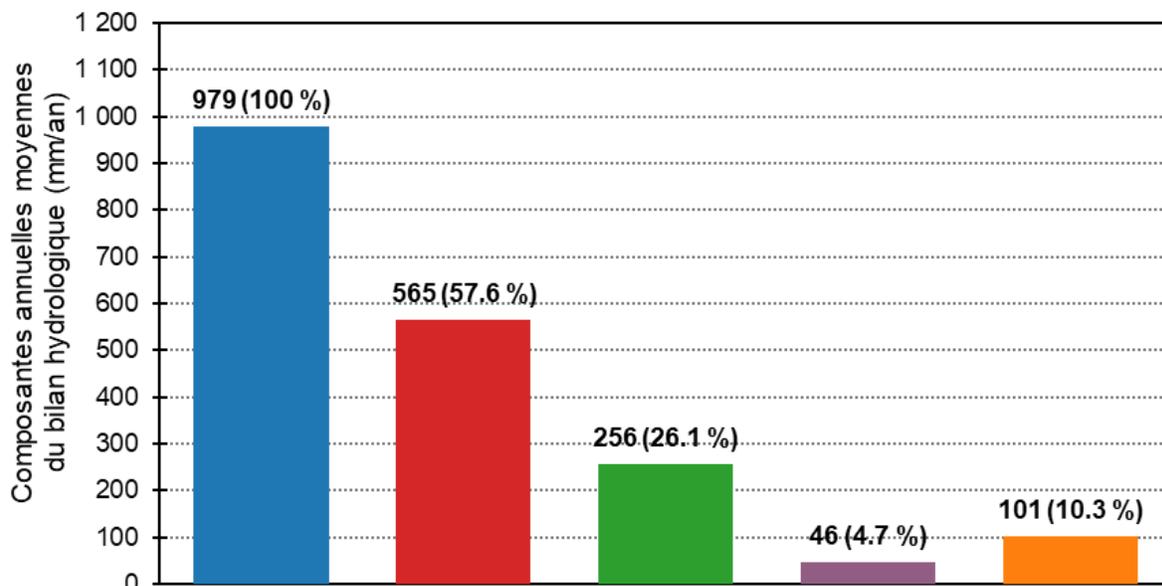


Figure 5.18. Composantes annuelles moyennes du bilan hydrologique pour la période historique (1980-2021) sur la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier.

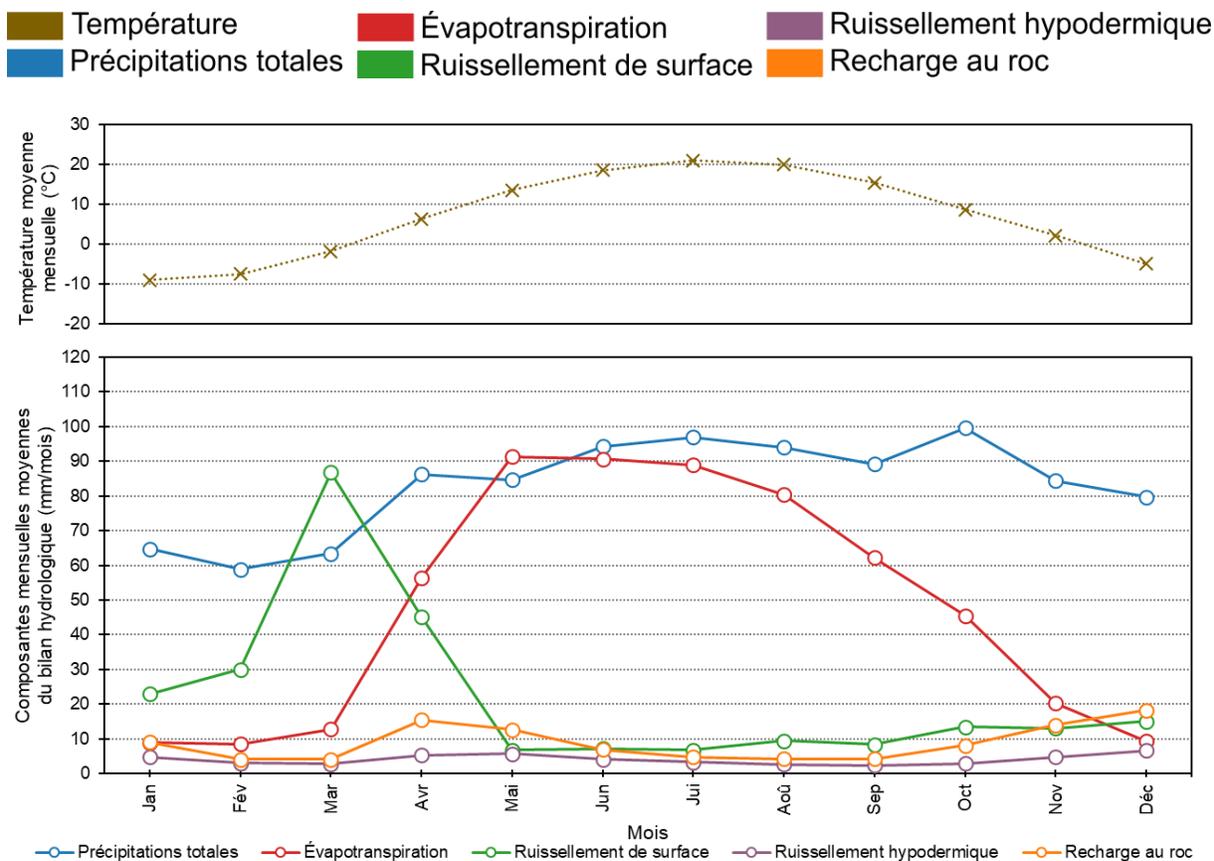


Figure 5.19. Composantes mensuelles moyennes du bilan hydrologique et température moyenne mensuelle pour la période historique (1980-2021) sur la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier.

5.7 Recharge future

Comme indiqué dans la section 5.4, la recharge en climat futur a été simulée avec PyHELP pour les 12 modèles climatiques sélectionnés entre le 1^{er} janvier 2006 et le 31 décembre 2095 soit sur 90 années. Ensuite, les 12 grilles résultantes ont été compilées pour obtenir une grille de recharge finale pour la période future représentant la médiane des 12 simulations. Des grilles de recharge ont été produites pour le futur proche (2041-2070 soit sur une période de 30 ans) et le futur lointain (2071-2095 représentant 25 années). Celles-ci sont accompagnées de statistiques annuelles et mensuelles des composantes du bilan hydrologique pour chaque période considérée. Similairement à la recharge historique, les grilles et statistiques sont disponibles à la fois pour l'ensemble du secteur d'évaluation de la recharge et les zones des modèles d'écoulement régional et local de Mercier ; toutefois, seul le secteur du modèle d'écoulement régional est décrit ici. Les statistiques détaillées sont disponibles dans l'annexe 6 tandis que la section 5.8 aborde l'évolution des composantes du bilan hydrologique entre la période historique et le futur. Seule la période future proche (2041-2070) est décrite dans la présente section puisqu'elle correspond à la période de modélisation des usages du projet RADEAU 1 (Ageco, 2019) pour l'horizon proche (2050) utilisée pour évaluer la pression future sur la ressource en eau souterraine (voir section 6).

La carte de la recharge distribuée en climat futur présentée en annexe (carte 18) représente donc la médiane de la recharge des 12 simulations climatiques retenues pour l'horizon proche (2041-2070). Tout comme la carte de recharge historique (carte 17), elle est présentée au format lissé plutôt que brut. La distribution des zones de recharge importante, des secteurs de faible recharge ainsi que des zones de recharge nulle est similaire à la carte historique. La différence majeure avec la carte historique (1980-2021) est surtout reliée au volume futur de recharge. En effet, alors que la recharge moyenne historique était de l'ordre de 90 mm/an sur la zone d'étude, elle avoisine les 115 mm/an pour l'horizon proche. Ainsi, le secteur de recharge élevée (> 200 mm/an) passant par Saint-Rémi est élargi et couvre donc un territoire plus important où la recharge atteint un maximum de 363 mm/an. La recharge au roc affiche également des valeurs en augmentation (> 150 mm/an) par rapport à la carte historique à Kahanawake au nord-ouest.

Dans le futur proche (voir figure 5.20), les modèles climatiques suggèrent une hausse globale des précipitations totales de l'ordre de 11% (1 088 mm/an contre 979 mm/an dans le passé). De fait, cette hausse future des précipitations entre 2041 et 2070 induit alors une augmentation de chaque composante du bilan hydrologique par rapport à la période historique (1980-2021). Le ratio d'évapotranspiration par rapport aux précipitations totales est similaire au bilan historique (57.8% dans le futur contre 57.6% dans le passé). La part de ruissellement de surface devrait baisser (22.7% contre 26.1%). À l'inverse, la part de ruissellement hypodermique (5.6%) et de recharge au roc (11.6%) devraient être en légère hausse dans un futur proche. La valeur absolue de recharge au roc passant à 127 mm/an, soit une hausse assez conséquente de l'ordre de 25% par rapport à la valeur estimée sur la période historique (101 mm/an).

En analysant les données sur une base mensuelle (figure 5.21), des changements de distribution des composantes sur l'année sont visibles par rapport à la période historique. Tout d'abord, la hausse générale des températures moyennes devrait induire des périodes de redoux plus marquées durant l'hiver impliquant un couvert neigeux au sol moins épais et la présence potentielle d'épisode de pluie. Ceci aurait pour conséquence de diminuer le ruissellement de surface durant l'hiver (maximum de 63 mm/mois en mars) et de réduire le volume d'eau disponible à la fin de l'hiver lors de la période fonte printanière.

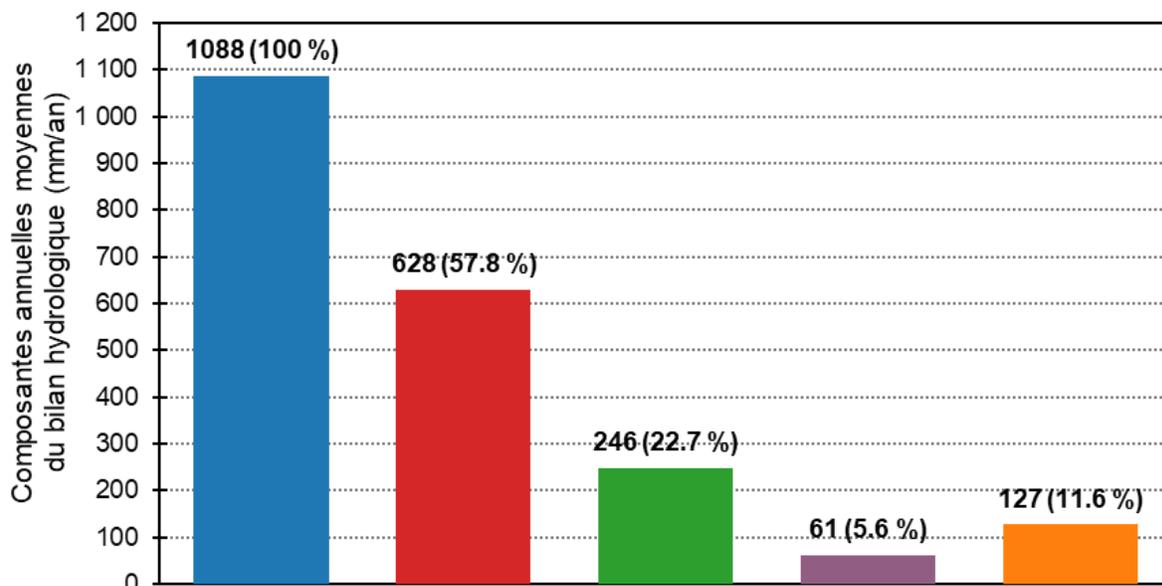


Figure 5.20. Composantes annuelles moyennes du bilan hydrologique pour le futur proche (2041-2070) sur la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier.

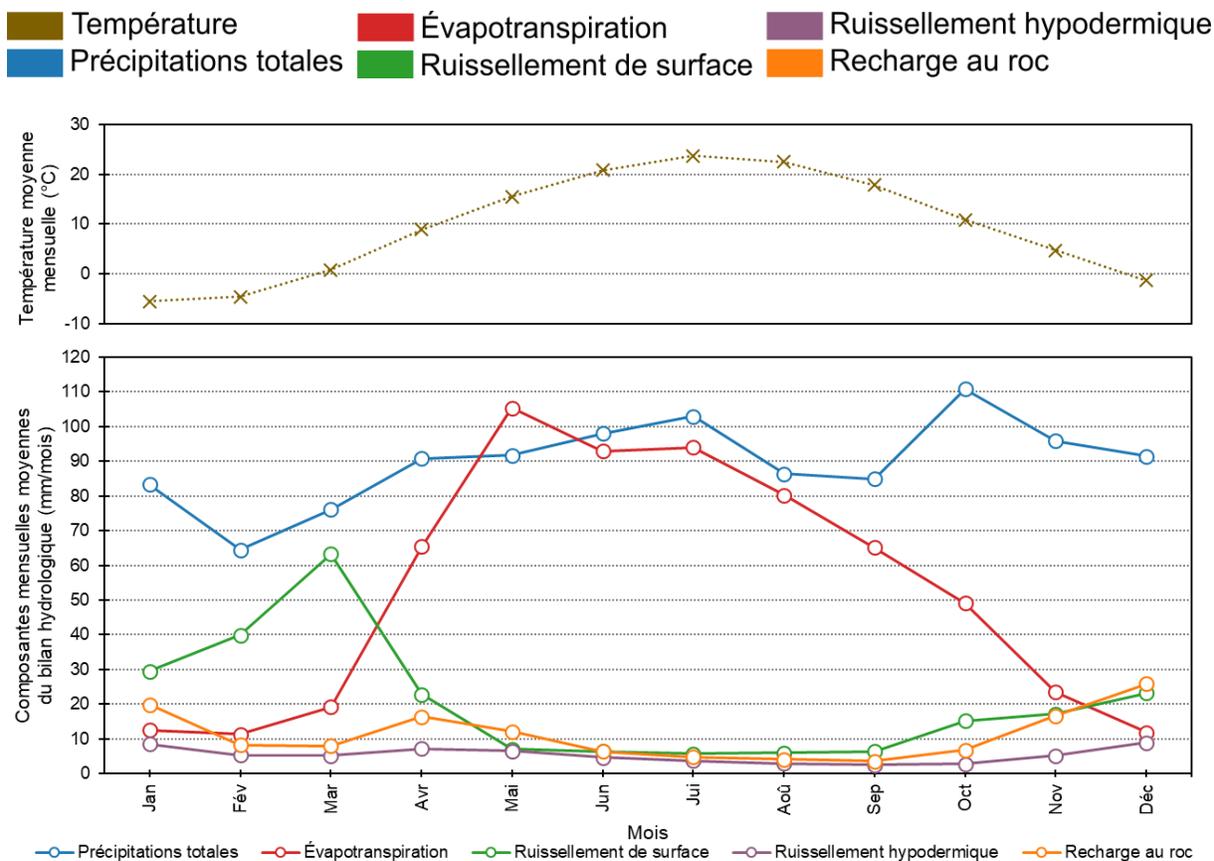


Figure 5.21. Composantes mensuelles moyennes du bilan hydrologique et température moyenne mensuelle pour le futur proche (2041-2070) sur la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier.

Ainsi, il est probable d'avoir un peu plus de recharge durant l'hiver dans le futur tout en conservant une phase de recharge assez importante lors de la fonte du couvert neigeux (16 mm/mois en avril et 12 mm/mois en mai). En se basant toujours sur les simulations climatiques sélectionnées, la période de recharge principale concernerait surtout les mois de novembre, décembre et janvier avec des moyennes respectives sur la zone d'étude de 17, 26 et 20 mm/mois. De la même façon, le ruissellement de sous-surface devrait aussi augmenter dans le futur proche sur les mêmes périodes de hausses que la recharge au roc.

La section 5.8 traite d'ailleurs spécifiquement des tendances envisagées pour les diverses composantes du bilan hydrologique et de la température entre le passé et le futur sur la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier.

5.8 Évolution de la recharge et des autres composantes du bilan hydrologique

Le suivi de l'évolution des composantes du bilan hydrologique et de la température moyenne dans le futur a été établi en produisant les valeurs moyennes de chaque composante entre 1981 et 2095 estimées sur la zone du modèle d'écoulement régional (voir figures 5.22 à 5.27). Deux types de données sont indiquées sur ces graphiques : (1) les valeurs historiques correspondant à la moyenne annuelle de chaque composante estimée entre 1981 et 2021 (41 ans) avec les données climatiques de la grille Info-Climat et (2) les estimations en climat futur des composantes du bilan entre 2006 et 2095 (90 ans) retranscrites par un diagramme *box-plot* correspondant aux statistiques basées sur les 12 modèles climatiques. La période 2006 à 2021 (16 ans) est donc à la fois couverte par les données climatiques historiques et les simulations des modèles climatiques futurs.

Globalement les composantes simulées en climat futur suivent les tendances déjà observées durant la période historique (tableau 5.15) à l'exception de l'évapotranspiration qui a légèrement diminué entre 1981 et 2021 (-2%) alors qu'elle aurait tendance à augmenter entre 2022 et 2095 (+8%) et du ruissellement de surface en hausse historiquement (+19%) et en baisse en climat futur (-12%). Ces différences s'expliquent par l'évolution prévue du climat dans le futur et notamment des hausses des températures (+38%) dont la hausse est déjà observée entre 1981 et 2021 (+21%). En effet, comme cela été évoqué précédemment (section 5.7), des températures plus élevées auront tendance à favoriser l'évapotranspiration surtout pendant la période de croissance des plantes. À l'inverse, les périodes de redoux hivernaux auront tendance à favoriser l'infiltration de l'eau au détriment du ruissellement de surface. D'ailleurs, la recharge de l'aquifère rocheux, assez stable sur la période historique, afficherait une hausse assez marquée sur les 74 futures années simulées (+27%). De la même façon, le ruissellement hypodermique augmenterait de façon relativement importante sur la période future (+34%). Finalement, les précipitations totales mesurées, déjà en hausse entre 1981 et 2021 (+2%) le seront encore plus en climat futur (+6%).

L'affichage simultané des données historiques et futures entre 2006 et 2021 permet de comparer les composantes estimées avec les données observées (1981-2021) avec celles simulées en climat futur (2006-2095). Bien que la variabilité interannuelle des composantes soit importante (figures 5.22 à 5.27), la plupart des valeurs historiques simulées sur les 16 années en commun se retrouvent entre les valeurs minimales et maximales des 12 simulations climatiques (voir tableau 5.16). En effet, au moins 75% des valeurs annuelles des composantes estimées sur la période historique tombent entre les valeurs minimales et maximales des 12 modèles climatiques. Les composantes estimées avec les données climatiques historiques sont situées entre le 25^e et le 75^e percentile des valeurs annuelles issues des 12 modèles climatiques sur 5 à 9 années (31 à 56% du temps).

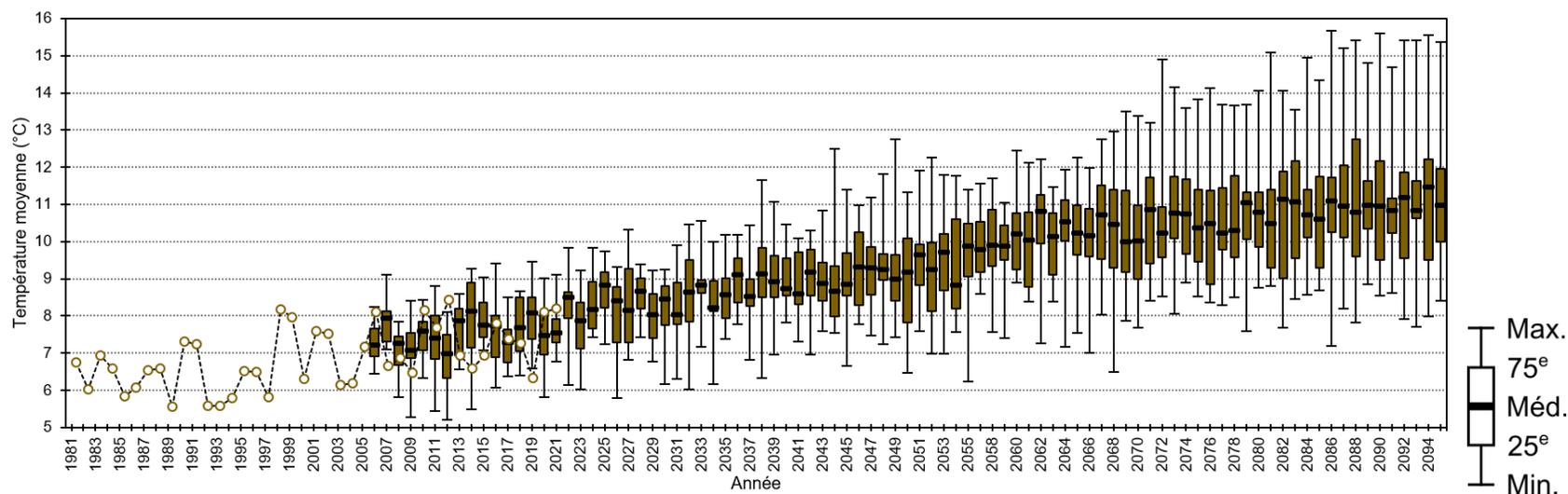


Figure 5.22. Évolution des moyennes annuelles de la température entre 1981 et 2095 sur la zone du modèle d'écoulement.

