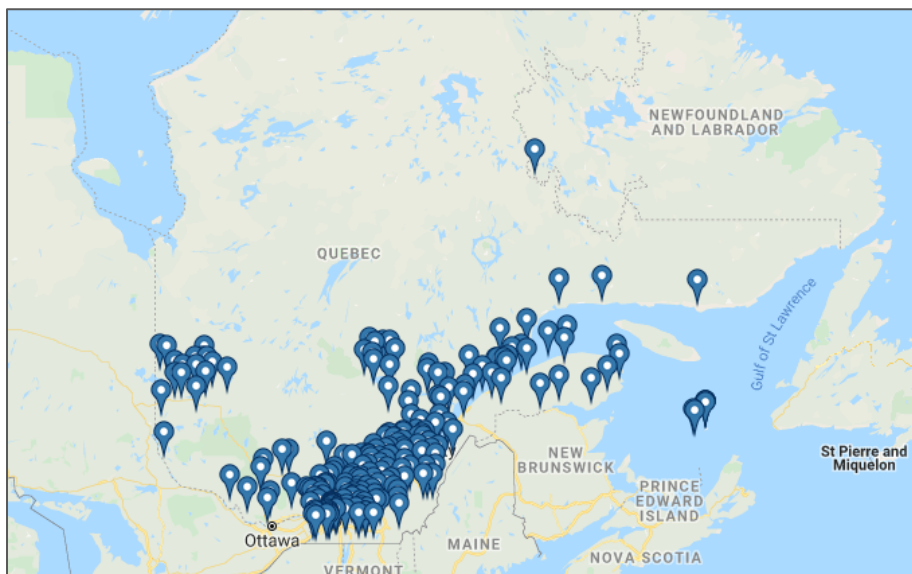


RAPPORT FINAL

Développement de méthodologies d'analyse des données du Réseau
de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ)

Jean-Sébastien Gosselin, René Lefebvre, Harold Vigneault,
François Huchet et Mélanie Raynaud



Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau Terre Environnement

Rapport de recherche R1942
Décembre 2020

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

ISBN : 978-2-89146-940-1 (version électronique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2021
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2021

RÉSUMÉ

Ce rapport documente les travaux réalisés dans le cadre du mandat donné à l'INRS par le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) pour le « *Développement de méthodologies d'analyse des données du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ), incluant les processus pour leur intégration à ses opérations, afin de soutenir la prise de décision en gestion de l'exploitation des eaux souterraines notamment par l'évaluation de leur recharge aux stations du RSESQ* ».

Le rapport brosse d'abord un portrait des processus et des outils présentement utilisés par le MELCC pour l'acquisition, le traitement, le stockage et la publication des données du RSESQ. À partir de ce portrait, plusieurs méthodologies ont été développées et des recommandations sont formulées pour améliorer la capacité du Ministère à mieux exploiter, gérer et diffuser les données du RSESQ.

Nous recommandons d'abord au MELCC de compléter l'information retrouvée dans les infobulles des puits du RSESQ qui sont affichées sur le site Internet du MELCC avec des données qui pourraient être produites rapidement et facilement à partir de l'actuelle base de données du réseau. Nous proposons ensuite la production d'une fiche signalétique pour chacun des puits du RSESQ. Cette fiche permettrait de mieux caractériser le système aquifère observé par la station, de diffuser des informations détaillées sur le contexte local des puits et de mieux valoriser et exploiter les données de niveau d'eau mesurées dans les puits (évaluation de la recharge, suivi de tendances, etc.). Nous formulons aussi des recommandations pour la mise à jour du système actuel de stockage et de gestion des données du RSESQ et nous faisons des suggestions pour améliorer les processus de validation et de correction des données. Nous identifions ensuite les données météorologiques qui devraient être diffusées conjointement aux données piézométriques des stations du RSESQ et des approches sont recommandées pour représenter graphiquement ces données avec les mesures de niveau d'eau. Nous proposons aussi une méthodologie pour la production d'hydrogrammes statistiques pour représenter les variations historiques des niveaux d'eau des stations du RSESQ par rapport aux niveaux actuels. Nous proposons ensuite des améliorations à apporter au format des hydrogrammes des stations du RSESQ publiés sur le site Internet du MELCC. Nous expliquons aussi une méthodologie applicable à chacune des stations du RSESQ pour produire la fonction de réponse barométrique et effectuer la correction barométrique des niveaux d'eau. Des recommandations sont faites pour incorporer cette méthodologie aux opérations de gestion du RSESQ. Enfin, une méthodologie est présentée pour évaluer l'historique de la recharge des eaux souterraines à chacune des stations du RSESQ où elle peut être évaluée. Des recommandations sont faites sur l'approche permettant de faire cette application et de diffuser les résultats dans le cadre des opérations de gestion du RSESQ. Trois méthodologies ont été développées pour anticiper les variations de la recharge des eaux souterraines en climat futur à chacune des stations du RSESQ où la recharge peut être estimée. Des discussions avec le MELCC sont requises pour identifier l'approche à privilégier pour intégrer cette application aux opérations de gestion du RSESQ et aussi pour faire la diffusion des résultats dans l'Atlas hydroclimatique.

Une synthèse a été faite sur l'ensemble des informations et des idées qui ont été produites en relation avec le RSESQ par les trois projets de recherche réalisés dans le cadre de la priorité 30.3.2 du PACC 2013-2020. Sur cette base, des suggestions sont faites pour améliorer la gestion, l'exploitation et la publication des données du RSESQ.

Enfin, la faisabilité de plusieurs des recommandations formulées dans ce rapport a été démontrée par différentes preuves de concept fonctionnelles. Afin de produire ces preuves de concept, une nouvelle structure a été développée pour stocker les données du RSESQ et des outils informatiques ont été produits pour assumer toutes les présentes fonctions de gestion, représentation graphique et publication des données du RSESQ. Ces outils ont été remis au Ministère avec le présent rapport final de ce projet.

TABLE DES MATIÈRES

1	Contexte	8
2	Mandat	9
3	Situation actuelle