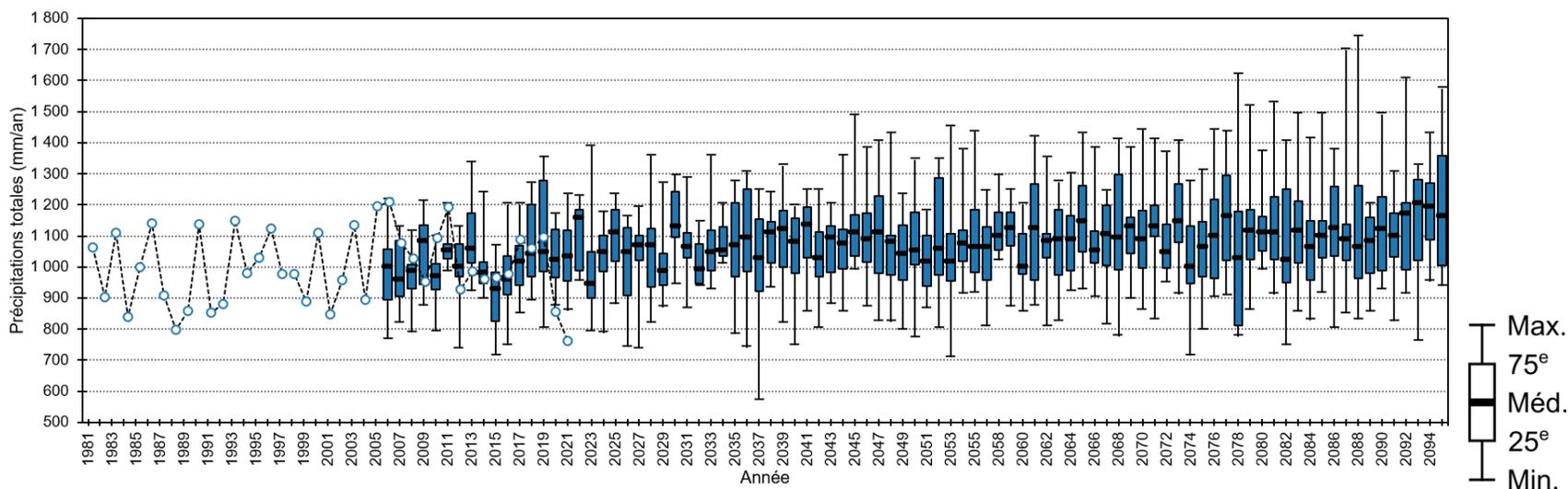


Figure 5.23. Évolution des moyennes annuelles des précipitations totales entre 1981 et 2095 sur la zone du modèle d'écoulement.

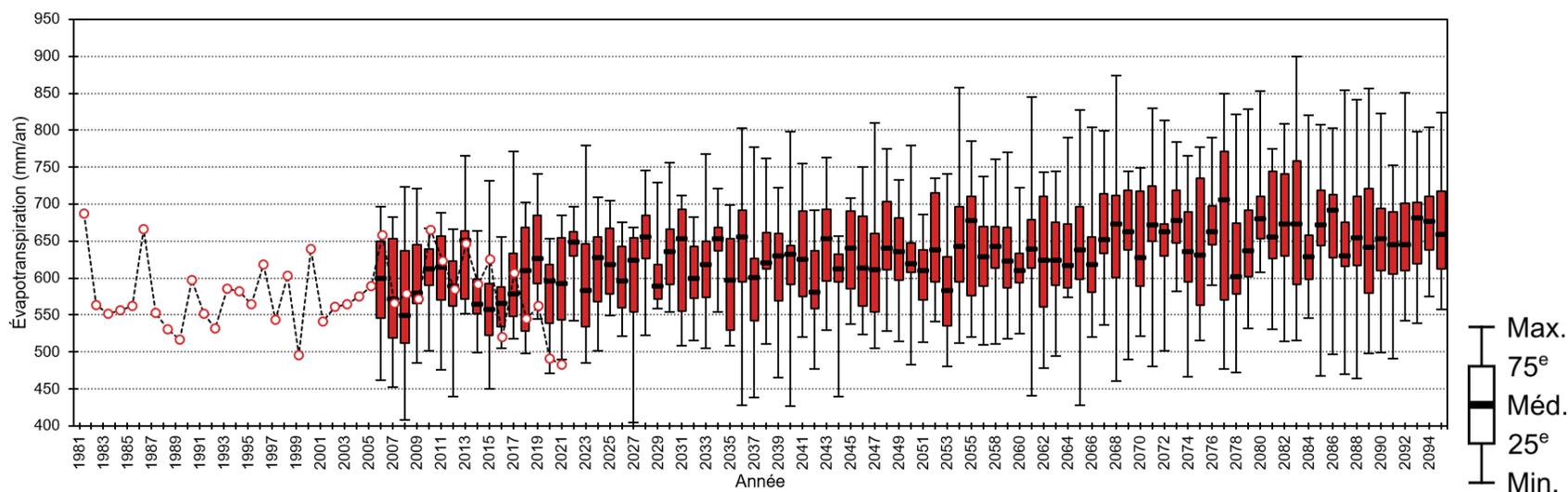


Figure 5.24. Évolution des moyennes annuelles de l'évapotranspiration entre 1981 et 2095 sur la zone du modèle d'écoulement.

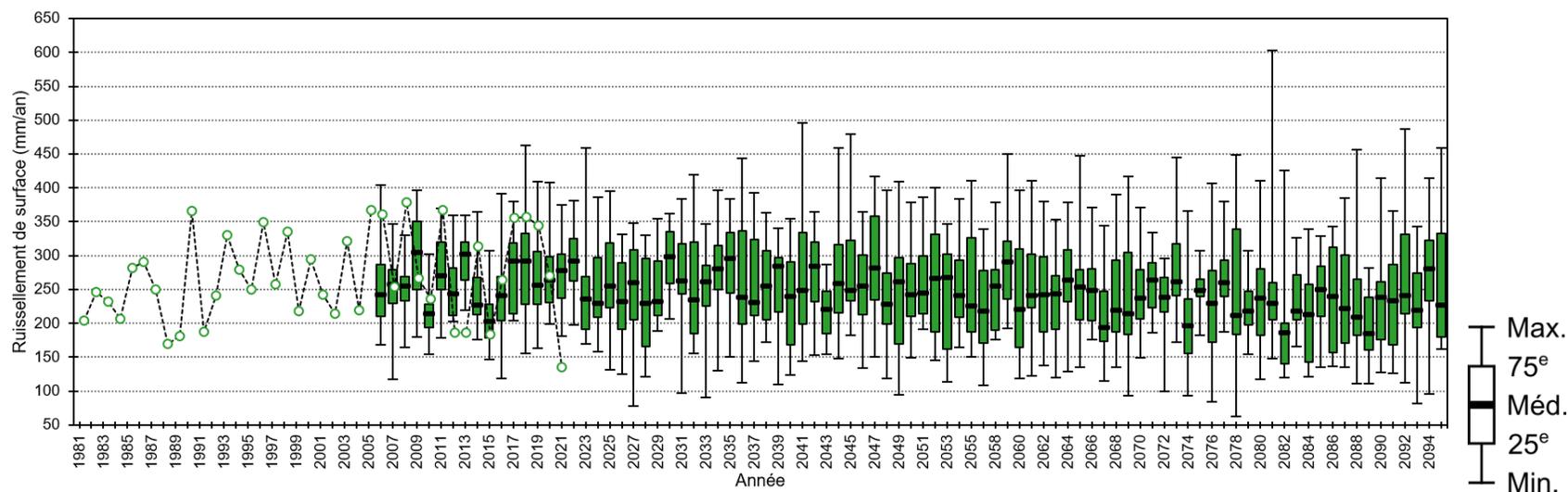


Figure 5.25. Évolution des moyennes annuelles du ruissellement de surface entre 1981 et 2095 sur la zone du modèle d'écoulement.

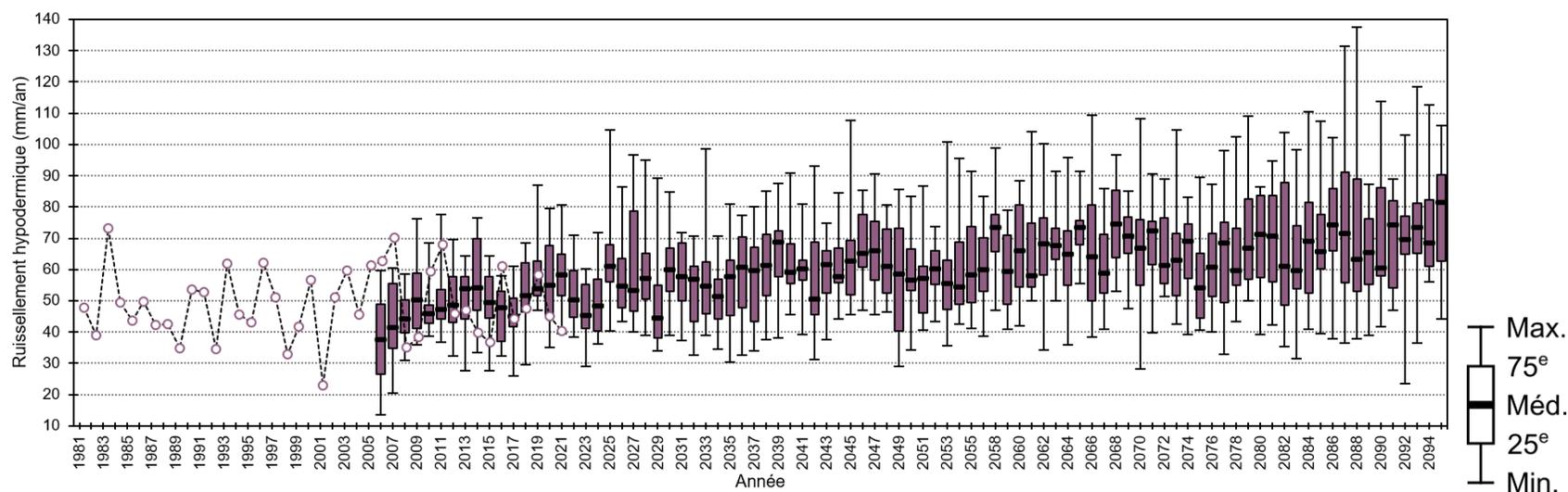


Figure 5.26. Évolution des moyennes annuelles du ruissellement hypodermique entre 1981 et 2095 sur la zone du modèle d'écoulement.

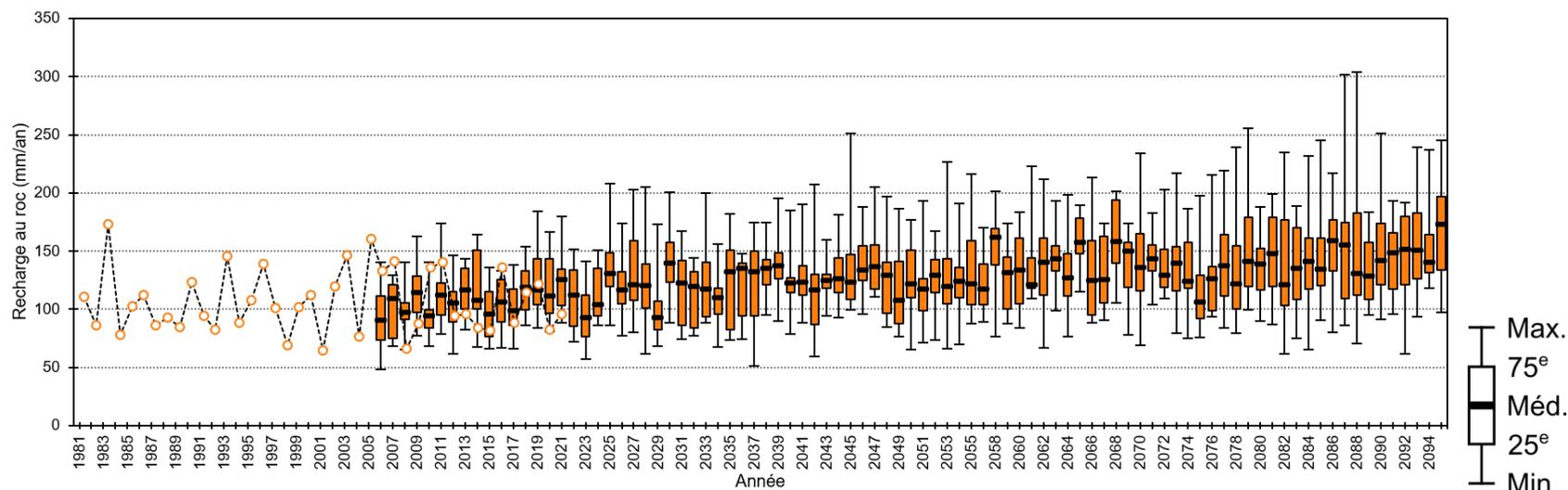


Figure 5.27. Évolution des moyennes annuelles de la recharge au roc entre 1981 et 2095 sur la zone du modèle d'écoulement.

Tableau 5.15. Évolution des composantes annuelles moyennes du bilan hydrologique selon les estimations en période historique (1981-2021) et en climat futur (2022-2095) sur la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier.

Composante du bilan hydrologique	Données historiques (1981-2021 / 41 ans)			Données futures (2022-2095 / 74 ans)		
	Valeur en 1981	Évolution sur 41 ans	Tendance sur 41 ans	Valeur en 2022	Évolution sur 74 ans	Tendance sur 74 ans
Température	6.7 °C	+1.4 °C (+21%)	+0.034 °C/an	8.5 °C	+3.2 °C (+38%)	+0.043 °C/an
Précipitations totales	1062 mm	+25 mm (+2%)	+0.608 mm/an	1155 mm	+66 mm (+6%)	+0.898 mm/an
Évapotranspiration	687 mm	-11 mm (-2%)	-0.269 mm/an	649 mm	+49 mm (+8%)	+0.664 mm/an
Ruissellement de surface	204 mm	+40 mm (+19%)	+0.967 mm/an	292 mm	-36 mm (-12%)	-0.486 mm/an
Ruissellement hypodermique	48 mm	+1 mm (+3%)	+0.030 mm/an	50 mm	+17 mm (+34%)	+0.232 mm/an
Recharge au roc	111 mm	0 mm (0%)	+0.009 mm/an	112 mm	+30 mm (+27%)	+0.41 mm/an

Note : Les valeurs en rouge correspondent à une évolution de plus de 10%, celles en orange entre 5 et 10% puis la cellule en jaune à une valeur nulle. Les valeurs en italique correspondent à une baisse tandis que celles soulignées sont associées à une hausse.

Tableau 5.16. Comparatif entre les valeurs moyennes simulées sur la période historique et celles issues des modèles climatiques sur la période commune de simulations (2006-2021 / 16 ans) sur la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier.

Composante du bilan hydrologique	Intervalle de valeurs simulées en climat futur	
	Minimum - Maximum	25 ^e percentile – 75 ^e percentile
Température	12 / 16 (75%)	6 / 16 (38%)
Précipitations totales	14 / 16 (88%)	7 / 16 (44%)
Évapotranspiration	15 / 16 (94%)	9 / 16 (56%)
Ruissellement de surface	12 / 16 (75%)	5 / 16 (31%)
Ruissellement hypodermique	13 / 16 (81%)	5 / 16 (31%)
Recharge au roc	14 / 16 (88%)	5 / 16 (31%)

Afin de comparer de manière plus efficiente l'évolution dans le temps des composantes du bilan hydrologique et de la température, les valeurs estimées ont été regroupées par période de durées similaires : (1) les normales climatiques (1981-2010 / 30 ans), (2) la période actuelle (2011-2040 / 30 ans), (3) le futur proche (2041-2070 / 30 ans) et le futur lointain (2071-2095 / 25 ans). La période correspondant aux normales climatiques couvre 30 ans de données et constitue la période de référence généralement utilisée pour décrire l'état initial des variables climatiques. Pour cette période référence, les valeurs de chaque composante indiquée dans le tableau 5.17 correspondent aux moyennes obtenues sur la période 1981-2010. Pour la période dite « actuelle », les valeurs indiquées comprennent à la fois les moyennes estimées sur la période 2011-2021 (11 ans) puis les médianes des 12 modèles climatiques pour la période 2022-2040 (19 ans). Pour le futur proche et le futur lointain, les statistiques ont été faites à partir des médianes des 12 modèles climatiques futures pour les périodes respectives suivantes : 2041-2070 et 2071-2095. L'horizon proche est d'ailleurs utilisé pour les scénarii des pressions sur l'eau en climat futur (section 6).

La période historique complète (1980-2021 / 42 ans) est aussi indiquée dans le tableau 5.17 puisque cette période est également considérée dans les scénarii de pression sur la ressource en eau souterraine (section 6). Historiquement donc, l'évapotranspiration représentait 57.6% des intrants tandis que le ruissellement de surface dépassait le quart des précipitations totales (26.1%) qui étaient en moyenne de 979 mm/an. Finalement, la recharge au roc était de 101 mm/an équivalent ainsi à 10.3% des précipitations totales alors que le ruissellement hypodermique était seulement de 4.7%.

En considérant ainsi les normales climatiques comme période de référence, les températures moyennes affichent une hausse continue passant de 6.6 à 10.8 °C à la fin du siècle (figure 5.28) soit une hausse assez conséquente de +65.2% (tableau 5.18). Entre la période actuelle (2011-2040) et le futur proche (2041-2070), la hausse serait déjà de +1.5 °C soit de +18.7%. Cette augmentation des températures moyennes observée surtout depuis les années 2000 (voir figure 5.22) est en effet constatée entre la période actuelle et la période référence (+1.7 °C soit +25.3%) et donc considérée dans les modèles climatiques futurs. La variabilité interannuelle des températures moyennes est assez similaire en conditions historiques et actuelles (figure 5.22). Cette variabilité augmente légèrement dans le futur proche mais surtout dans le futur lointain.

Les 12 modèles climatiques intègrent également une hausse de la quantité de précipitations totales (voir figure 5.23 et tableau 5.18). En effet, entre les normales climatiques (989 mm/an) et le futur lointain (1108 mm/an), les précipitations annuelles moyennes augmenteraient donc de +12.1% (soit +119 mm). Les précipitations totales augmentent de façon plus marquée entre la période actuelle et la période historique (+6.8%) et dans une moindre mesure dans le futur : +3.0% à l'horizon proche puis +1.9% à l'horizon lointain (tableau 5.18). Les valeurs annuelles des précipitations totales affichent une variabilité assez semblable dans le temps à l'exception de l'horizon lointain qui présente une variabilité plus importante (figure 5.23).

Tableau 5.17. Composantes annuelles moyennes du bilan hydrologique exprimées en mm/an (et ratio par rapport aux précipitations totales) selon la période considérée sur la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier.

Période	Précipitations totales	Évapotranspiration	Ruissellement de surface	Ruissellement hypodermique	Recharge au roc
<i>Période historique (1980-2021)</i>	979 (100%)	565 (57.6%)	256 (26.1%)	46 (4.7%)	101 (10.3%)
Normales climatiques (1981-2010)	989 (100%)	565 (57.1%)	252 (25.5%)	49 (4.9%)	102 (10.3%)
Période actuelle (2011-2040)	1056 (100%)	618 (58.5%)	258 (24.4%)	55 (5.2%)	119 (11.2%)
Futur proche (2041-2070)	1088 (100%)	628 (57.8%)	246 (22.7%)	61 (5.6%)	127 (11.6%)
Futur lointain (2071-2095)	1108 (100%)	659 (59.5%)	230 (20.7%)	69 (6.2%)	140 (12.6%)

En italiques : période considérée par la suite pour estimer la pression sur l'eau souterraine (voir section 6).

L'évapotranspiration annuelle moyenne est également en hausse de +16.7% entre le futur lointain et la période de référence (figure 5.28 et tableau 5.18). Comme les précipitations totales augmentent également, la part d'évapotranspiration est toutefois similaire dans le temps (entre 57.1 et 59.5% - voir tableau 5.17) même si la hausse est tout de même est de +94 mm. La variabilité interannuelle pour cette composante est également beaucoup élevée en climat futur par rapport à la période historique (figure 5.24).

Le ruissellement de surface est l'unique composante affichant tout d'abord une hausse, quoique mineure (+2.3% entre la période actuelle et les normales climatiques), puis une décroissance en climat futur (figure 5.28). Globalement, la baisse est estimée à -22 mm (tableau 5.18), ce qui fait diminuer la part de ruissellement dans le bilan hydrologique de 25.5% entre 1981 et 2010 à 20.7% entre 2071 et 2095 (tableau 5.17). Le ruissellement de surface présente une variabilité interannuelle moins importante en climat futur par rapport aux valeurs historiques (figure 5.25).

Quant à la recharge au roc, elle s'accroît dans le futur, passant de 102 mm/an en moyenne pour la période de référence à 119 mm/an actuellement puis à 127 mm/an à l'horizon proche et enfin 140 mm/an à la fin du siècle (voir figure 5.28). Cette hausse est plus marquée actuellement que dans le futur pour une augmentation globale de +37.0% soit +38 mm (tableau 5.18). La part de recharge est en légère hausse entre les normales climatiques (10.3%) et le futur lointain (12.6% - voir tableau 5.17). D'un point de vue interannuel, la recharge varie de façon assez similaire en climat futur, hormis pour le futur éloigné où cette variabilité semble plus importante (figure 5.27).

Tableau 5.18. Évolution des composantes annuelles moyennes du bilan hydrologique et de la température selon la période considérée sur la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier.

Évolution	Précipitations totales	Évapotranspiration	Ruissellement de surface	Ruissellement hypodermique	Recharge au roc	Température moyenne
2011-2040 / 1981-2010 ¹	+67 mm (+6.8%)	+54 mm (+9.5%)	+6 mm (+2.3%)	+6 mm (+12.6%)	+16 mm (+16.1%)	+1.7°C (+25.3%)
2041-2070 / 2011-2040 ²	+32 mm (+3.0%)	+10 mm (+1.6%)	-12 mm (-4.5%)	+6 mm (+11.7%)	+8 mm (+6.8%)	+1.5°C (+18.7%)
2071-2095 / 2041-2070 ³	+21 mm (+1.9%)	+31 mm (+4.9%)	-17 mm (-6.7%)	+7 mm (+12.0%)	+13 mm (+10.5%)	+1.1°C (+11.1%)
2071-2095 / 1981-2010 ⁴	<u>+119 mm</u> (+12.1%)	<u>+94 mm</u> (+16.7%)	<u>-22 mm</u> (-8.8%)	<u>+20 mm</u> (+41.0%)	<u>+38 mm</u> (+37.0%)	<u>+4.3°C</u> (+65.2%)

1 : tendance entre la période actuelle (2011-2040) et les normales climatiques (1981-2010) ;

2 : tendance entre le futur proche (2041-2070) et la période actuelle (2011-2040) ;

3 : tendance entre le futur lointain (2071-2095) et le futur proche (2041-2070) ;

4 : tendance globale entre le futur lointain (2071-2095) et les normales climatiques (1981-2010).

Le ruissellement hypodermique (figure 5.28) suit globalement les tendances pour la recharge au roc de même que son comportement interannuel (voir figure 5.26). Ce constat est d'ailleurs observable lorsque les composantes du bilan hydrologique sont comparées sur une base mensuelle (voir figure 5.29) entre la période historique de 42 ans (1980-2021) et le futur proche (2041-2070) ; soit les deux périodes retenues dans la section 6. Comme indiqué précédemment, l'infiltration devrait être plus importante à l'hiver, ce qui entraînerait une hausse de la recharge entre novembre et mars alors qu'elle affiche une allure similaire le reste de l'année en climat futur (figure 5.29). Le ruissellement hypodermique est lui aussi à la hausse, surtout à l'hiver et au printemps (entre décembre et mai). Dans le futur proche, l'évapotranspiration est similaire, quoique légèrement plus élevée chaque mois par rapport aux estimations historiques, hormis en juin où la hausse est significative (figure 5.29). Le ruissellement de surface affiche des variations mensuelles similaires entre les deux périodes considérées avec toutefois une hausse entre novembre et février puis une baisse importante en mars et avril (figure 5.29). La hausse des températures dans le futur est observée pour tous les mois de l'année et de façon un peu plus importante à l'hiver (décembre à février) et à l'été (juillet et août). Quant aux précipitations totales, l'allure des variations mensuelles sur l'année est similaire entre la période historique et le futur avec toutefois une hausse générale des intrants (pluie ou neige) à l'exception des mois d'août et de septembre (figure 5.29).

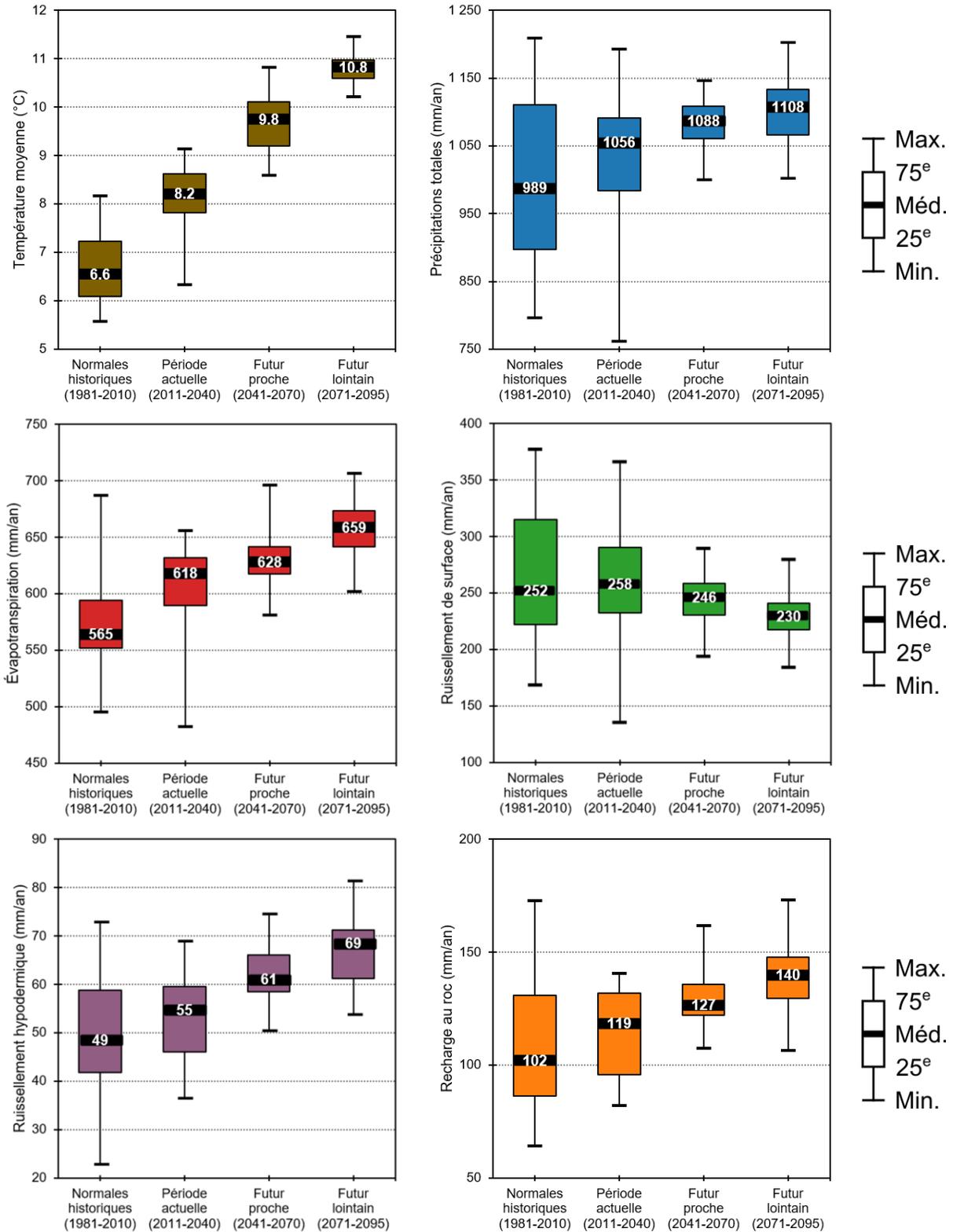


Figure 5.28. Tendances des composantes du bilan hydrologique et de la température estimées sur quatre périodes distinctes (1981-2010 / 30 ans, 2011-2040 / 30 ans, 2041-2070 / 30 ans et 2071-2095 / 25 ans) sur la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier.

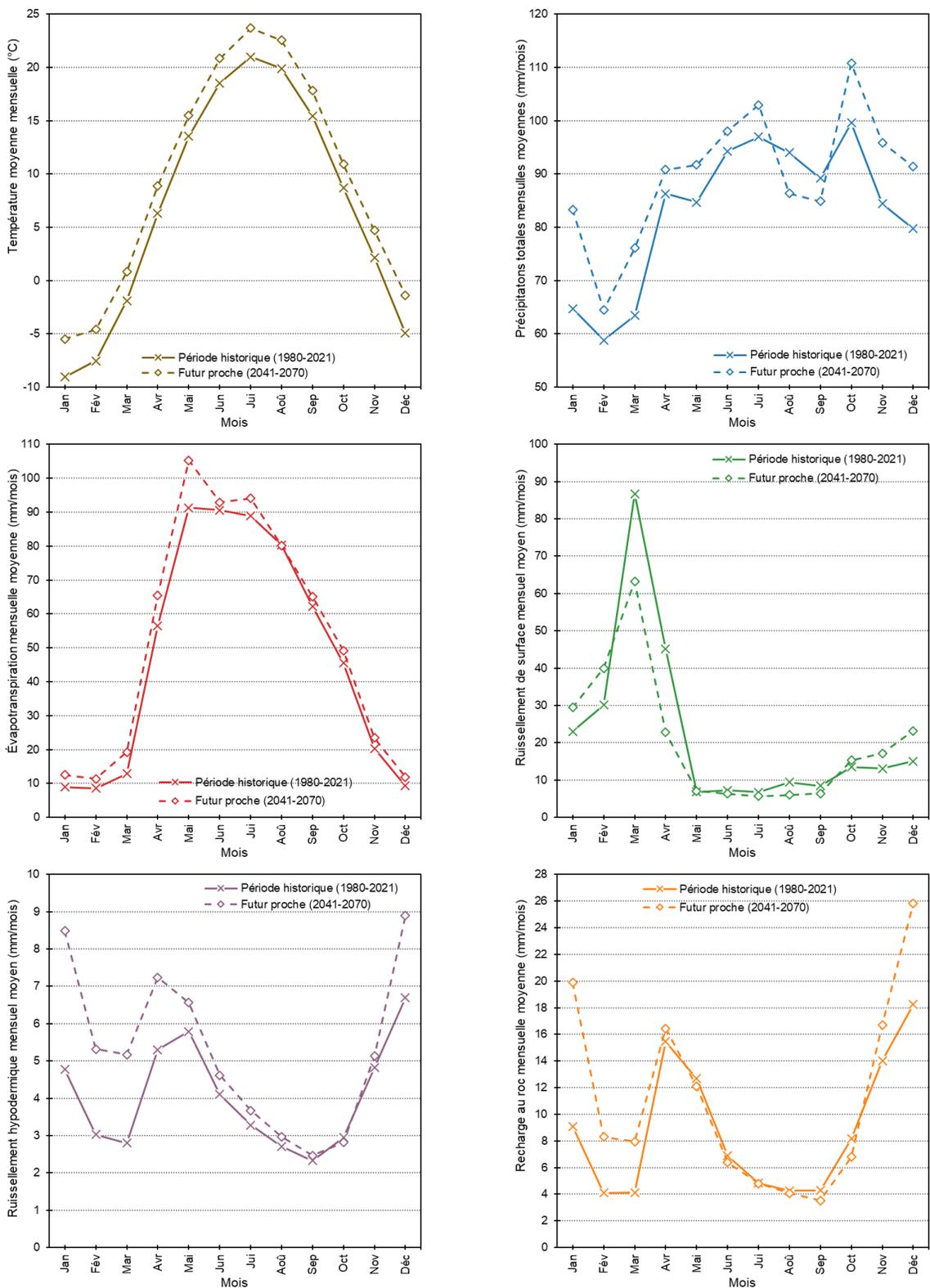


Figure 5.29. Évolution des composantes mensuelles moyennes du bilan hydrologique et de la température moyenne mensuelle entre la période historique (1980-2021) et le futur proche (2041-2070) sur la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier.

6 PRESSION SUR LA RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE

Afin d'estimer la pression sur la ressource en eau souterraine dans la région d'étude ainsi que son évolution dans le futur (section 6.3), plusieurs scénarii de recharge au roc (section 6.1) et d'usage de l'eau souterraine (section 6.2) ont été sélectionnés.

6.1 Versions de recharge au roc sélectionnées

L'actualisation de la recharge de l'aquifère rocheux dans la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier à partir des données climatiques historiques de la grille Info-Climat a permis de produire diverses cartes et statistiques pour les périodes suivantes : période historique (1980-2021 / 42 ans) et normales climatiques (1981-2010 / 30 ans). De plus, l'ajout des données issues des 12 modèles climatiques a permis d'évaluer la recharge au roc en climat futur pour les périodes suivantes : futur proche (2041-2070 / 30 ans) et futur lointain (2071-2095 / 25 ans). Ces compléments viennent agrémenter la première estimation de la recharge sur la zone d'étude, dite « préliminaire », initialement établie dans Ballard et al. (2021).

Le tableau 6.1 présente les cinq scénarii de recharge au roc obtenus à la suite de ce travail. Afin de ne pas multiplier les scénarii de pression sur la ressource en eau souterraine, le choix s'est porté sur trois scénarii qui sont jugés couvrir l'ensemble des possibilités. Le scénario R1 correspondant à la version actualisée de la recharge au roc sur la période historique a tout d'abord été sélectionné comme scénario de base correspondant à l'état actuel de la ressource sans prélèvement et dont les versions brutes et lissées affichent une recharge moyenne de 90 mm/an. Cette recharge est pratiquement identique à celle estimée pour la période de référence météorologique (1981-2010 ; R2). Pour le scénario futur de recharge, le futur proche (2041-2070), soit le scénario R3, a été retenu car il correspond à la période de modélisation des usages pour 2050 du projet RADEAU 1 (Ageco, 2019). Ce scénario de recharge à l'horizon proche présente une moyenne de 115 mm/an soit une hausse de 25 mm par rapport à la version historique (R1). Ainsi, afin d'avoir un scénario plus pessimiste, la version préliminaire (scénario R0) de la recharge au roc (Ballard et al., 2021) a aussi été sélectionnée car la recharge moyenne sur la zone d'étude y est de 73 mm/an dans sa version lissée, soit une baisse de 17 mm par rapport au scénario de base représentant l'état actuel (R1).

Tableau 6.1. Scénario de recharge produits sur la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier.

Recharge nette (mm/an)	Scénario				
Période	Préliminaire*	1980-2021	1981-2010	2041-2070	2071-2095
Version	R0	R1	R2	R3	R4
Brute	72	90	91	115	116
Lissée	73	90	91	115	117

*La version préliminaire correspond à l'assemblage des cartes de recharge de Croteau (2006) et du PACES Montérégie Est (2013).

Les trois scénarii de recharge retenus (R1, R3 puis R0) sont affichés sur la carte 19. Globalement, les secteurs de recharge importante sont similaires entre les trois scénarii sélectionnés. Par rapport à la recharge distribuée du scénario de base (R1), la différence réside essentiellement dans les valeurs absolues de recharge qui augmentent en climat futur (scénario R3) et diminuent donc selon la version préliminaire (scénario R0). Ce dernier scénario diverge également des deux autres car il considère la recharge dans les secteurs urbains, notamment ceux situés au nord de la région.

6.2 Scénarii d'usage de l'eau souterraine retenus

Initialement, les scénarii d'usage de l'eau souterraine se basent sur les travaux du projet RADEAU 1 (Ageco, 2019). Ceux-ci ont été repris et adaptés au territoire du présent projet par Ballard et al. (2021). Le tableau 6.2 résume l'évolution des usages dans le futur pour les trois scénarios (S1, S2 et S3) par rapport à l'usage actuel (S0). En plus d'avoir sélectionné le scénario présentant l'état actuel des usages sur la région d'étude (S0), le scénario S3 a été retenu car il affiche les changements d'usage les plus importants dans le futur avec une hausse globale de +38.4% des usages.

Tableau 6.2. Scénario d'usage produits sur la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier.

Évolution des usages par rapport à l'état actuel (S0)	Scénario			
	S0	S1	S2	S3
Usage				
Total réseau	-	+10.5%	+3.9%	+55.9%
Agricole total hors-réseau	-	+29.9%	+73.4%	+49.1%
ICI hors-réseau*	-	+5.7%	+27.9%	+24.0%
Résidentiel hors-réseau	-	+10.5%	+3.9%	+55.9%
Total de l'eau souterraine	-	+11.3%	+28.0%	+38.4%

*Les usages ICI n'ont finalement pas été modifiés pour les scénarii adaptés de la présente étude.

La distribution spatiale de l'usage total actuel (S0) est présentée à la carte 20. Elle combine les quatre types d'usage spatialement distribués puis lissés : (1) l'usage total réseau, (2) l'usage agricole total hors-réseau, (3) l'usage ICI hors-réseau et (4) l'usage résidentiel hors-réseau. Cette carte résulte de la production de l'indicateur intramunicipal développé dans Huchet et al. (2021). Ce dernier permet de différencier chaque usage et de les visualiser sur une même carte (carte 21). Comme l'indicateur intramunicipal assure une représentation des usages sur une grille faites de mailles de 250 m, il est alors possible de reproduire la carte d'usage total de l'eau souterraine dans le futur en appliquant les hausses de chaque usage individuellement (comme indiqué dans le tableau 6.2). Seuls les usages ICI n'ont pas été modifiés dans le futur puisqu'il est peu probable de voir ces derniers – en majorité des GPE reliés à des carrières – augmenter dans le futur (voir Ballard et al., 2021). La carte 22 présente donc l'usage total de l'eau souterraine pour le scénario S3 et la carte 23 les types d'usage futurs pour ce même scénario.

Finalement, ces quatre cartes sont affichées sur la même page (carte 24) afin de pouvoir comparer la distribution spatiale de l'usage total et des types d'usage actuels (S0) et futurs (S3) de l'eau souterraine. Comme l'indique le tableau 6.2, l'usage résidentiel hors-réseau réparti spatialement car relié à la densité de puits privés et l'usage total réseau associé aux puits municipaux ponctuels augmente de +55.9% par rapport à l'usage actuel (voir carte 24.D). L'usage agricole hors-réseau à la fois distribué et complété par les données ponctuelles des GPE agricoles sur les cartes 24.C et 24.D est augmenté de +49.1% dans le futur (voir tableau 6.2). Les autres usages ponctuels reliés aux GPE ICI ne sont pas modifiés dans le futur. Au niveau de l'usage total (cartes 24.A et 24.B), les zones d'usage élevé (> 50 000 m³/an/km²) sont essentiellement concentrées autour de Saint-Rémi et sont surtout reliées aux carrières, aux puits municipaux et à l'Unité de traitement des eaux souterraines (UTES). Entre ces zones ponctuelles d'usage élevé, des secteurs d'usage moyen à important (10 000 à 50 000 m³/an/km²) sont à mettre en lien avec l'usage agricole et un secteur restreint de développement résidentiel à l'est de Saint-Rémi.

6.3 Évaluation de la pression actuelle et future sur la ressource en eau souterraine

À partir des trois versions de recharge retenues (R1, R3 et R0) et les deux scénarii d'usage choisis (S0 et S3), quatre scénarii combinés d'usage et de recharge ont été établis. Le scénario S0R1 correspond à la situation actuelle (état de base) de la ressource en eau souterraine puisqu'il associe la recharge historique actualisée (R1) et l'usage actuel (S0). En considérant que cet usage (S0) se maintient dans le futur, un second scénario a été établi (S0R3) en y associant la recharge estimée à l'horizon proche (R3). Puis, cette recharge en climat future (R3) a été conservée en considérant une hausse globale des usages de +38.4% (S3) afin de générer le scénario S3R3. Enfin, un dernier scénario a été produit en combinant cette hausse d'usage dans le futur (S3) avec la recharge préliminaire (R0) pour produire un scénario pessimiste (S3R0). Les quatre scénarii sélectionnés permettent en effet de couvrir la gamme des effets combinés de l'évolution de la recharge de l'aquifère rocheux en climat futur et des usages dans un futur proche. À ces quatre scénarii peut donc être attribué un qualificatif selon le niveau de la situation : (1) scénario actuel (S0R1), (2) scénario optimiste (S0R3), (3) scénario intermédiaire (S3R3) et (4) scénario pessimiste (S3R0).

La distribution spatiale de la recharge effective pour ces quatre scénarii est indiquée sur la carte 25. Cette carte est établie en retirant l'ensemble des usages (soit l'usage total de l'eau souterraine) de la recharge nette du roc. Elle représente donc le volume d'eau disponible restant après avoir soustrait les usages. Pour le scénario représentant l'état actuel (S0R1), les usages représentent 16.7% de la recharge alors que selon les scénarii futurs, cette proportion varie de 13.1 à 26.5% selon les cas (tableau 6.3).

Tableau 6.3. Apport (recharge nette), prélèvements d'eau (types d'usage) et estimés du volume d'eau disponible (recharge effective) selon les scénarii sur la zone du modèle d'écoulement régional de Mercier.

Paramètre (mm/an)		Scénario			
		S0R1 Actuel	S0R3 Optimiste	S3R3 Intermédiaire	S3R0 Pessimiste
Usage	Total réseau	2	2	2	2
	Agricole total hors-réseau	3	3	5	5
	ICI hors-réseau	7	7	7	7
	Résidentiel hors-réseau	3	3	5	5
	Total de l'eau souterraine	15	15	19	19
	Partiel de l'eau souterraine	6	6	10	10
Recharge	Nette	90 (100%)	115 (100%)	115 (100%)	73 (100%)
	Effective totale	75 (83.3%)	100 (86.9%)	96 (83.3%)	53 (73.5%)
	Effective partielle	84 (93.1%)	109 (94.6%)	106 (91.7%)	63 (86.9%)
	Effective totale future / Nette actuelle (R1) ¹	-	+11.3%	+6.6%	-40.7%
	Effective totale future / Effective totale actuelle (S0R1) ²	-	+33.6%	+28.1%	-28.7%

1 : ces valeurs représentent le ratio de recharge effective totale future par rapport à la recharge nette du roc actuelle (R1) ;

2 : ces valeurs représentent le ratio de recharge effective totale future par rapport à la recharge effective totale actuelle (S0R1).

Comme les GPE ont un impact ponctuel, la recharge effective partielle a été calculée pour les quatre scénarii (carte 26). Elle correspond à la recharge effective sans l'effet des GPE, c'est-à-dire que seuls les usages distribués (usage agricole total hors-réseau et usage résidentiel hors-réseau) ont été retirés de la recharge nette. Par rapport à la situation actuelle où elle correspond à 93.1% de la recharge réelle du roc, cette recharge effective partielle représente 86.9 à 94.6% de la recharge nette selon les scénarii futurs (tableau 6.3).

Afin de compléter le portrait de la ressource en eau souterraine en climat futur, deux cartes présentant la différence de recharge pour les scénarii futurs (R3 et R0) par rapport à la recharge actuelle (R1) ont été produites (carte 27.A et 27.B). Comme prévu, le scénario de recharge distribuée à l'horizon proche (R3) montre une hausse de la recharge entre 2041 et 2070 (carte 27.A) alors que la version initiale de recharge (R0), considérée comme « pessimiste », montre des différences significatives à savoir une baisse marquée dans le secteur de recharge importante au centre de la région et une hausse de recharge dans les zones urbaines et à l'est de la région d'étude (carte 27.B).

De même, le scénario d'usage futur choisi (S3) a été comparé au scénario actuel (S0) en appliquant là aussi une différence entre les deux cartes d'usage total (carte 27.C). Sur cette carte, la hausse est bien visible, surtout dans les zones d'usage distribué reliées aux surfaces agricoles mieux visibles au centre de la région sur la carte 28.B qui traite spécifiquement des différences d'usage agricole hors-réseau dans le scénario futur (S3) par rapport à l'actuel (S0). La hausse d'usage total est aussi reliée à l'augmentation de l'usage total réseau dont l'eau provient des puits municipaux bien visibles sur la carte 28.A. Cette hausse globale de l'usage est aussi due, certes dans une moindre mesure, aux puits résidentiels localisés selon certains axes ou zones restreintes un peu partout sur la zone d'étude et dans une zone de développement résidentiel à l'est de la municipalité de Saint-Rémi (carte 28.C).

Finalement, la carte 29 présente les différences de recharge effective (recharge au roc – ensemble des usages) des trois scénarii futurs (S0R3, S3R3 et S3R0) par rapport à l'état actuel (S0R1). La recharge effective totale est en hausse dans le scénario S0R3 et ce partout sur la région d'étude (carte 29.A) passant de $74\,896\text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$ à $100\,084\text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$ soit une hausse de +33.6% dans ce scénario optimiste (tableau 6.3). Dans le scénario futur S0R3, la recharge effective totale est même toujours au-dessus de la recharge nette du roc actuelle (R1) égale à $89\,947\text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$.

Le scénario intermédiaire (S3R3) présente une situation différente selon les secteurs (voir carte 29.B). Dans ce cas de figure, la hausse de recharge en climat futur compense généralement les hausses d'usages à l'exception de quelques zones marquant les secteurs urbains, autour de Sainte-Martine et surtout ponctuellement au nord de la municipalité de Saint-Rémi là où sont implantés des puits municipaux. Par rapport au scénario actuel (S0R1), la recharge effective du scénario intermédiaire affiche une hausse de 28.1% à $95\,924\text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$ (tableau 6.3). La recharge effective du scénario S3R3 est, comme le scénario optimiste (S0R3), toujours au-dessus de la recharge réelle du roc actuelle (R1).

Le scénario pessimiste (S3R0) combinant la version de recharge préliminaire (R0) et une hausse d'usage globale de +38.4% (S3) est présenté sur la carte 29.C. Hormis dans les secteurs urbains et à l'est de la région d'étude, la grande majorité du territoire est marquée par une baisse de la recharge effective par rapport à l'état actuel (S0R1). La recharge effective dans le scénario S3R0 atteint une valeur critique de $53\,383\text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$ soit une baisse de -28.7% par rapport à la recharge effective actuelle (S0R1). Également, c'est le seul scénario où la recharge effective est bien en-dessous de la recharge nette du roc actuelle (R1) avec une réduction de -40.7% (tableau 6.3).

7 DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE NUMÉRIQUE D'ÉCOULEMENT RÉGIONAL

7.1 Modèle conceptuel d'écoulement de l'eau souterraine

Le modèle conceptuel sert à définir et à intégrer l'architecture géologique du modèle numérique avec les conditions hydrogéologiques qui définissent les conditions d'écoulement de l'eau souterraine dans le modèle numérique. Le modèle géologique 3D (section 4) définit la stratigraphie des dépôts meubles qui recouvrent l'aquifère de roc du modèle numérique. Le modèle numérique doit permettre de simuler le système de circulation de l'eau souterraine de l'aquifère de roc, en partant de la recharge appliquée à la surface du modèle numérique, jusqu'à la connexion avec le réseau hydrographique régional permettant à l'eau souterraine d'émerger du système souterrain. La figure 7.1 (Lavigne, 2006) indique le contexte hydrogéologique régional de la région d'étude. Dans la partie amont, la recharge se fait par l'infiltration d'une partie des précipitations à travers les dépôts meubles qui sont généralement plus minces et plus perméables. L'eau souterraine circule ensuite dans l'aquifère rocheux vers les parties où la topographie est plus basse où se trouvent les différents cours d'eau qui sont les exutoires du système d'écoulement. Le système d'écoulement considéré est aussi caractérisé par la présence de différents cours d'eau au milieu de la zone du modèle numérique.

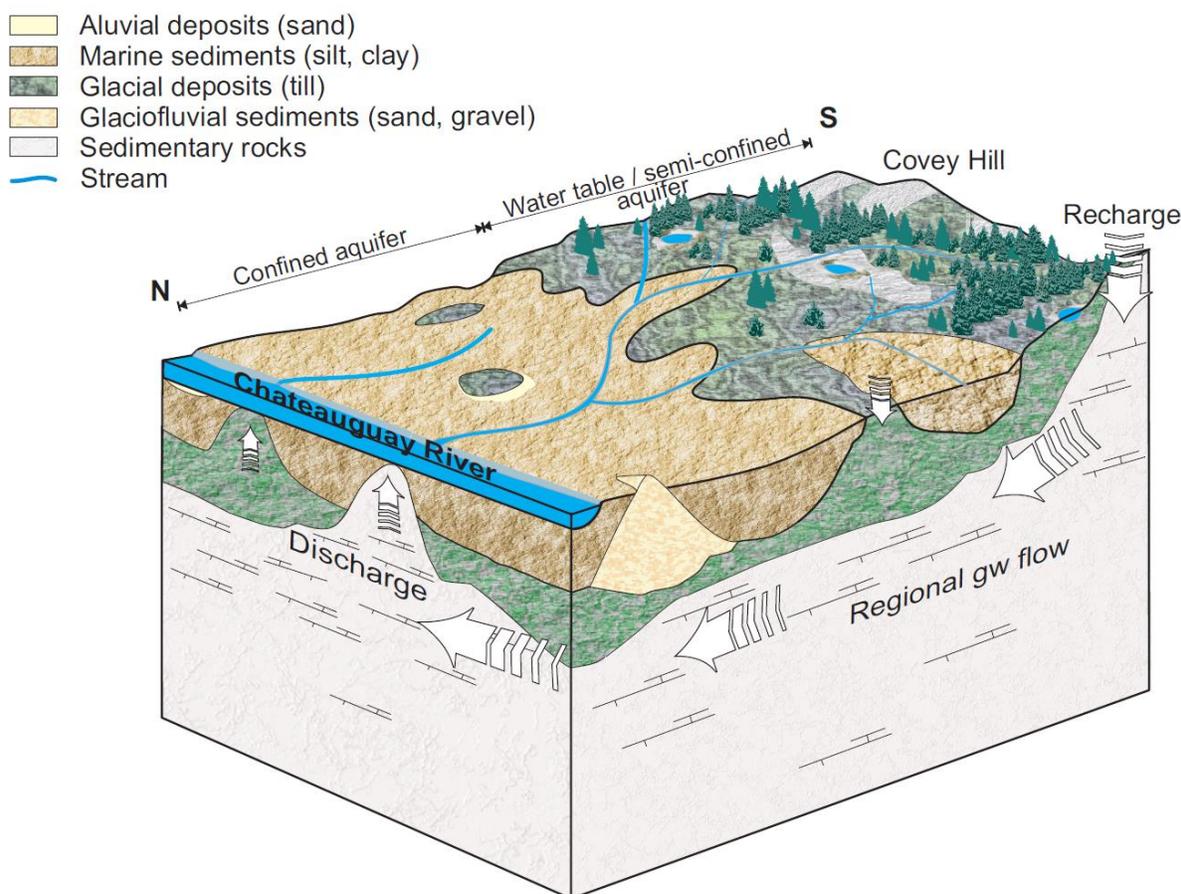


Figure 7.1. Modèle conceptuel d'écoulement de l'eau souterraine dans la région d'étude (extrait de Lavigne et al., 2010).

Le modèle conceptuel (figure 7.1) montre que les conditions confinées sont présentes surtout dans la partie aval du système d'écoulement, où la topographie est plus basse et où il y a des accumulations d'argile plus épaisses. Les conditions semi-confinées sont localisées surtout aux endroits où le till est présent. Le modèle conceptuel suggère aussi que l'eau souterraine est évacuée de l'aquifère par des parties de l'aquifère rocheux en contact avec la rivière Châteauguay quand celle-ci ne coule pas sur des sédiments. Les autres cours d'eau d'importance de la région d'étude peuvent aussi jouer le rôle d'exutoire de l'eau souterraine qui circule dans l'aquifère rocheux. La partie amont du modèle conceptuel correspond à la zone de recharge de l'aquifère rocheux. Contrairement au modèle conceptuel de Lavigne et al. (2010) qui représente tout le bassin de la rivière Châteauguay, dont la région considérée pour produire le modèle numérique, le roc n'est pas affleurant dans les zones de recharge, même si par endroits l'épaisseur de till est plus restreinte.

Comme illustré par le modèle conceptuel, les conditions hydrogéologiques régionales ont les caractéristiques suivantes :

- Dans le domaine à modéliser, il y a cinq unités géologiques aux propriétés hydrauliques distinctes (du haut vers le bas) : le matériel au-dessus de l'argile, l'argile, les matériaux perméables de type esker, le till puis le roc ;
- L'aquifère régional de roc est constitué par une séquence de roches sédimentaires composées de grès, de dolomite et de calcaires (Pontlevoy, 2004 ; Lavigne, 2006). Les 20 premiers mètres de la partie supérieure du roc sont plus fracturés et ont ainsi une bonne perméabilité qui décroît graduellement de plusieurs ordres de grandeur en profondeur (Laurencelle, 2018). Les couches du modèle numérique doivent donc permettre d'imposer les différentes propriétés hydrauliques des matériaux granulaires, mais aussi de représenter les différences de perméabilité du roc selon la profondeur ;
- La topographie de la surface du sol va exercer une influence sur l'écoulement. L'élévation de la surface du modèle numérique correspondra donc à la topographie, telle que définie par le modèle d'élévation LiDAR au Canada et le MNE issu des données du SRTM de la NASA aux États-Unis ;
- Les dépôts sont généralement partiellement saturés (voir coupes piézométriques de l'annexe 2) et ils contrôlent surtout la recharge vers l'aquifère de roc de même que l'émergence de l'eau souterraine vers les cours d'eau qui sont plus ou moins connectés à l'aquifère de roc ;
- Les dépôts meubles sont généralement de faible perméabilité et ils ne constituent pas de bons aquifères. Cependant, des dépôts de type fluvio-glaciaires ont formé des dépôts granulaires, dont l'esker de Mercier. À certains endroits, ces dépôts ont érodé le till jusqu'au roc. L'esker de Mercier représente ainsi un aquifère granulaire qui est en contact avec l'aquifère régional de roc fracturé. De plus, des dépôts relativement perméables de nature glacio-marine (de type Mb) sont situés surtout en bordure du piémont du Mont Covey Hill ;
- Des sédiments quaternaires recouvrent l'aquifère de roc avec des épaisseurs qui peuvent dépasser 45 m par endroit. Le till constitue l'unité de base de ces dépôts et il repose directement sur le roc. La matrice du till est constituée de silt et est généralement très compacte, sauf près de la surface où elle peut être remaniée. Le modèle conceptuel doit donc permettre de représenter les matériaux remaniés des matériaux non remaniés ;

- Des sédiments fins argileux se retrouvent dans les secteurs où la surface topographique est moins élevée, généralement à moins de 60 m d'altitude. Ces dépôts argileux peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur par endroits. La présence de ces dépôts argileux va minimiser la recharge qui atteint l'aquifère de roc, surtout si l'épaisseur totale est de plus de 2 à 3 m. Tout comme pour le till, les premiers mètres d'argile situés près de la surface sont considérés plus perméables, puisque plus silteux (Pontlevoy, 2004), ce qui pourrait permettre à l'eau de s'infiltrer verticalement ;
- À cause de la présence des matériaux fins argileux ou de till très compact sur la majorité du domaine du modèle, le système aquifère est défini comme étant principalement confiné, quoique par endroit, il existe des discontinuités dans l'épaisseur des matériaux peu perméables qui peuvent mettre le roc fracturé en contact avec la surface. Le modèle numérique sera donc défini avec des conditions confinées ;
- Dans le modèle numérique, le roc fracturé sera considéré comme un milieu poreux équivalent, car il n'est pas possible de représenter les fractures à l'échelle régionale. Ces conditions ont été utilisées dans les modèles antérieurs couvrant la région d'étude (Pontlevoy, 2004 ; Lavigne, 2006 ; Technorem, 2008a et 2008b ; Claprood et al., 2021) ;
- La topographie (carte 3) montre que la municipalité de Saint-Rémi est située sur un haut topographique régional qui constitue aussi un dôme piézométrique (voir aussi section 3.4 et annexe 2). À partir de ce haut topographique et piézométrique, l'écoulement de l'eau souterraine se fait de façon radiale vers les principaux cours d'eau qui constituent des limites naturelles où émerge l'eau souterraine. Ce secteur doit donc être représenté par une recharge relativement importante de l'aquifère au roc par rapport à l'ensemble de la région (voir les conditions de recharge imposée au modèle à la section 7.3) ;
- La périphérie du modèle a été définie en utilisant des limites hydrauliques naturelles du système d'écoulement de l'eau souterraine. La limite ouest du modèle correspond à la rivière Châteauquay qui coule en partie sur le roc. La limite nord correspond au fleuve Saint-Laurent qui est aussi en contact avec le roc à cet endroit. La limite est correspond à la rivière L'Acadie. La limite sud correspond au ruisseau Norton et à la rivière Des Anglais ;
- À l'intérieur des limites du modèle, quelques cours d'eau d'importance, surtout ceux dont les écoulements sont permanents, représentent des exutoires pour l'eau souterraine provenant de l'aquifère de roc, mais aussi d'une partie de l'eau ayant transité seulement dans la partie saturée des dépôts meubles. Plusieurs cours d'eau recoupent l'intérieur du domaine du modèle, avec de l'ouest vers l'est : la rivière des Fèves, la rivière Esturgeon, la rivière Saint-Pierre, la rivière de la Tortue, le ruisseau Saint-André et la rivière Saint-Jacques ;
- L'élévation des cours d'eau est fixée à 1 m sous l'élévation LiDAR, sauf pour le fleuve Saint-Laurent et la rivière Châteauquay où l'élévation est fixée à moins de 2 m sur le niveau LiDAR. L'imposition d'une élévation inférieure à la topographie permet d'éviter les effets de bordure menant à des niveaux trop élevés.

7.2 Construction du maillage en 2D et 3D

Le modèle numérique est construit à l'aide du logiciel de modélisation numérique par éléments finis FEFLOW (DHI-WASY Software, 2013). Un maillage numérique avec des éléments triangulaires prismatiques a été utilisé pour le nouveau modèle numérique. Les éléments du maillage en 2D (en plan) ont été raffinés autour des points d'observation représentant les puits de pompage ou les puits d'observation (carte 30). La grille résultante comporte des mailles dont les dimensions varient d'environ 25 m (aux 250 localisations de puits) jusqu'à des mailles de 400 m de côté aux endroits où l'écoulement des eaux souterraines est présumé peu important. Le modèle couvre une aire de 954 km², soit des mailles d'environ 100 x 100 m de côté. Le maillage du modèle a aussi été raffiné autour des limites à charges imposées où les flux seront importants, soit au niveau du fleuve Saint-Laurent ainsi que des cours d'eau principaux. Le maillage final possède 73 907 éléments par couche soit un total de 2 586 745 éléments pour les 35 couches du modèle numérique 3D.

Le modèle numérique reprend les mêmes cinq unités du modèle géologique, soit les matériaux sus-jacents à l'argile, l'argile, le fluvio-glaciaire, le till et le roc. La grille en trois dimensions (3D) est générée de façon à reproduire la géométrie des unités hydrostratigraphiques et les hétérogénéités verticales des propriétés des matériaux qui sont définies par le modèle géologique (section 4). Les élévations des surfaces supérieures des cinq unités principales du modèle numérique reproduisent les élévations des mêmes unités du modèle géologique. Ces cinq unités sont ensuite subdivisées en sous-couches plus minces, en respectant la géométrie du modèle géologique. L'épaisseur minimum des couches est fixée à 0.1 m et quand il n'y a pas de matériaux présents (épaisseur de 0 m), les couches sous-jacentes sont simplement déplacées vers le bas (de 0.1 m) ce qui a pour effet de créer une faible distorsion de la géométrie des surfaces par rapport à la réalité. Le tableau 7.1 présente les détails de la géométrie du modèle numérique qui est formé de 35 couches qui représentent les cinq unités géologiques.

Tableau 7.1. Définition stratigraphique du modèle numérique d'écoulement.

Modèle géologique	Modèle Feflow			
Matériaux	Matériaux du modèle	Couches	Nombre de couches	Épaisseur approximative (m)
Sus-jacent	Sus-jacent	1	1	2
Argile	Till remanié, argile, esker	2 - 6	5	20
Till	Till compact, esker	7 - 26	20	20
Roc	Roc fracturé R1	27 - 28	2	8
	Roc fracturé R2	29 - 30	2	16
	Roc R3	31	1	20
	Roc R4	32	1	40
	Roc R5	33	1	80
	Roc R6	34	1	80
	Roc R6	35	1	100
Épaisseur du roc		1 - 35	35	344
Épaisseur totale				386

La surface du modèle est définie par l'élévation topographique provenant des levés LiDAR. La première couche du modèle correspond à l'ensemble des sédiments présents en surface du modèle géologique et qui sont considérés comme étant remaniés en termes de conductivité hydraulique. Cette couche représente une épaisseur fixe de 1 m, alors que pour toutes les autres couches du modèle, lorsqu'il n'y a pas de matériaux, une épaisseur minimum de 0.1 m par couche est imposée afin de conserver la continuité des couches. La première couche du modèle est mise en place sur le modèle pour faciliter la distribution de la recharge appliquée à la surface du modèle. La conductivité hydraulique élevée des matériaux de cette couche représente les matériaux remaniés retrouvés à la surface dans la région de Saint-Rémi. De façon générale, les matériaux granulaires qui se retrouvent jusqu'à plusieurs mètres de profondeur en partant de la surface, sont considérés remaniés comparés aux mêmes matériaux situés plus en profondeur. La deuxième unité du modèle représente l'argile et le till remanié. Cette unité est subdivisée en cinq couches d'épaisseurs égales. La troisième unité représente 20 couches de till compact alors que l'esker se retrouve imbriqué dans les deux premières unités, soit dans les couches 2 à 26, qui correspond à la dernière couche avant le roc. De cette manière, l'esker est en contact hydraulique limité avec l'aquifère de roc. Le roc est représenté par neuf couches qui augmentent en épaisseur avec la profondeur. La base du roc est définie à -300 m d'élévation et est plane, contrairement aux autres couches du modèle qui suivent les variations de la topographie.

La figure 7.2 offre un aperçu du modèle 3D et montre qu'à l'échelle réelle, le modèle est très mince (< 400 m) comparé à sa superficie de 954 km². L'exagération verticale (40x) permet de mieux discerner les dépôts meubles qui représentent le tiers de l'épaisseur totale, le reste représente l'aquifère de roc.

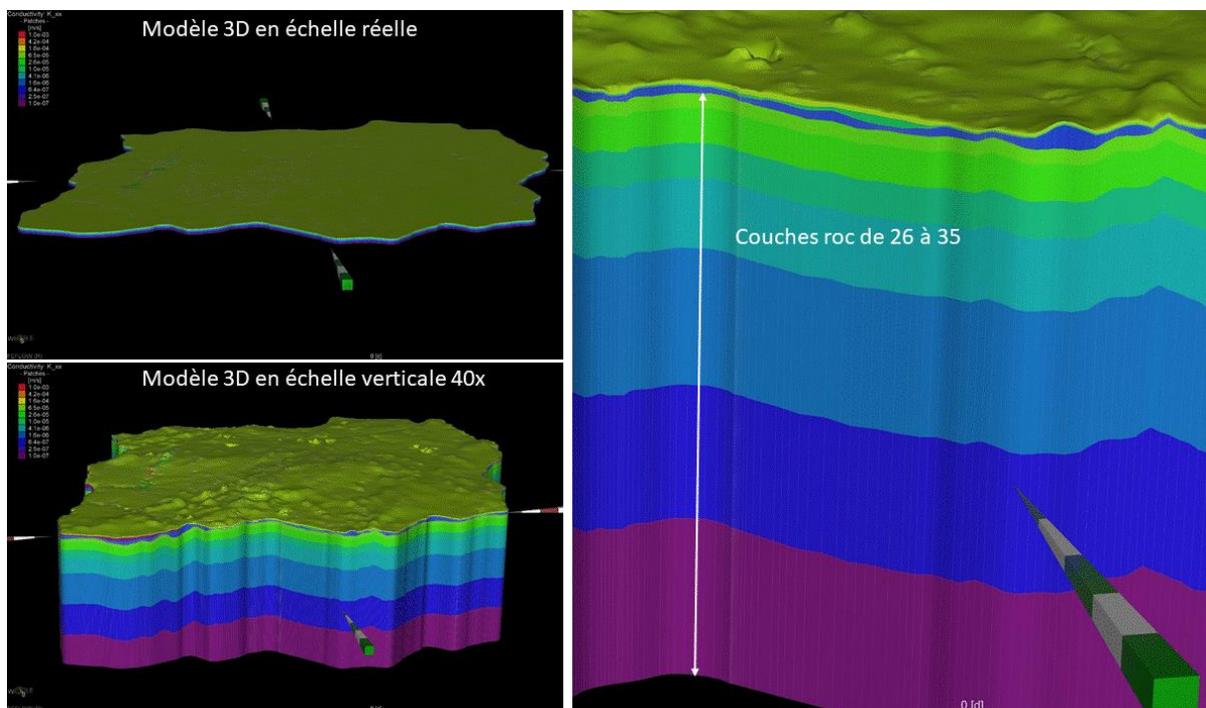


Figure 7.2. Bloc 3D du modèle numérique.

La figure 7.3 correspond à une coupe à travers le modèle 3D avec une exagération verticale de 40x. Elle recoupe le modèle avec une orientation ouest-est, allant de la rivière Châteauguay à l'ouest, jusqu'à la rivière L'Acadie à l'est. La couleur des couches dépend de leur conductivité hydraulique distincte. Au niveau des dépôts meubles, la partie ouest de la coupe révèle l'esker de Mercier (en jaune et orange) qui est partiellement enfoui sous les argiles (mauve), qui sont elles-mêmes au-dessus du till (bleu). Ailleurs, le long de la coupe, c'est le till qui domine. Au sein du roc, la réduction de la conductivité hydraulique selon la profondeur est traduit dans la légende par des couleurs différentes. En surface, des dépressions topographiques sont bien visibles aux endroits où se trouvent des carrières au nord de la coupe.

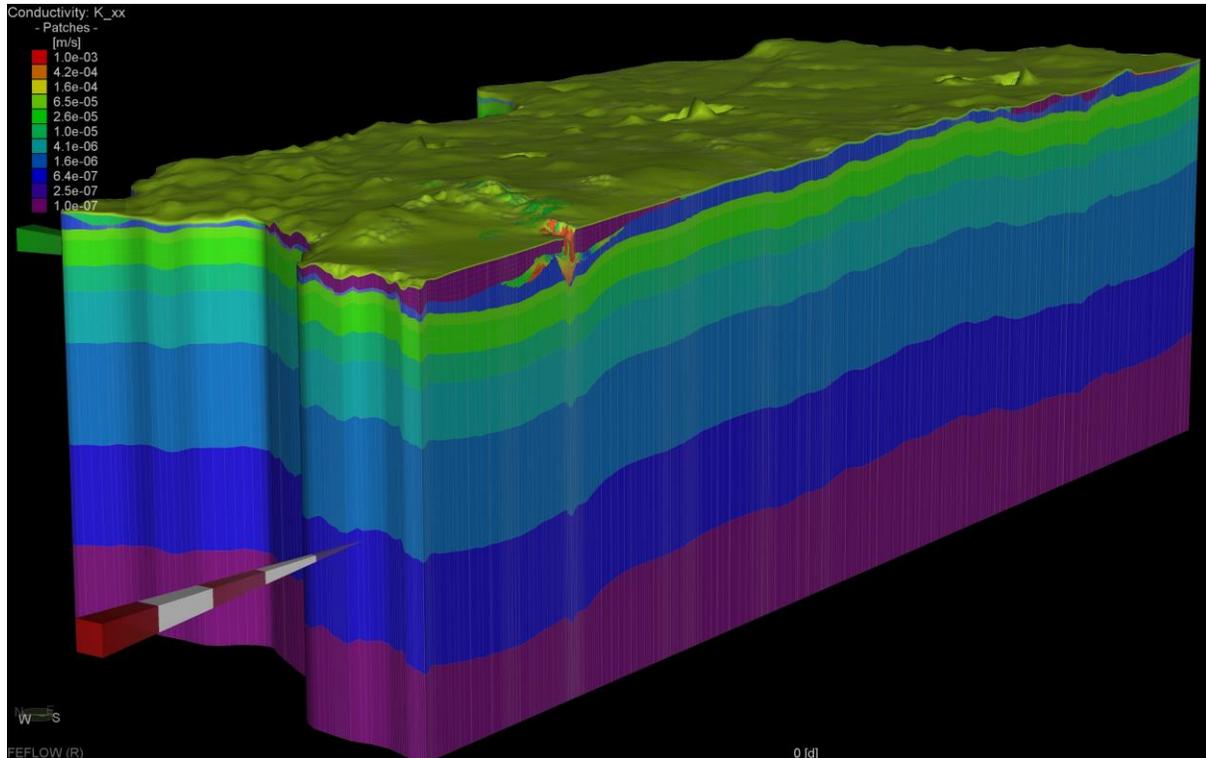


Figure 7.3. Bloc 3D avec une coupe est-ouest à travers le modèle numérique.

7.3 Conditions aux limites du modèle

La carte 30 montre les conditions qui ont été imposées aux limites du modèle numérique. Les limites à charge imposées ont été assignées sur les cours d'eau principaux présents sur la région du modèle. Par rapport à une version initiale du modèle, des charges imposées supplémentaires ont été ajoutées afin de permettre à plus d'eau d'émerger à la surface du modèle, en particulier sur certains tronçons amont des cours d'eau. La périphérie du modèle est définie par les limites hydrauliques naturelles du système d'écoulement de l'eau souterraine qui correspondent à des cours d'eau. Les limites nord et ouest correspondent au fleuve Saint-Laurent et à la rivière Châteauguay où ont été assignées des charges imposées de 1 m sous l'élévation LiDAR. La limite à l'est correspond à la rivière L'Acadie et la limite sud au ruisseau Norton et à la rivière Des Anglais. Pour ces deux limites, les charges ont été imposées à la couche 1 ainsi qu'à la couche 27 qui correspond à la partie supérieure du roc. Pour le fleuve Saint-Laurent et la rivière Châteauguay qui représentent des exutoires considérés comme étant respectivement en contact total et partiel avec le roc, les conditions sont imposées à la surface du modèle (couche 1) ainsi que dans la partie supérieure perméable de l'aquifère du roc (respectivement des couches 27 à 28 pour la rivière Châteauguay et des couches 27 à 30 pour le fleuve Saint-Laurent). Pour tous les autres cours d'eau du modèle, les charges sont imposées en surface (couche 1) et correspondent à 1 m sous le niveau d'élévation de la surface LiDAR.

Dans le modèle conceptuel, tous les cours d'eau définis comme ayant un écoulement permanent selon la classification du CEHQ sont représentés comme étant connectés ou partiellement connectés avec l'aquifère au roc et ces cours d'eau ont été représentés dans le modèle numérique initial avec des conditions limites de charges imposées. De plus, les résultats des simulations ont démontré qu'il était nécessaire d'imposer des charges supplémentaires sur les portions amont de certains cours d'eau afin de permettre à l'eau « en surplus » de sortir du modèle dans ces secteurs. Conceptuellement, ces choix peuvent avoir du sens puisqu'il est possible que plusieurs de ces secteurs représentent des résurgences du système d'écoulement et que dans certaines conditions de recharge ces sorties d'eau aient formé les tourbières qui sont présentes dans ces secteurs en périphérie du dôme piézométrique. Un certain nombre de cours d'eau intermittents principaux ont donc été représentés dans le modèle en charges imposées afin de permettre l'émergence d'eau de l'aquifère du roc vers les exutoires naturels servant de drains occasionnels. Plusieurs rivières ou ruisseaux sont retrouvés à l'intérieur des limites du modèle avec de l'ouest vers l'est : la rivière des Fèves, la rivière Esturgeon, la rivière Saint-Pierre, la rivière de la Tortue, le ruisseau Saint-André et la rivière Saint-Jacques. Pour les limites définies comme à flux nul, il n'y a que deux petites sections qui sont définies comme telles et qui sont respectivement situées au sud du modèle, entre la rivière L'Acadie et la rivière Des Anglais et au nord, entre les rivières L'Acadie et la rivière Saint-Jacques. À part le fleuve Saint-Laurent et la rivière Châteauguay, toutes les conditions limites sur les autres cours d'eau sont imposées seulement à la surface du modèle (défini comme « *slice* » dans FEFLOW). De plus, sur toutes les limites à charges imposées, des contraintes de flux sont appliquées sur les nœuds afin d'empêcher l'apport d'eau des cours d'eau vers l'aquifère.

7.4 Imposition de la recharge et des prélèvements d'eau souterraine

Plusieurs scénarii de recharge et d'usage ont été considérés pour tester le fonctionnement du modèle. La nouvelle estimation de la recharge spatialement distribuée est appliquée pour produire les simulations pour les conditions présentes et futures (section 6). En plus, un scénario de recharge réalisé par Croteau (2006) et Carrier et al. (2013) et adapté pour la région d'étude dans le cadre du mandat précédent (Ballard et al., 2021) est aussi testé sur le modèle. Ce dernier scénario de recharge est considéré comme étant une estimation minimum de la recharge possible et il est couplé à un usage maximum afin de produire un scénario pessimiste en termes d'apport d'eau net à l'échelle du modèle.

Pour la version finale du modèle, six scénarii sont utilisés pour simuler différentes combinaisons de recharge et d'usages en conditions actuelles et dans un futur proche (section 6.3). Au départ, deux scénarii de recharge sans prélèvement (rapport de 2021 (R0) et HELP historique (R1)) ont été testés afin de simuler les conditions de nappe en conditions naturelles, en comparant les charges simulées avec le niveau du sol (levés LiDAR). Ensuite, quatre scénarii de recharge avec usages ont été utilisés sur le modèle (tableau 7.2) : (1) scénario actuel (S0R1), (2) scénario optimiste (S0R3), (3) scénario intermédiaire (S3R3) et (4) scénario pessimiste (S3R0).

Afin de simplifier l'analyse des résultats des simulations, aucun pompage ponctuel n'est appliqué au modèle et tous les scénarii de recharge et d'usage sont combinés pour produire une recharge efficace distribuée à la surface du modèle (lissée par interpolation).

Le premier scénario de recharge provient du rapport de 2021 (Ballard et al., 2021) et il représente la recharge totale de l'aquifère rocheux en conditions naturelles, sans prélèvement, avec une lame d'eau moyenne à l'échelle du modèle d'environ 72 mm/an. Le deuxième scénario correspond à la recharge actualisée sans prélèvement (R1) issue des présent travaux (voir section 5.6) et correspondant à une lame d'eau de 90 mm/an. Le scénario de recharge actualisée représente une augmentation de presque 24% par rapport à la version antérieure du rapport de 2021.

Tableau 7.2. Scénarii de recharges et prélèvements considérés dans le modèle numérique.

Scénarii de recharge et d'usage appliqués au modèle				
No	Simulation	No scénario	Description usage / recharge	Recharge nette moy. (mm/an)
1	Rapport 2021	R0	Sans exploitation / Rapport 2021	72
2	HELP historique	R1	Sans exploitation / HELP historique	90
3	Actuel	S0R1	Exploitation actuelle / HELP historique	75
4	Optimiste	S0R3	Exploitation actuelle / HELP future proche	100
5	Intermédiaire	S3R3	Exploitation future / HELP future proche	96
6	Pessimiste	S3R0	Exploitation future / Rapport 2021	53

Les quatre scénarii de recharge effective avec prélèvements (la recharge moins les usages) représentent de 53.4 mm/an à plus de 100 mm/an, ce qui correspond à des variations de -29% à +34% en termes de changement sur les volumes d'eau nets par rapport au scénario actuel de 75 mm/an. Les résultats des scénarii de recharge actuelle sans et avec usages actuels permettent de mesurer les variations sur les charges résultantes afin de les comparer avec les changements historiques des niveaux piézométriques observés dans l'un des puits de suivi du RSESQ (figure 2.2) et tel qu'estimées avec une solution analytique (Ballard et al., 2021). Cette comparaison est explorée plus en détail avec les simulations en régime transitoire présentées à la section 7.7.

La figure 7.4 montre la distribution de la recharge avec (a) la recharge totale actuelle, sans prélèvement (R1) et (b) la recharge effective actuelle (SOR1) incluant l'ensemble des prélèvements (résidentiels, GPE, captages municipaux, agricoles et l'UTES). La recharge distribuée nette liée aux activités ainsi qu'à la géologie de surface montre des valeurs qui varient de 0 à 300 mm/an régionalement. Là où l'argile est présente, la recharge nette varie entre 20 et 30 mm/an, alors que certains secteurs au sud du dôme piézométrique prennent des valeurs au-delà de 250 mm/an. Le secteur de l'esker montre des valeurs autour de 200 mm/an. Par ailleurs, la figure 7.4b comporte des valeurs négatives allant jusqu'à -380 mm/an représentant surtout les prélèvements associés aux carrières et à l'UTES. Le tableau 7.3 indique que les valeurs de recharge nette utilisées pour la présente version du modèle se comparent assez bien avec celles des modèles antérieurs qui varient de 50 à 81 mm/an, sauf pour le modèle de Technorem (2008a et 2008b) qui avait utilisé une recharge de 183 mm/an.

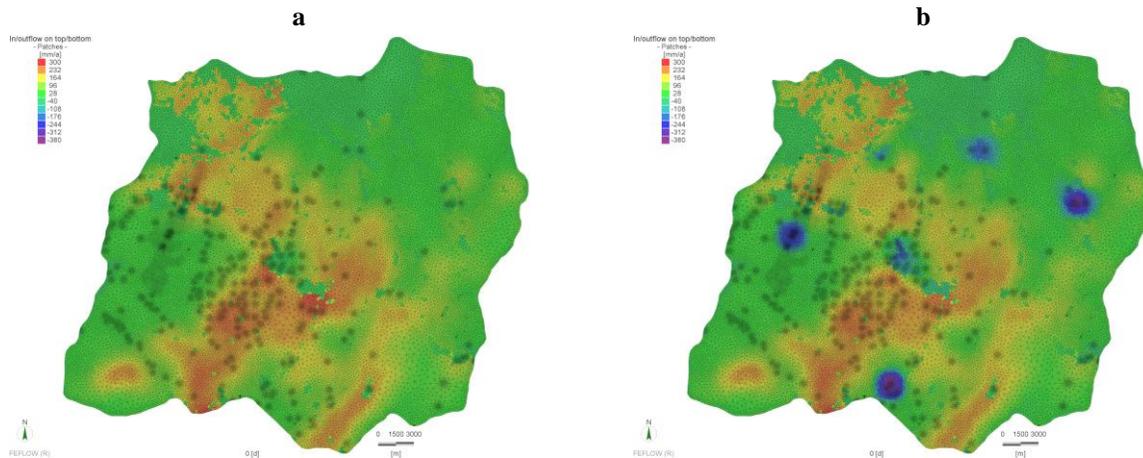


Figure 7.4. Distribution spatiale de la recharge effective assignée à la première couche du modèle numérique : (a) recharge sans prélèvement et (b) recharge nette incluant l'ensemble des prélèvements.

Tableau 7.3. Comparaison de la recharge des modèles numériques antérieurs avec le nouveau modèle.

Informations modèle Saint-Rémi	Autres modèles				Modèle Saint-Rémi		
	Pontlevoy		Lavigne	Modèle Claprood	R0	R1	SOR1
	Régional	Local	ROC				
Recharge totale (mm/an)	50	72	81	52	70	90	84

7.5 Propriétés hydrauliques assignées aux unités du modèle

Le tableau 7.4 résume les conditions de conductivités hydrauliques assignées aux unités hydrogéologiques représentées dans le modèle numérique. Les valeurs initiales de conductivité hydraulique attribuées aux matériaux du modèle proviennent du nouveau modèle de Mercier (Claprod et al., 2021) avec notamment les propriétés de l'esker qui n'ont pas été modifiées durant le processus de calage du modèle. Pour le modèle en régime permanent, la porosité effective (n , 0.3) et la porosité de drainage (S_y , 0.25) correspondent aux valeurs par défaut, mais ces valeurs ont été ajustées pour le modèle fonctionnant en régime transitoire (voir section 7.7). Les valeurs calées de conductivité hydraulique ont été optimisées lors de la calibration du modèle afin de reproduire la piézométrie observée (voir la section 7.6 pour plus de détails).

Une revue des propriétés hydrauliques des matériaux granulaires et du roc a été faite à partir des études antérieures afin de les comparer aux valeurs attribuées au modèle numérique (tableau 7.5). Le tableau 7.6 présente les statistiques compilées pour l'ensemble des valeurs présentées au tableau 7.5. Ces valeurs sont comparées aux valeurs de conductivités hydrauliques horizontales (K_h) et verticales (K_v) attribuées aux unités du modèle. La figure 7.5 détaille l'ensemble des valeurs de K des modèles antérieurs comparées à celles du nouveau modèle. De façon générale, les valeurs de K_h et K_v du nouveau modèle sont généralement situées dans la partie supérieure des plages de valeurs en comparaison aux autres modèles. Ces valeurs finales appliquées au nouveau modèle ont été optimisées avec le calage du scénario actuel (SOR1) de recharge efficace puis comparées avec les autres scénarii de recharge.

Tableau 7.4. Conductivités hydrauliques finales du modèle numérique.

Modèle géologique	Modèle Feflow		Simulation Feflow	
	Matériaux du modèle	Couches	K_h	K_v
Sus-jacent	Matériaux remaniés, esker	1	1.0E-04, 1.0E-04	1.0E-04, 1.0E-04
Argile	Till remanié, argile, esker	2 - 6	1.0E-05, 1.0E-07, 1.0E-04	1.0E-05, 1.0E-08, 1.0E-04
Till	Tills compact, esker	7 - 26	1.0E-6, 5.0E-4	1.0E-07, 5.0E-04
Roc	Roc fracturé R1	27 - 28	5.0E-5	5.0E-05
	Roc fracturé R2	29 - 30	3.5E-05	3.5E-05
	Roc R3	31	7.0E-06	7.0E-07
	Roc R4	32	4.0E-06	4.0E-07
	Roc sain R5	33	2.0E-06	2.0E-07
	Roc sain R6	34	5.0E-07	5.0E-08
	Roc sain R6	35	1.0E-07	1.0E-07

Tableau 7.5. Valeurs de conductivité hydraulique provenant de projets antérieurs.

Source	Conductivité hydraulique horizontale K_h						
	Alluvion	Argile	Esker	Till remanié	Till compact	Roc fracturé	Roc sain
Modèle Claprood	5.0E-05	6.0E-08	2.0E-04	5.0E-06	-	5.0E-05	1.0E-07
Modèle régional Pontlevoy	-	5.1E-10	2.2E-04	1.3E-05	1.7E-08	2.2E-05	-
Modèle local Pontlevoy	-	5.0E-10	2.1E-04	1.1E-05	1.7E-08	2.2E-06	-
Modèle Lavigne	-	-	-	-	-	5.0E-05	2.3E-05
Modèle Technorem	-	6.0E-08	2.0E-04	5.0E-06	-	2.8E-05	-
Mesures Paradis	2.9E-04	-	2.8E-04	1.8E-05	1.1E-05	1.8E-05	-
Moyenne géométrique	1.2E-04	5.5E-09	2.2E-04	9.3E-06	1.1E-05	2.0E-05	2.3E-05
Minimum	5.0E-05	5.0E-10	2.0E-04	5.0E-06	1.1E-05	2.2E-06	2.3E-05
Maximum	2.9E-04	6.0E-08	2.8E-04	1.8E-05	1.1E-05	5.0E-05	2.3E-05
FEFLOW run	5.0E-05	6.0E-08	2.0E-04	5.0E-05	1.0E-06	7.0E-05	3.5E-07

Source	Conductivité hydraulique verticale K_v						
	Alluvion	Argile	Esker	Till remanié	Till compact	Roc fracturé	Roc sain
Croteau	2.8E-02	1.2E-09	3.4E-03	1.3E-04	4.5E-08	-	-
Modèle Maxime	5.0E-05	6.0E-09	2.0E-05	5.0E-08	-	5.0E-06	1.0E-07
Modèle local Pontlevoy	-	1.0E-11	2.1E-04	1.1E-05	1.7E-09	2.2E-06	-
Modèle Lavigne	-	-	-	-	-	1.0E-06	1.7E-07
Modèle Technorem	-	-	-	-	-	-	-
Mesures Paradis	5.1E-06	-	1.3E-05	4.6E-08	5.2E-07	2.9E-07	-
Moyenne géométrique	1.9E-04	4.1E-10	1.2E-04	1.4E-06	1.5E-07	1.3E-06	1.7E-07
Minimum	5.1E-06	1.0E-11	1.3E-05	4.6E-08	4.5E-08	2.9E-07	1.7E-07
Maximum	2.8E-02	6.0E-09	3.4E-03	1.3E-04	5.2E-07	5.0E-06	1.7E-07
FEFLOW run	5.0E-05	6.0E-08	2.0E-04	5.0E-05	1.0E-06	7.0E-05	3.5E-07

Tableau 7.6. Statistiques de conductivités hydrauliques en comparaison des valeurs du modèle numérique.

Source	K_h				K_v			
	Moy. géo.	Min.	Max.	FEFLOW Saint-Rémi	Moy. géo.	Min.	Max.	FEFLOW Saint-Rémi
Alluvion	1.2E-04	5.0E-05	2.9E-04	1.0E-04	1.9E-04	5.1E-06	2.8E-02	1.0E-04
Argile	5.5E-09	5.0E-10	6.0E-08	1.0E-07	4.1E-10	1.0E-11	6.0E-09	1.0E-08
Esker	2.2E-04	2.0E-04	2.8E-04	2.0E-04	1.2E-04	1.3E-05	3.4E-03	2.0E-04
Till remanié	9.3E-06	5.0E-06	1.8E-05	5.0E-05	1.4E-06	4.6E-08	1.3E-04	5.0E-05
Till	1.1E-05	1.1E-05	1.1E-05	1.0E-06	1.5E-07	4.5E-08	5.2E-07	1.0E-07
Roc fracturé première couche	2.0E-05	2.2E-06	5.0E-05	5.0E-05	1.3E-06	2.9E-07	5.0E-06	5.0E-05
Roc sain dernière couche	2.29E-05	2.29E-05	2.29E-05	1.0E-07	1.70E-07	1.70E-07	1.70E-07	1.0E-07

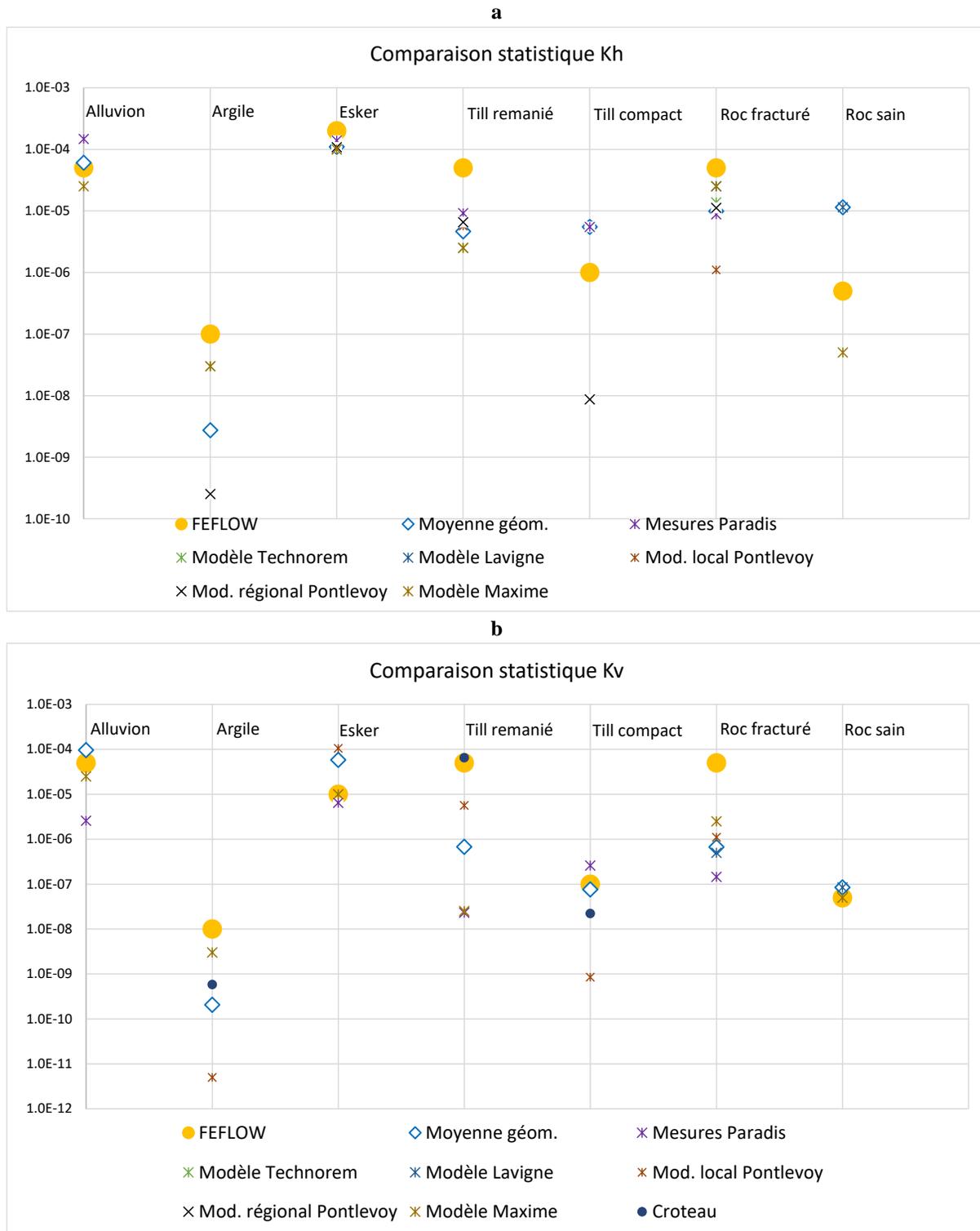


Figure 7.5. Comparaison des conductivités hydrauliques horizontales (a) et verticales (b) attribuées au modèle par rapport aux valeurs extraites des projets antérieurs.

7.6 Calage et résultats du modèle

Les simulations du modèle sont réalisées en régime permanent et pour des conditions hydrauliques d'aquifère confiné et saturé. Ces conditions représentent bien le contexte régional et permettent de comparer les charges piézométriques simulées avec celles observées dans l'aquifère de roc. Pour comparer les niveaux piézométriques, 3 824 points d'observation, représentant un maillage de 500 m x 500 m, sont intégrés au modèle. La référence du niveau piézométrique de chaque point est extraite de la surface interpolée de la piézométrie du roc (section 3.4). La figure 7.6a a été produite afin de s'assurer que globalement les charges simulées pour le scénario sans exploitation (R1) ne dépassent pas le niveau du sol. Ainsi, le niveau piézométrique du modèle est situé en moyenne à 3.4 m sous le niveau du sol. La figure 7.6b montre que les niveaux piézométriques de la recharge dite « pessimiste » produite dans Ballard et al. (2021) sans exploitation (scénario R0), se retrouvent globalement à un niveau un peu plus bas que le scénario R1 (3.9 m) par rapport au sol. Ensemble, ces deux scénarios de recharge sans exploitation représentent de façon réaliste les écarts possibles des quantités de recharge réelles qui affectent la région d'étude. Tous les résultats de la calibration du modèle sont présentés dans le fichier Excel « *Donnees_et_resultats_modele_final_SaintRemi.xlsx* » joint à l'annexe électronique du rapport. Des précisions sont également indiquées dans l'annexe 8.

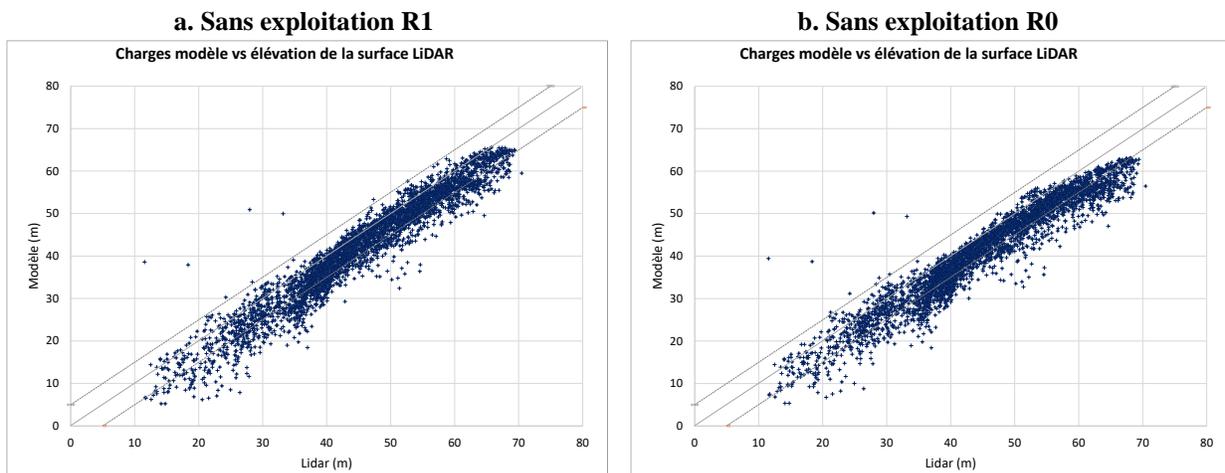


Figure 7.6. Comparaison des niveaux piézométriques des points d'observation pour les simulations sans exploitations R1 et R0, comparés à l'élévation du sol (LiDAR).

Les simulations avec exploitation (prélèvement d'eau pour les différents usages : résidentiels, GPE, captages municipaux, agricoles et l'UTES) sont réalisées selon quatre versions de scénarii de recharge/prélèvements représentant les conditions actuelles et de futur proche (2041-2070) (voir tableau 7.7). Le scénario de base (S0R1) représente la recharge distribuée interpolée (version lissée) et intègre l'ensemble des prélèvements en conditions actuelles. Ce scénario représente une recharge effective correspondant à une lame d'eau nette de 75 mm/an. Les scénarii optimistes (S0R3) et intermédiaires (S3R3) représentent la recharge future avec respectivement des niveaux d'usages actuels et futurs. Le quatrième scénario constitue un scénario pessimiste (S3R0) puisqu'il intègre une recharge réduite par rapport à la recharge actualisée jumelée avec des usages futurs maximums. Ce scénario représente les pires conditions possibles en termes d'apport de recharge nette au modèle avec une lame d'eau de seulement 53 mm/an et une différence par rapport au scénario de base (actuel) de moins (-) 29%.

Tableau 7.7. Bilans de scénarii de recharge et des prélèvements utilisés pour les simulations.

Bilans des scénarii de recharge et d'usage appliqués au modèle					
No	Scénario	Description usage / recharge	No scénario	Recharge nette moy. (mm/an)	Différence vs l'actuel (%)
1	Rapport 2021	Sans exploitation / rapport 2021	R0	73	-
2	HELP historique	Sans exploitation / HELP historique	R1	90	-
3	Actuel	Exploitation actuelle / HELP historique	S0R1	75	0%
4	Optimiste	Exploitation actuelle / HELP futur proche	S0R3	100	+34%
5	Intermédiaire	Exploitation maximale / HELP futur proche	S3R3	96	+28%
6	Pessimiste	Exploitation maximale / rapport 2021	S3R0	53	-29%

La figure 7.7 compare les charges simulées des quatre modèles avec exploitation avec les niveaux piézométriques de référence. Les figures 7.7a à 7.7d correspondent aux scénarii 3, 4, 5 et 6 de recharge/prélèvements cités au tableau 7.7. Les charges de références utilisées comme points d'observations dans le modèle représentent les niveaux piézométriques interpolés sur un maillage de 500 m x 500 m. Le tableau 7.8 compile les statistiques de l'ajustement des charges simulées par rapport aux charges observées pour les quatre simulations. Les charges hydrauliques simulées se situent en majorité dans l'enveloppe de référence fixée à plus ou moins 5 m (correspondant à 10% du niveau maximal des charges observées de 50 m) autour du niveau de référence. Sur la zone d'étude, les charges hydrauliques mesurées varient entre environ 10 et 65 m d'élévation, correspondant au haut piézométrique près de Saint-Rémi jusqu'en bordure du fleuve. L'écart-type des puits d'observation (PO) du SIH est de 13.8 m alors qu'il est de 9.4 m pour les puits fiables (Ballard et al., 2021) et de 12.0 m pour les points d'observation de la piézométrie interpolée extraits sur les mailles de 500 m. Les statistiques de calage pour le scénario actuel montrent une erreur RMS (*Root Mean Square*) de 2.74 m et une erreur médiane de 0 m (feuille Excel « *Run800.xlsx* »), suggérant que les charges simulées sont parfaitement dans la moyenne des charges de référence, avec toutefois une dispersion un peu élevée (RMS). On se retrouve avec des charges simulées qui sont un peu hautes dans la partie supérieure du modèle (au niveau du dôme piézométrique) et un peu basses en aval (soit au niveau des exutoires et ce surtout en bordure du fleuve). Ces résultats sont satisfaisants étant donné que l'analyse du portrait régional du bilan pourrait indiquer que les apports nets (recharge moins usages) pourraient être un peu élevés, possiblement avec des usages sous-estimés, notamment au niveau de l'usage agricole (voir section 7.7).

Tableau 7.8. Comparaison des charges simulées aux charges observées.

Statistiques de calage du modèle				
No	Simulation	RMS global (m)	Erreur médiane globale (m)	Rabattement moyen (m)
1	Actuel (S0R1)	2.74	0	0.69
2	Optimiste (S0R3)	2.79	0.7	-0.15
3	Intermédiaire (S3R3)	2.79	0.5	-0.01
4	Pessimiste (S3R0)	2.73	-0.8	0.99

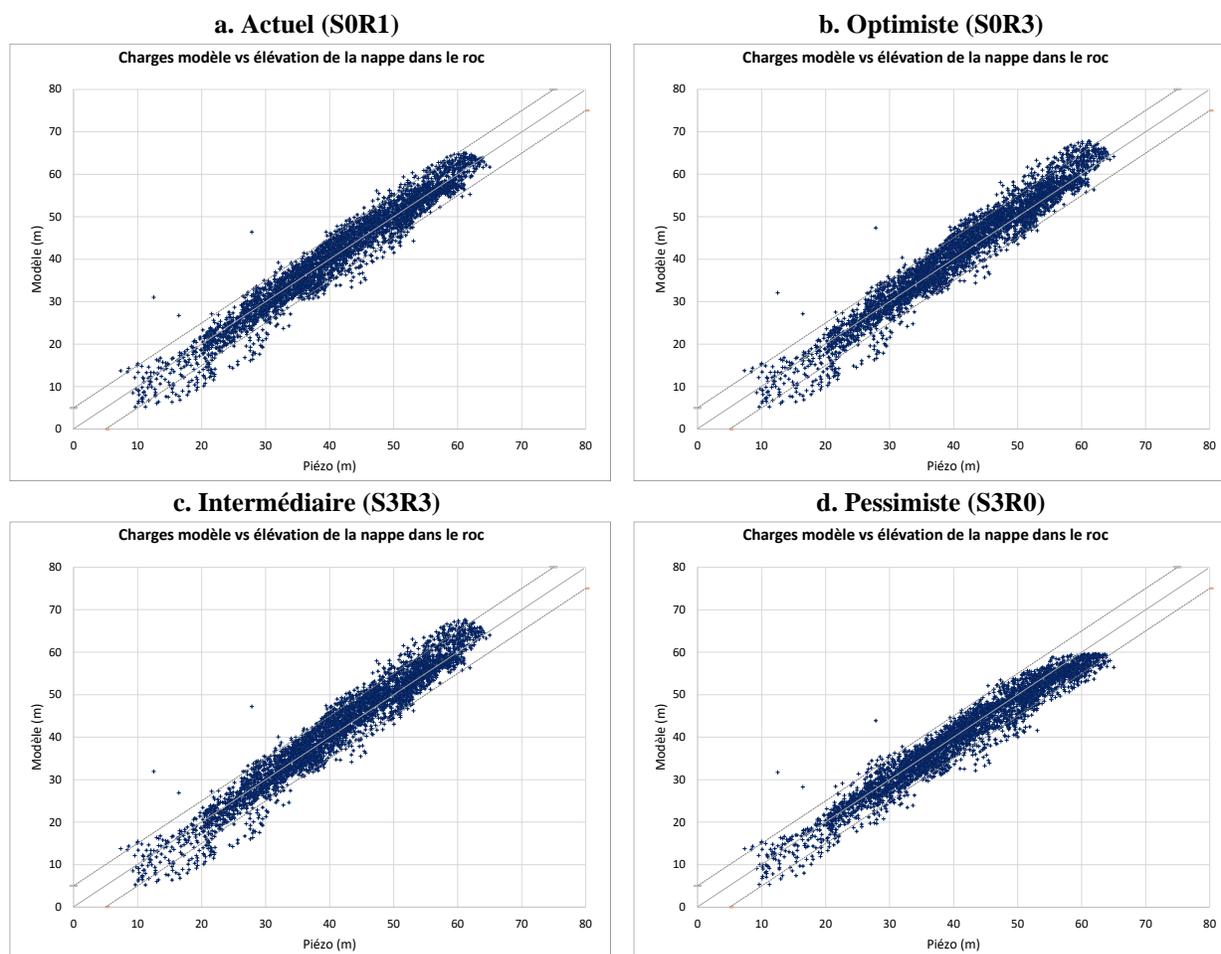


Figure 7.7. Comparaison des niveaux piézométriques simulés et observés pour les scénarii S0R1, S0R3, S3R3 et S3R0.

Tableau 7.9. Bilan des entrées et sorties d'eau des six versions de simulations.

Bilan du modèle (mm/an)							
Simulation	Recharge			Conditions limites			
	Entrant	Sortant	Nette	Fleuve	Châteauguay	Rivières	Résiduel
R1	89.9	0	89.9	-5.2	-3.6	-80.7	0.4
R0	72.6	0	72.6	-6.7	-3.9	-61.8	0.1
S0R1	80.8	-6.0	74.9	-5.0	-3.5	-57.0	0.2
S3R0	107.7	-5.6	100.1	-5.4	-4.0	-79.8	0.2
S3R3	102.4	-6.5	95.9	-5.3	-3.9	-76.1	0.2
S3R0	58.8	-5.4	53.4	-6.5	-3.3	-35.1	0.4

*Note : le résiduel du tableau correspond au calcul de la sommation des bilans du tableau et non au bilan du modèle, qui est beaucoup plus petit.

Le tableau 7.9 détaillent les bilans du modèle pour tous les scénarii simulés. La figure 7.8 (voir aussi la feuille « Budget » du fichier Excel en annexe) représente les entrées et sorties d'eau des quatre versions du modèle avec exploitation. Globalement, le bilan indique que lorsque le bilan d'entrée net augmente, soit par l'augmentation de la recharge ou la réduction des prélèvements, le surplus d'eau est principalement évacué par les rivières en surface et à l'intérieur du modèle, alors que les changements sont plutôt minimales sur les limites périphériques.

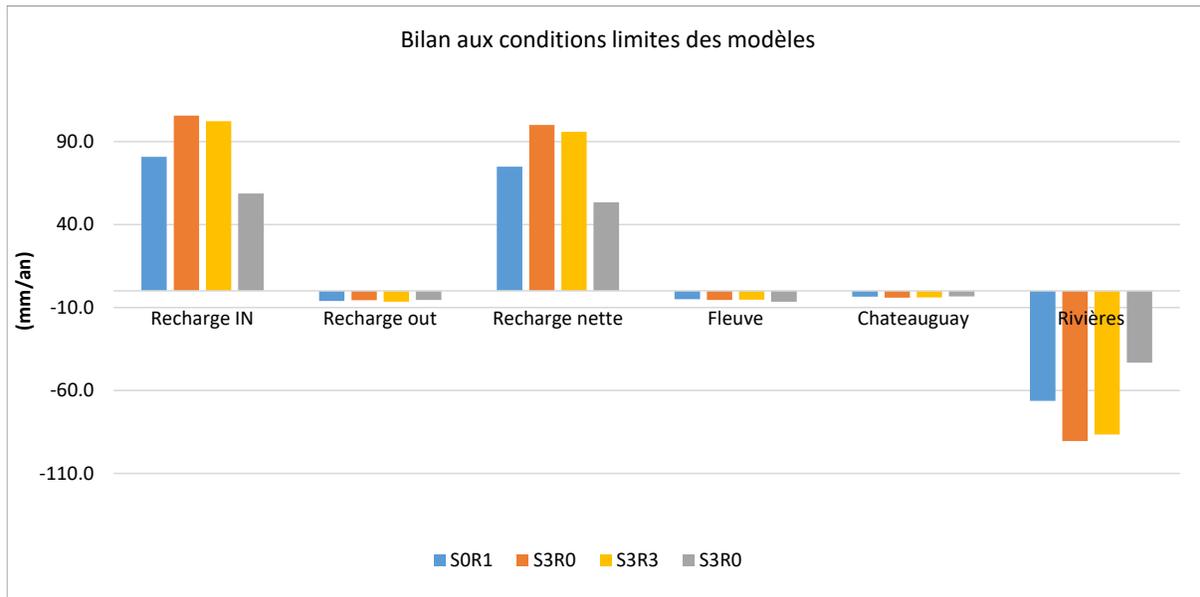


Figure 7.8. Bilans d'entrée et de sortie d'eau des quatre scénarii avec exploitation modélisées.

La carte 31 présente les rabattements du niveau piézométrique causés par l'ensemble des prélèvements selon le scénario. Le scénario de base (SOR1) induit des rabattements plutôt modérés sur l'ensemble de la zone mais de plus forts rabattements en lien avec les prélèvements locaux importants associées aux prélèvements ICI (carrières et UTES) et aux puits municipaux de Saint-Rémi. Les scénarii optimiste et intermédiaire réduisent l'étendue et la magnitude des rabattements alors que le scénario pessimiste mène au contraire à des rabattements plus étendus et plus importants.

7.7 Résultats du modèle en régime transitoire

Des simulations en régime transitoire ont été faites pour vérifier si le modèle pouvait reproduire les changements piézométriques, en termes de temps de transition et de niveaux de charges, lorsque soumis à un nouveau niveau d'exploitation. Seuls les résultats de deux modèles « calibrés » sont présentés afin de comparer les modifications de charges hydrauliques en conditions naturelles vers les conditions d'exploitation, soit les modèles actuel (R1 vers SOR1) et pessimiste (R1 vers S3R0).

Dans cette version du modèle en régime transitoire, la calibration s'est faite de manière qualitative afin de reproduire les variations rapides des niveaux de nappe observés sur les puits de surveillance de la région. Ces variations montrent que les niveaux fluctuent rapidement, à l'intérieur d'une année selon les changements de régime hydraulique liés à la recharge et aux différents usages.

Le tableau 7.10 présente les valeurs des propriétés hydrauliques des matériaux du modèle « calibré » qui affectent les conditions transitoires de l'écoulement dans le modèle. Les autres conditions du modèle (conductivité hydraulique et conditions limites) n'ont pas été modifiées.

Tableau 7.10. Propriétés du modèle pour le régime transitoire.

No	Matériel	Porosité (%)	Emmagasinement spécifique (1/m)
1	Alluvion	0.30	0.0001
2	Argile	0.20	
3	Esker	0.30	
4	Till remanié	0.20	
5	Till	0.20	
6	Roc fracturé	0.05	0.00001
7	Roc sain		

Les conditions hydrauliques initiales (de départ) du modèle représentent les niveaux de charges hydrauliques provenant du modèle avec la recharge actuelle et sans usage (R1) afin de tester le changement vers un nouvel équilibre reflétant les conditions d'exploitation comprenant tous les usages. Le modèle a été simulé sur une période de 100 ans afin d'observer les changements de charges sur une longue période. Les points d'observation pour visualiser les changements de charges sont sélectionnés dans le secteur du dôme piézométrique. Ce choix est fait afin de pouvoir représenter les changements de rabattement maximum du modèle. Les points d'observation représentent les puits dits « fiables » (Ballard et al., 2021) qui ont été sélectionnés afin de représenter les conditions historiques et qui pourraient éventuellement être comparés à des observations réelles.

Les figures 7.9a et 7.9b présentent les rabattements en fonction du temps pour le scénario R1 vers le scénario S0R1, respectivement sur 100 ans et 2 ans, alors que la figure 7.9c indique les résultats pour le scénario R1 vers le scénario S3R0 sur 2 ans. La figure 7.9d montre les puits sélectionnés sur le dôme piézométrique (points verts) avec en fond de carte la piézométrie interpolée indiquant le haut niveau piézométrique du dôme en blanc. Les points des graphiques de rabattement correspondent à la moyenne calculée sur les 46 puits d'observations sélectionnés.

Globalement, les vitesses de rabattement pour les deux modèles sont similaires puisque les propriétés hydrauliques des matériaux sont les mêmes. Cependant, la différence se situe au niveau du rabattement total qui est relativement faible (environ 1.5 m) avec la transition de R1 vers S0R1 alors qu'il est d'environ 6 m pour la transition de R1 vers S3R0. Ces résultats laissent à penser que, comme indiqué précédemment, les flux nets en conditions hydriques actuelles sont trop importants, soit à cause d'une surévaluation de la recharge ou d'une sous-estimation des usages. La nouvelle estimation de la recharge a été calibrée avec les cours d'eau jaugés ; il serait donc surprenant qu'il y ait une marge suffisante permettant d'expliquer le surplus de flux empêchant les niveaux de descendre comme ce qui est observé historiquement. Concernant la question de la sous-estimation des flux sur les usages, il est possible qu'une bonne partie de ceux-ci ne soient pas complètement répertoriés. Cela pourrait être le cas pour les GPE dont les débits déclarés ne font pas l'objet d'une vérification systématique. C'est potentiellement le cas pour les prélèvements agricoles qui sont aussi très peu rapportés. Les prélèvements répertoriés par Technorem (2008) et Pontlevoy (2004) indiquent qu'il pourrait y avoir près de trois fois plus de prélèvements utilisés par rapport aux scénarii de modélisation (14 mm/an). L'ordre de grandeur du rabattement simulé pour le scénario pessimiste qui est compatible avec la baisse des niveaux piézométriques observés depuis les années 1980 sur le puits de suivi du RSESQ (figure 2.2) supporte la possibilité que la pression sur la ressource en eau souterraine soit plus importante qu'estimée dans le cadre des présents travaux.

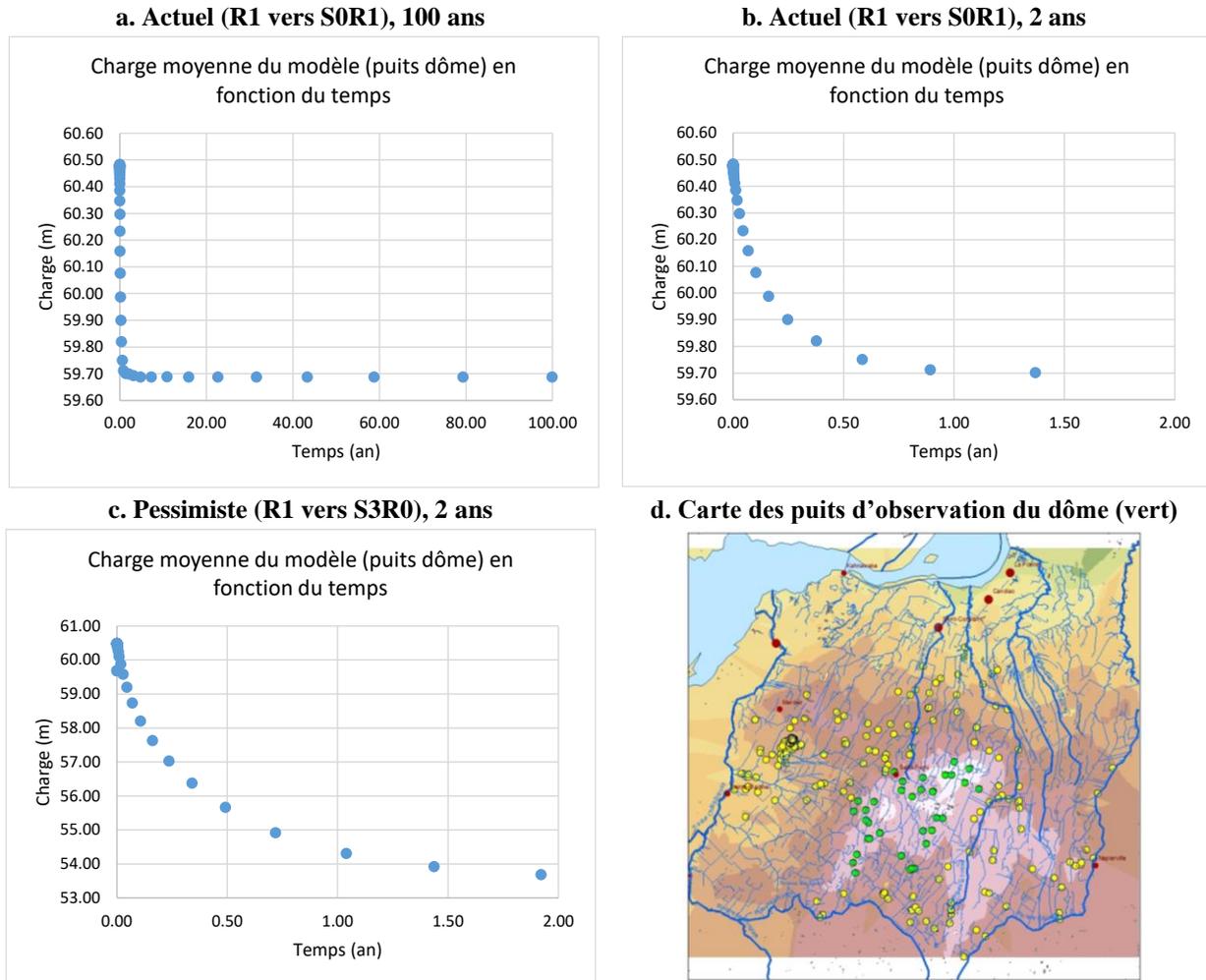


Figure 7.9. Rabattements piézométriques comparatifs des simulations représentant l'état sans usage (R1) et l'état avec usages pour les modèles S0R1 et S3R0.

7.8 Effets des usages individuels sur les rabattements

Cette section présente les rabattements du niveau piézométrique simulés pour chaque type de prélèvement considéré individuellement pour le scénario pessimiste. Le tableau 7.11 détaille les bilans des quatre scénarii pour chacun des usages, soit les réseaux municipaux (S3R0MunS), les ICI (S3R0ICIS), l'agricole (S3R0AgrS), et le résidentiel (S3R0ResS), en plus de reprendre les scénarii de base R0 et S3R0. Le choix de ce scénario se base sur les résultats des simulations en régime transitoire qui ont montré que les rabattements historiques peuvent être reproduits en utilisant le scénario pessimiste (S3R0) qui intègre une recharge minimum (R0), produite dans Ballard et al. (2021), avec les estimations d'usages en future proche (S3) qui considèrent la hausse maximale des volumes d'eau souterraine prélevés (voir aussi Ballard et al., 2021). Le rabattement est calculé à partir des conditions initiales R0 sans usage. Le tableau 7.12 présente les statistiques RMS et d'erreur médiane par rapport à la piézométrie de référence. Le tableau 7.13 compare ensuite les bilans d'eau pour chaque usage individuel et permet de vérifier que les bilans simulés sont comparables aux scénarios d'origine.

Tableau 7.11. Recharge nette des scénarii de recharge et d'usage utilisés pour les simulations.

Bilans des scénarii de recharge et d'usage appliqués au modèle					
No	Scénario	Description usage / recharge	No scénario	Recharge nette moy. (mm/an)	Différence vs S3R0 (%)
1	Rapport 2021	Sans exploitation / rapport 2021	R0	73	-
2	Pessimiste	Exploitation maximale / rapport 2021	S3R0	64	-
3	Rapport 2021 Mun	Future proche, réseaux municipaux / rapport 2021	S3R0MunS	71	111
4	Rapport 2021 Ici	Future proche, ICI / rapport 2021	S3R0IciS	74	103
5	Rapport 2021 Agr	Future proche, agricole / rapport 2021	S3R0AgrS	68	92
6	Rapport 2021 Res	Future proche, résidentiel / rapport 2021 proche	S3R0ResS	68	101

Tableau 7.12. Charges simulées comparées à la piézométrie de référence pour les quatre simulations.

Statistiques de calage du modèle				
No	Simulation	RMS global (m)	Erreur médiane globale (m)	Rabattement moyen (m)
1	S3R0MunS	2.69	0.1	0.09
2	S3R0IciS	2.71	-0.2	0.38
3	S3R0AgrS	2.70	0	0.19
4	S3R0ResS	2.70	0	0.20

Tableau 7.13. Bilan des entrées et sorties d'eau des six simulations sans et avec exploitation.

Comparaison des bilans du scénario R0 et des scénarii avec usages individuels					
Description usage / recharge	No scénario	Recharge (mm/an)		Usage (mm/an)	
		In	Out	R0-In-Out	Scénarii origine
Sans exploitation / rapport 2021	R0	72.65	0.00	0	0
Exploitation maximale / rapport 2021	S3R0	58.81	-5.41	19.25	19.25
Exploitation réseaux municipaux / rapport 2021	S3R0MunS	70.76	-0.61	2.50	2.49
Exploitation ICI / rapport 2021	S3R0IciS	69.54	-4.11	7.22	7.20
Exploitation agricole / rapport 2021	S3R0AGRS	67.71	-0.05	4.99	4.98
Exploitation résidentielle / rapport 2021	S3R0ResS	68.11	-0.01	4.55	4.54

La figure 7.10 présente les charges simulées comparées aux charges de référence pour les quatre scénarii alors que la carte 32 présente la distribution spatiale des rabattements du niveau piézométrique causé par chaque type de prélèvement. L'effet des usages réseau se fait sentir à proximité des prélèvements de Saint-Isidore mais surtout de Saint-Rémi. Toutefois, ce sont les usages ICI (carrières et UTES) qui mènent aux rabattements les plus importants mais ils sont limités à un diamètre de l'ordre de 5 km. Les usages agricoles ont des effets limités sur les rabattements, mais il faut noter que les simulations sont en régime permanent et appliquent les prélèvements agricoles sur une base annuelle alors qu'en réalité ces prélèvements sont plutôt concentrés durant la période estivale. Enfin, les prélèvements résidentiels induisent des rabattements très limités, qui sont cependant un peu plus importants à Saint-Michel où il y a une forte densité de puits résidentiels.

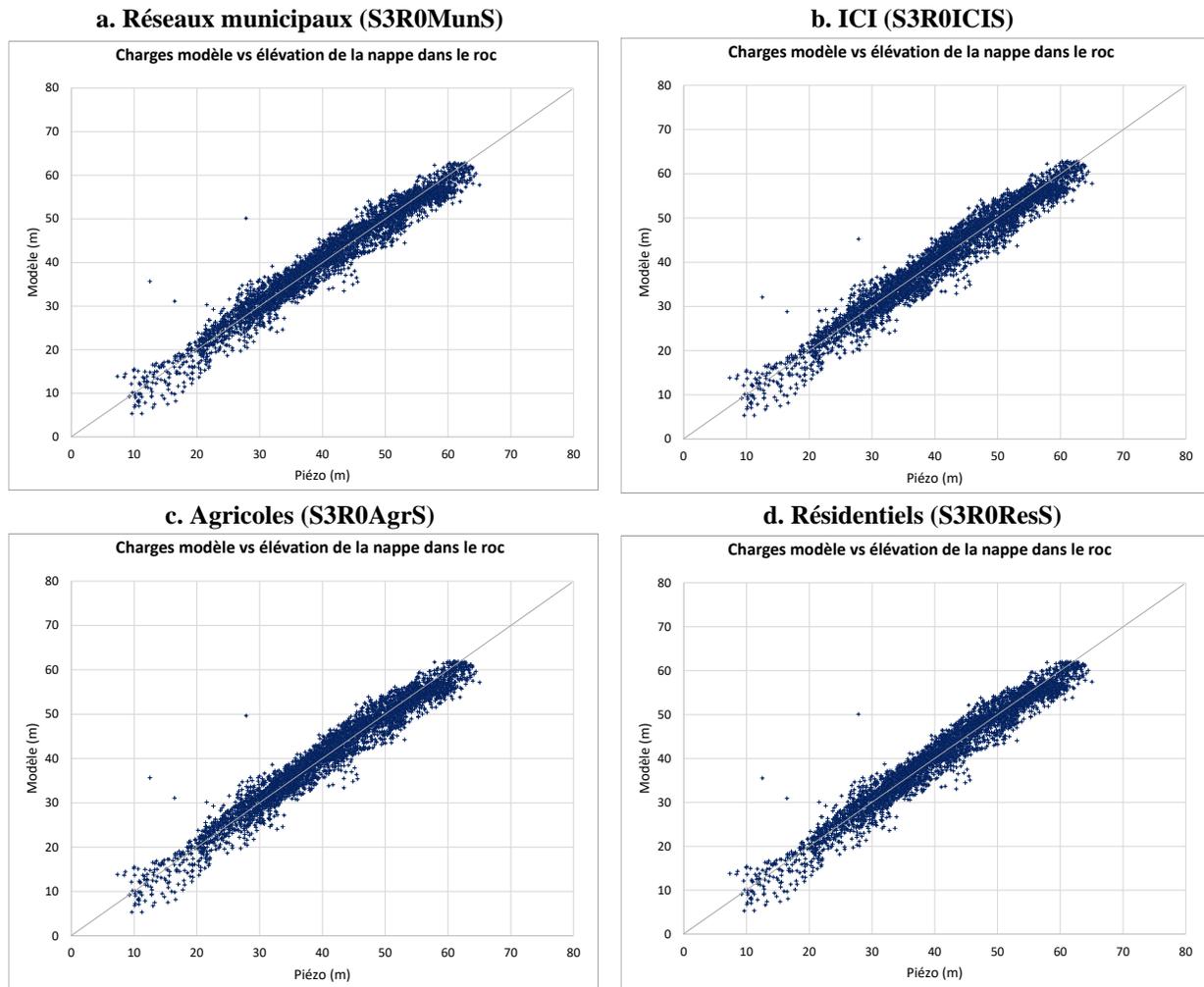


Figure 7.10. Comparaison des niveaux piézométriques des points d'observation pour les simulations avec exploitations individuelles comparés à la piézométrie interpolée.

7.9 Constats sur le modèle numérique du système aquifère

Les constats suivants sur le modèle numérique et le système aquifère découlent des travaux de modélisation :

- La conductivité hydraulique des matériaux est généralement au maximum de la plage de valeurs plausibles en comparaison avec les études antérieures. Toutefois, le modèle a pu être bien calé, d'abord en condition naturelle, sans prélèvement, en comparant les charges simulées à la topographie, et ensuite en condition présente, avec les prélèvements, en comparant les charges simulées à la surface piézométrique interpolée ;
- La figure 7.11 montre que la recharge imposée à la surface du modèle est du même ordre de grandeur que les recharges utilisées dans le cadre de travaux de modélisation antérieurs. La plage de recharge explorée dans le cadre des scénarii de modélisation couvre une grande partie de la gamme de recharges des travaux antérieurs, mais elle n'a pas atteint les valeurs maximales ni les valeurs minimales utilisées lors des anciens travaux. La qualité du calage de la recharge avec les données hydrologiques de l'estimation de la recharge faite dans le cadre de nos travaux soutient la plausibilité de cette estimation ;
- Afin d'évacuer la recharge imposée à la surface du modèle, il a été nécessaire de densifier les charges imposées aux cours d'eau à l'intérieur du domaine modélisé. La recharge de l'eau souterraine émerge dans les cours d'eau à l'intérieur du domaine modélisé mais relativement peu à sa périphérie à la rivière Châteauguay et au fleuve Saint-Laurent. Lors des simulations avec des conditions différentes de recharge ou de prélèvements, ce sont les flux vers des cours d'eau à l'intérieur du domaine qui changent alors que les flux à la périphérie demeurent à peu près constants ;
- La simulation des conditions actuelles avec la nouvelle estimation de la recharge et les prélèvements totaux ne mène qu'à des rabattements faibles de l'ordre de 1 m dans le dôme piézométrique situé à l'est de Saint-Rémi par rapport aux conditions naturelles sans prélèvement. En revanche, la simulation du scénario « pessimiste » mène à des rabattements de l'ordre de 6 m dans le dôme piézométrique, ce qui est cohérent avec la baisse du niveau des nappes mesurées par certains puits du réseau de suivi à l'ouest de Saint-Rémi (figure 2.2). Ce scénario utilise une recharge moindre estimée dans le cadre du mandat précédent (Ballard et al., 2021) et des prélèvements plus importants attendus dans un futur proche. Ces résultats pourraient indiquer qu'il y a une sous-estimation des prélèvements réels de l'eau souterraine dans la région d'étude, ou encore une surestimation de la recharge ;
- Les simulations en conditions transitoires ont montré que le système aquifère s'équilibre rapidement et que le niveau de la nappe se stabilise après environ un an lorsque le système est soumis à des prélèvements, même importants. Ce résultat indiquerait que le niveau des nappes présentement observé reflète l'actuel équilibre entre la recharge et les prélèvements dans la région d'étude. Ainsi, un changement de la recharge ou des prélèvements devrait mener à une variation rapide du niveau de la nappe.

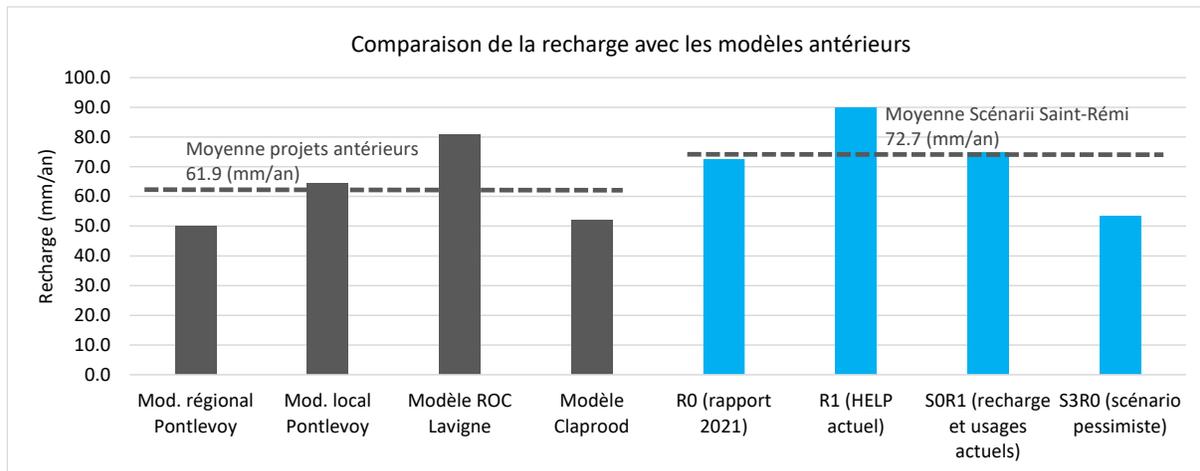


Figure 7.11. Comparaison des scénarii de recharge du modèle avec les valeurs provenant des travaux antérieurs.

8 CONCLUSIONS, LIMITATIONS ET RECOMMANDATIONS

Le présent rapport constitue la version finale de la documentation des travaux réalisés dans le cadre du mandat que le MELCC a donné à l'INRS pour la « Modélisation numérique régionale des conditions actuelles et en climat futur des ressources en eau souterraine dans la région des anciennes lagunes de Mercier ». Les travaux ont été réalisés entre décembre 2021 et juin 2022 en quatre étapes : (1) révision du modèle géologique régional ; (2) développement du modèle numérique d'écoulement régional ; (3) estimation (HELP) de la recharge actuelle et en climat futur ; et (4) application du modèle numérique à l'exploitation de l'aquifère régional. Cette section résume les principales conclusions des travaux, leurs limites et les recommandations qui en découlent.

8.1 Conclusions

C'est l'aquifère rocheux fracturé régional qui est exploité pour l'approvisionnement en eau souterraine dans la région d'étude. Une nouvelle carte piézométrique représentant le niveau de l'eau souterraine dans l'aquifère rocheux a été produite. Régionalement, la piézométrie a un gradient orienté du sud au nord, avec des niveaux élevés dans le massif montagneux des Adirondacks aux États-Unis (> 200 m/NMM) et des niveaux généralement les plus faibles qui se retrouvent en bordure du fleuve Saint-Laurent au nord (< 25 m/NMM). Au centre de la région d'étude, un dôme piézométrique est retrouvé à environ 60 m/NMM à partir duquel l'écoulement se fait radialement jusqu'à l'émergence aux cours d'eau. Régionalement, des émergences notables de l'eau souterraine se trouvent au nord du Mont Covey Hill ainsi qu'au nord du dôme piézométrique.

Les dépôts meubles sur le roc exercent un important contrôle sur la recharge de l'aquifère rocheux. De la base au sommet, la séquence de dépôts meubles est composée de till peu perméable, d'argile marine très peu perméable et d'alluvions. Localement, des sédiments fluvio-glaciaires, tel l'esker de Mercier, érodent le till et sont partiellement recouverts par l'argile. Un nouveau modèle géologique a été développé pour définir la distribution spatiale des unités de dépôts meubles sur la base de quatre modèles existants et de données de forages. Ce modèle a été utilisé pour définir la distribution des propriétés hydrauliques dans le modèle numérique d'écoulement régional.

Une nouvelle estimation de la recharge spatialement distribuée a été faite avec le modèle d'infiltration HELP pour les conditions météorologiques historiques (1981 à 2021 ; 41 ans) ainsi qu'en climat futur (2006 à 2095 ; 90 ans) sur la base de simulations climatiques obtenues d'Ouranos. L'estimation de la recharge historique faite lors du mandat précédent était de 72 mm/an dans la région d'étude, alors que la nouvelle estimation est de 90 mm/an. La recharge dans un futur proche (2041-2070) a été estimée à 115 mm/an, ce qui représente une augmentation considérable de 25 mm/an (28%). Cette nouvelle estimation de la recharge a permis une mise à jour des pressions actuelles sur l'eau souterraine (usages vs recharge) ainsi que les scénarii des pressions sur l'eau souterraine en climat futur. Ces scénarii de pressions en climat futur tiennent compte à la fois de l'évolution possible de la recharge et des prélèvements.

Le modèle conceptuel de Lavigne et al. (2010) pour l'ensemble du bassin de la rivière Châteauguay est aussi applicable au secteur couvert par le nouveau modèle hydrogéologique régional. Des conditions confinées sont présentes surtout dans la partie aval du système d'écoulement, où la topographie est plus basse et où il y a des accumulations d'argile plus épaisses. Les conditions semi-confinées sont présentes surtout aux endroits où le till est présent. L'eau souterraine est évacuée de l'aquifère par des parties de l'aquifère rocheux en contact avec les cours d'eau. Les secteurs où il n'y a pas ou peu de sédiments sur le roc permet la recharge de l'aquifère rocheux.

Le modèle numérique d'écoulement régional a donc été développé sur la base de ce modèle conceptuel. Sur le domaine modélisé d'environ 950 km², un maillage numérique a été appliqué avec 73 907 éléments triangulaires prismatiques par couche, soit un total de 2 586 745 éléments pour les 35 couches du modèle numérique 3D. Le maillage a été générée de façon à reproduire cinq unités hydrostratigraphiques, soit le roc et les quatre unités de dépôts meubles au-dessus du roc (till, fluvio-glaciaire, argile, sédiments sur l'argile). La surface du modèle suit la topographie alors que la base est plane et fixée à -300 m d'élévation. La périphérie du modèle suit presque partout des cours d'eau où des charges hydrauliques ont été imposées. Des charges ont aussi été imposées sur les cours d'eau permanents et certaines parties de cours d'eau intermittents à l'intérieur du domaine modélisé. La recharge effective au roc a été appliquée à la surface du modèle en soustrayant de la recharge totale les usages de l'eau souterraine spatialement distribués (résidentiel, agricole, industriel-commercial-institutionnel, municipal).

Le calage du modèle a été fait (1) en comparant les charges simulées en condition naturelles (sans prélèvement) à la topographie et (2) en comparant les charges simulées en considérant les prélèvements à la carte piézométrique. Cette simulation avec les usages actuels de l'eau souterraine (S0) et la nouvelle estimation de la recharge (R1) constitue le « cas de base » (S0R1) auquel les autres simulations ont été comparées. Ce cas de base ne mène pas à des rabattements importants du niveau régional de la nappe dans l'aquifère rocheux par rapport aux conditions naturelles ; les rabattements étant généralement inférieurs à 1 m. La recharge totale moyenne du cas de base est de 90 mm/an et la recharge effective moyenne considérant tous les types de prélèvements est de 75 mm/an.

À l'aide du modèle calé, le programme de simulation a considéré trois scénarii de pressions sur l'eau souterraine en climat futur avec différentes valeurs de l'usage de l'eau souterraine et de recharge. Un scénario « pessimiste » (S3R0) a considéré que la recharge en climat futur serait plus basse que la nouvelle estimation de la recharge historique et correspondrait plutôt à la recharge estimée dans le cadre de nos travaux précédents (R0 ; 73 mm/an), mais que les usages vont augmenter de 38% en climat futur (S3), ce qui mène à une recharge effective moyenne de 53 mm/an. Ce scénario est vraiment pessimiste car il ne considère aucune augmentation de la recharge en climat futur mais présume aussi que la recharge en conditions historiques est moindre que ce qui a été estimé dans le cadre du présent mandat. Un scénario « intermédiaire » considère la même augmentation des usages (S3) mais aussi une augmentation de la recharge telle qu'estimée pour le futur proche (R3 ; 115 mm/an), ce qui mène globalement au même niveau de stress sur l'eau souterraine par rapport à la recharge en climat futur qu'actuellement et même à une augmentation considérable de la recharge effective (96 mm/an). Enfin, un scénario « optimiste » considère le maintien des usages à leur niveau actuel (S0) et une augmentation de la recharge en climat futur (R3 ; 115 mm/an), ce qui mène à une recharge effective moyenne (100 mm/an) qui dépasse encore plus le niveau historique.

Les scénarii intermédiaire et optimiste mènent à de légères augmentations du niveau de la nappe régionale au roc par rapport aux conditions actuelles, alors que le scénario pessimiste mène à des rabattements de l'ordre de 6 ou 7 m dans le dôme piézométrique en comparaison avec les conditions naturelles sans pompage. Ce rabattement est du même ordre que la baisse observée par le puits du RSESQ à l'ouest de Saint-Rémi depuis les années 1980. Dans les conditions du scénario pessimiste, les pompes résidentiels induisent des rabattements inférieurs à 1 m. Les pompes industriels (carrières et UTES) induisent des rabattements allant jusqu'à plus de 6 m localement mais les rabattements de plus de 1 m sont restreints à un diamètre de l'ordre de 5 km. Ces rabattements sont dans les parties en aval du système d'écoulement (ouest, nord-est et sud). Les captages municipaux de Saint-Isidore et surtout de Saint-Rémi induisent des rabattements moindres, de 1 à 3 m, et qui sont

présents à l'ouest et au centre de la région sur des diamètres aussi de l'ordre de 5 km. Les prélèvements agricoles induisent des rabattements sur une plus grande étendue au centre et au sud de la région, mais avec des valeurs de l'ordre de moins de 1 m. Il faut toutefois noter que le modèle ne considère que l'effet spatialement distribué des usages agricoles annuels et non pas les puits d'approvisionnement ponctuels alors qu'en fait ces usages sont importants surtout en période estivale. Des simulations du cas de base et du scénario pessimiste ont été réalisées en régime transitoire en appliquant les prélèvements à partir des conditions naturelles sans prélèvement. Les simulations suggèrent qu'il y aurait atteinte d'un nouvel équilibre hydraulique menant à des niveaux de nappe à peu près stables en seulement une année.

Les travaux réalisés dans le cadre de ce mandat ont mené à une meilleure compréhension du système aquifère. L'aquifère rocheux s'avère assez productif, sauf possiblement au nord de la région où on retrouve des unités géologiques de shale. La recharge de la nappe dans l'aquifère rocheux est modérée à cause de la couverture de till au-dessus du roc dans le centre de la région, alors que la recharge est très limitée à la périphérie où on retrouve une couverture d'argile. La topographie et la piézométrie montrent un dôme au centre de la région d'étude, ce qui implique un écoulement radial vers les cours d'eau en périphérie. Ainsi, il n'y a pas d'apport d'eau souterraine provenant de l'extérieur de la région d'étude et seule la recharge à l'intérieur la région renouvelle la nappe. Nos travaux montrent qu'il pourrait y avoir une augmentation substantielle de la recharge en climat futur. Ainsi, même avec des prélèvements beaucoup plus importants, les pressions déjà très fortes sur l'eau souterraine n'augmenteraient pas dans le futur. Toutefois, le système aquifère étant très réactif, la variabilité interannuelle des précipitations et de la recharge pourrait mener à des variations importantes du niveau de la nappe, particulièrement dans le dôme piézométrique au centre de la région.

Les conditions régionales de recharge et de prélèvements pourraient avoir une incidence sur les flux d'eau souterraine vers l'UTES aux anciennes lagunes de Mercier. Toutefois, ce site étant situé dans un secteur en aval du système d'écoulement, il est moins sujet à des variations du niveau des nappes causé par les changements en amont. En revanche, l'esker de Mercier est une zone de recharge préférentielle importante et la variabilité potentielle des conditions climatiques futures pourrait y induire de fortes variations interannuelles de la recharge. L'UTES représente aussi régionalement un important site de prélèvement d'eau souterraine. Actuellement, toute cette eau souterraine prélevée pour maintenir le piège hydraulique est traitée puis déversée en surface. Considérant les fortes pressions sur l'eau souterraine dans la région et l'apport de l'UTES à ces pressions, il apparaît souhaitable que le nouveau système de confinement de l'UTES permette la récupération d'une partie de l'eau prélevée pour maintenir le piège hydraulique. L'utilisation de cette eau récupérée devra donc considérer les besoins en eau souterraine à l'échelle régionale.

8.2 Limitations

Malgré les avancées faites au niveau de la compréhension du système d'écoulement, les travaux réalisés comportent des limitations et des incertitudes. D'abord, bien que le calage de la recharge historique soit très bon, une incertitude demeure sur l'estimation de la recharge en climat futur. En effet, les résultats en climat futur impliquent une modification des processus hydrologiques, particulièrement la réduction du ruissellement printanier.

Ensuite, il y a une incertitude sur l'estimation des usages de l'eau souterraine et le niveau de stress réel sur les ressources en eau souterraine, notamment en relation avec les usages agricoles. Nos travaux ont montré que le niveau de pression permettant de reproduire la baisse observée du niveau de la nappe serait plus important que ce qui a été estimé selon les résultats de la modélisation. Ceci

est en accord avec les débits des puits agricoles beaucoup plus importants qui ont été utilisés par Pontlevoy (2004) et Technorem (2008) par rapport à ce que notre modèle a utilisé.

8.3 Recommandations

Ainsi, à la suite de ces résultats, constats et incertitudes, nous formulons des recommandations par rapport au mandat qui nous a été confié. D'abord, il faut souligner l'importance cruciale du maintien du suivi de nappe en considération des incertitudes décrites précédemment. Il est en effet encore plus important de maintenir et même d'améliorer ce suivi car l'évolution de la recharge en climat futur est reliée à un changement anticipé de processus hydrologiques (moins de ruissellement printanier) et que le niveau des pressions sur l'eau souterraine pourrait être plus important qu'estimé. Ce suivi est nécessaire pour mieux évaluer et comprendre les effets combinés de la recharge et des usages de l'eau souterraine en climat futur. Nous recommandons de mettre en place un à trois puits supplémentaires du RSESQ au droit du dôme piézométrique (carte 7), soit à l'est, au sud-est et au sud de Saint-Rémi. Il faudrait éviter le plus possible le « bruit » des grands préleveurs (être à distance de puits municipaux, industriels et si possible de puits d'irrigation). L'aquifère d'intérêt étant le roc, l'installation des puits devrait se faire dans le roc en s'assurant de l'isolation du roc par rapport aux dépôts meubles sus-jacents. Si un tel suivi n'est pas encore en fonction, il serait aussi souhaitable qu'un suivi de nappe soit initié pour les principaux captages municipaux (Saint-Isidore et Saint-Rémi) et que ces données soient analysées en relation avec les données des puits du RSESQ. Enfin, au niveau du suivi, il est recommandé au MELCC d'assurer un arrimage du suivi national du RSESQ avec le suivi régional que la SCABRIC prévoit de mettre en place en relation avec leur projet visant le changement des pratiques d'irrigation.

Considérant l'incertitude sur l'estimation de la recharge en climat futur, des travaux plus détaillés seraient requis pour vérifier d'abord s'il y a bien une constance de certaines conditions, tel que présumé pour l'estimation HELP (saison de culture, occupation du sol, types de culture). Ensuite, il faudrait mieux évaluer l'effet des redoux hivernaux, d'un gel du sol moins important et d'une fonte plus hâtive du couvert réduit de neige sur le ruissellement et l'infiltration d'eau dans le sol et la recharge de la nappe.

L'une des plus importantes incertitudes de nos travaux est reliée à l'estimation des usages de l'eau souterraine, particulièrement les usages agricoles. Il serait important de faire une évaluation plus précise des usages actuels mais aussi de mieux préciser l'évolution future des usages municipaux, résidentiels (avec puits privés), industriels et agricoles.

Enfin, pour mettre en perspective le rôle du nouveau piège hydraulique de l'UTES dans la disponibilité de l'eau souterraine dans la région, il faudrait effectuer un inventaire du potentiel des mesures de mitigation ou des sources d'approvisionnement alternatives qui pourraient s'appliquer aux différents usages de l'eau souterraine. Une telle étude permettrait aussi de soutenir les choix des acteurs de l'eau régionaux visant à assurer l'exploitation durable de la ressource en eau souterraine.

Les travaux ont permis de définir le contexte de l'exploitation régionale des ressources en eau souterraine dans les conditions présentes et en climat futur. Les résultats devraient donc soutenir le choix de la nouvelle technologie de contrôle hydraulique à l'UTES aux anciennes lagunes de Mercier. Les résultats pourraient aussi servir de base à une gestion active et participative des ressources en eau souterraine qui sont soumises à d'importantes pressions dans la région d'étude.

9 RÉFÉRENCES

- Ageco, 2019. Recherche participative d'alternatives durables pour la gestion de l'eau en milieu agricole dans un contexte de changement climatique (RADEAU 1). Rapport final, présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), juin 2019, 271 p.
- Anctil, F., Rousselle, J., Lauzon, N., 2012. Hydrologie: Cheminements de l'eau. Presses internationales Polytechnique, 2^e éd. 391 p.
- Audet, G., Lapointe, M.-C., Boothroyd, K., De Mello, J., Jeanneau, S., Blackburn, F., 2015. Portrait de la Zone Châteauguay. SCABRIC, Saint-Chrysostome (Québec), 192 p. et annexes, ISBN 978-2-9815404-0-9 (pdf).
- Ballard, J.-M., Huchet, F., Raynauld, M., Gosselin, J.-S., Lefebvre, R., 2021. Réalisation de travaux de caractérisation complémentaire pour la modélisation de l'écoulement des eaux souterraines à Mercier : conditions des ressources en eau souterraine dans la région et en amont des anciennes lagunes de Mercier – Rapport final. Rapport de recherche R2033, Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau Terre Environnement, 88 p., Avril 2021.
- Ballard, J.-M., Huchet, F., Lefebvre, R., 2022. Modélisation numérique régionale des conditions actuelles et en climat futur des ressources en eau souterraine dans la région des anciennes lagunes de Mercier – Rapport intérimaire #1. Rapport de recherche R2082, Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau Terre Environnement, 200 p., janvier 2022.
- Benhamanne, S., 2002. Évaluation des différentes méthodes de séparation d'hydrogrammes pour évaluer les impacts potentiels des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine dans l'est du Canada. Rapport de stage, Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, Canada. 39 p.
- Bergeron, O., 2017. Grilles climatiques quotidiennes du Réseau de surveillance du climat du Québec, Version 2 - Guide d'utilisation. Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction de l'information sur le milieu atmosphérique, ISBN 978-2-550-77885-1 (PDF), 27 p.
- Blanchette, D., 2006. Caractérisation géochimique des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Châteauguay, Québec, Canada. Mémoire de maîtrise, INRS, Québec, Septembre 2006.
- Blanchette, D., Lefebvre, R., Nastev, M., Cloutier, V., 2010. Groundwater quality, geochemical processes and groundwater evolution in the Chateauguay River watershed, Quebec, Canada. *Canadian Water Resources Journal*, 35(4), 503-526.
- Carrier, M.-A., Lefebvre, R., Rivard, C., Parent, M., Ballard, J.-M., Benoit, N., Vigneault, H., Beaudry, C., Malet, X., Laurencelle, M., Gosselin, J.-S., Ladevèze, P., Thériault, R., Beaudin, I., Michaud, A., Pugin, A., Morin, R., Crow, H., Gloaguen, E., Bleser, J., Martin, A., Lavoie, D., 2013. Portrait des ressources en eau souterraine en Montérégie Est, Québec, Canada. Projet réalisé conjointement par l'INRS, la CGC, l'OBV Yamaska et l'IRDA dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines, Rapport final INRS R-1433, version finale soumise en juin 2013 au MDDEFP et aux partenaires régionaux, 283 p., annexes, incluant 29 cartes et base de données.

- Chapman, T.G., Maxwell, A.I., 1996. Baseflow separation – comparison of numerical methods with tracer experiments. Institute of Engineers Australia National Conference, Publ. 96/05, 539-545.
- Claproud, M., Béraud T., Gloaguen E., Martel R., 2021. Rapport du modèle d'écoulement déterministe. Projet UTES-II Ville Mercier, rapport intérimaire soumis au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 36 p.
- Côté, M.-J., Lachance, Y., Lamontagne, C., Nastev, M., Plamondon, R., Roy, N., 2006. Atlas du bassin versant de la rivière Châteauguay. Collaboration étroite avec la Commission géologique du Canada et l'Institut national de la recherche scientifique - Eau, Terre et Environnement. Québec : ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. 64 p.
- Croteau, A., 2006. Détermination de la distribution spatiale et temporelle de la recharge à l'aquifère régional transfrontalier du bassin versant de la rivière Châteauguay, Québec et États-Unis. Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Maîtrise en sciences de la terre, 345 p.
- Croteau, A., Nastev, M., Lefebvre, R., 2010. Groundwater recharge assessment in the Chateauguay River watershed. *Canadian Water Resources Journal*, 35(4), 451-468.
- DHI-WASY Software, 2013. FEFLOW 6.2 – Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System – User Manual. DHI-WASY GmbH Berlin, 201 p., www.feflow.com.
- Dubois, E., Larocque, M., Gagné, S., Braun, M., 2022. Climate Change Impacts on Groundwater Recharge in Cold and Humid Climates: Controlling Processes and Thresholds. *Climate*, 10(1), 6.
- Eckhardt, K., 2005. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrology Processes* 19(2), 507-515.
- Fernandes, R.A., Sun, L., 2021. LEAF-Toolbox-Canada Repository. Government of Canada. available at <https://github.com/rfernand387/LEAF-Toolbox-Canada>.
- Gagné, G., Beaudin, I., Leblanc, M., Drouin, A., Veilleux, G., Sylvain, J.-D., Michaud, A.-R., 2013. Classement des séries de sols minéraux du Québec selon les groupes hydrologiques. Rapport final. IRDA, Québec, Canada. 81 p.
- Gosselin, J.-S., 2016. Estimation de la recharge à partir de séries temporelles de la température du sol, des niveaux d'eau dans les puits et de données météorologiques: développement méthodologique et évaluation de l'incertitude. Thèse de doctorat, Institut national de la recherche scientifique, Université du Québec, Québec (<http://espace.inrs.ca/5122/>).
- Gosselin, J.-S., Lefebvre, R., Martel, R., Rivard, C., 2017. GWHAT: Documentation - Release 0.2.0. Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau Terre Environnement, Québec, Canada, 33 p.
- Gosselin, J.-S., Raynauld, M., Huchet, F., Lefebvre, R., 2019. PyHELP: An open source Python library to estimate spatially distributed groundwater recharge with the HELP infiltration model. Québec 2019, GAC-MAC-AIH/CNC Joint Meeting, May 12-15, 2019, Quebec City, Canada.
- Gustard, A., Bullock, A., Dixon, J., 1992. Low flow estimation in the United Kingdom. Institute of Hydrology, Wallingford, UK. 292 p.

- Healy, R.W., 2010. Estimating groundwater recharge. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 245 p.
- Huchet, F., 2018. Caractérisation hydrogéologique et modélisation du système d'écoulement au-dessus de champs gaziers, sous-bassin de Moncton, sud du Nouveau-Brunswick. Mémoire, Québec, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Maîtrise en sciences de la terre, 556 p.
- Huchet, F., Raynauld, M., Domaine, J., Lefebvre, R., 2021. Outil de support à l'analyse des demandes d'autorisation de prélèvement d'eau – développement d'une méthodologie pour déterminer les pressions sur les ressources en eau souterraine et les zones de gestion particulière - Rapport de la phase 2. Rapport de recherche R2008, soumis au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) en février 2021, 118 p. et annexes.
- Lanini, S., 2020. Manuel utilisateur ESPERE version 2. Rapport BRGM/RP-69538-FR, 27 p., 14 Ill., 2 Annexes.
- 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.
- Laurencelle, M., 2018. Propriétés hydrauliques et processus d'invasion par la Mer de Champlain du système aquifère rocheux fracturé régional de la Montérégie Est, Québec, Canada. Thèse de doctorat, INRS, Centre Eau Terre Environnement, 335 p. et annexes.
- Lavigne, M.-A., Nastev, M., Lefebvre, R., Blanchette, A., Croteau, A., Benoit, N., Lamontagne, C., 2005. Hydraulic properties of sedimentary rock aquifers in the Chateauguay River watershed, Quebec, Canada. Proceedings, 58th Canadian Geotechnical Conference and 6th Joint CGS/IAH Conference, Saskatoon, Canada, October 2005, Session 3E, Paper 550, 8 p.
- Lavigne, M.-A., 2006. Modélisations numériques de l'écoulement régional de l'eau souterraine dans le bassin versant de la rivière Châteauguay. Mémoire de maîtrise, INRS, Québec, Juin 2006.
- Lavigne, M.-A., Nastev, M., Lefebvre, R., 2010. Numerical simulation of groundwater flow in the Chateauguay River aquifers. *Canadian Water Resources Journal*, 35(4), 469-486.
- Lefebvre, R., 2007. Contexte hydrogéologique et potentiel de réhabilitation du site des anciennes lagunes de Ville Mercier, Québec, Canada. INRS-Eau, Terre et Environnement, Rapport R-914, Rapport d'expertise soumis à la Direction des politiques de l'eau, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Mars 2007, 58 p.
- Lefebvre, R., Ballard, J.-M., Carrier, M.-A., Vigneault, H., Beaudry, C., Berthot, L., Légaré-Couture, G., Parent, M., Laurencelle, M., Malet, X., Therrien, A., Michaud, A., Desjardins, J., Drouin, A., Cloutier, M.H., Grenier, J., Bourgault, M.-A., Larocque, M., Pellerin, S., Graveline, M.-H., Janos, D., Molson, J., 2015. Portrait des ressources en eau souterraine en Chaudière-Appalaches, Québec, Canada. Projet réalisé conjointement par l'INRS, l'IRDA et le Regroupement des organismes de bassins versants de la Chaudière-Appalaches (OBV-CA) dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES), Rapport final INRS R1580, soumis au MDDELCC en mars 2015, 246 p. et annexes.

- Martel, R., Robert, T., Batailler, É., Boutin, M., Deschênes-Rancourt, C., Trépanier, L., 2018. Revue de littérature sur les technologies de réhabilitation des sols et des eaux souterraines et réévaluation du potentiel de réhabilitation du site contaminé des anciennes lagunes de Mercier. INRS, Centre Eau Terre Environnement, Rapport de recherche R1783 soumis au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 17 octobre 2018, 68 p.
- Monfet, J., 1979 Évaluation du coefficient de ruissellement à l'aide de la méthode SCS modifiée. Gouvernement du Québec, Ministère des Richesses naturelles, Service de l'hydrométrie, Québec, QC. 35 p.
- Nastev, M., Parent, M., Ross, M., Howlett, D., Benoit, N., 2016a. Geospatial modelling of shear-wave velocity and fundamental site period of Quaternary marine and glacial sediments in the Ottawa and St. Lawrence Valleys, Canada. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 85 (2016) 103-116.
- Nastev, M., Parent, M., Benoit, N., Ross, M., Howlett, D., 2016b. Regional VS30 model for the St. Lawrence Lowlands, Eastern Canada. *GEORISK*, 13 p.
- Paradis, D., Gloaguen, E., 2021. Mesures et analyses des essais hydrauliques aux lagunes de Mercier (Québec) - Rapport final. Rapport soumis au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, octobre 2021, 19 p.
- Parent, M., Girard, F., Fagnan, N., Michaud, Y., Boisvert, É., Fortier, R., 2008. Chapitre 4 – Caractérisation géologique des formations superficielles enfouies. Dans, Michaud, Y., Lefebvre, R., McCormack, R., éd. *Guide méthodologique pour la cartographie hydrogéologique régionale des aquifères granulaires*. Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, ISBN 978-2-550-51189-2 (pdf), p. 23-40.
- Parent, M., Lamothe, M., Dubé-Loubert, H. (red.), 2017. Surficial geology, Basses-Terres centrales du Saint-Laurent et régions adjacentes (Québec–Montréal–Ottawa), Quebec and Ontario. Geological Survey of Canada, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec, scale 1:400 000.
- Pontlevoy, O., Lefebvre, R., Therrien, R., Martel, R., Ouellet, M., Lamontagne, C., 2002. Regional groundwater modeling to support aquifer system management in the Ville Mercier area, Quebec, Canada. Proceedings, *3rd Joint IAHC-CNC and CGS Groundwater Specialty Conference*, 55th Canadian Geotechnical Conference, October 20-23, Niagara Falls, Canada, 1151-1158.
- Pontlevoy, O., 2004. Modélisation hydrogéologique pour supporter la gestion du système aquifère de la région de Ville-Mercier. Mémoire de maîtrise, INRS, Québec, Avril 2004.
- Racine, C., 2005. Étude des alternatives de contrôle des panaches d'eau souterraine contaminée par des liquides immiscibles denses et légers, Ville-Mercier, Québec, Canada. Mémoire de maîtrise, INRS, Québec, Mars 2005.
- Raynauld, M., Lefebvre, R., Gosselin, J.-S., 2018. Estimation de la recharge avec le modèle d'infiltration HELP pour les régions de Laval et des Laurentides. Rapport de recherche R-1799, travaux réalisés dans le cadre du projet RADEAU 2, soumis à Ageco en septembre 2018.
- Remy, N., Boucher, A., Wu, J., 2009. Applied geostatistics with SGeMS: a user's guide. Cambridge University Press.

- Rivard, C., Lefebvre, R., Paradis, D., 2014. Regional recharge estimation using multiple methods: an application in the Annapolis Valley, Nova Scotia (Canada). *Environmental Earth Sciences* 71(3):1389-1408.
- Schroeder, P.R., Dozier, T.S., Zappi, P.A., McEnroe, B.M., Sjostrom, J.W., Peyton, R.L., 1994. The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model: Engineering documentation for version 3. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, 116 pp.
- Technorem, 2008a. Étude hydrogéologique régionale dans la zone de production maraîchère des bassins versants des rivières Norton, Esturgeon, Saint-Pierre et de la Tortue – Montérégie. Rapport final PR06-50, Programme d’approvisionnement en eau Canada-Québec, No de projet CDAQ 5074, 177 p. et annexes.
- Technorem, 2008b. Étude hydrogéologique régionale dans la zone de production maraîchère des bassins versants des rivières l’Acadie et de la Tortue – Montérégie. Rapport final PR06-49, Programme d’approvisionnement en eau Canada-Québec, No de projet CDAQ 5073, 177 p. et annexes.
- Tremblay, T., Lamothe, M., 2005. Géologie des formations superficielles du bassin-versant de la Rivière Châteauguay. Rapport géologique soumis au Ministère de l’Environnement du Québec, Université du Québec à Montréal, Montréal, 95 p.
- Tremblay, T., 2008. Hydrostratigraphie et géologie du Quaternaire dans le bassin versant de la rivière Châteauguay, Québec. Mémoire de maîtrise en sciences, Université du Québec à Montréal.
- Tremblay, T., Nastev, M., Lamothe, M., 2010. Grid-based hydrostratigraphic 3D modelling of the Quaternary sequence in the Chateauguay River watershed, Quebec. *Canadian Water Resources Journal*, 35 (4), 377-398.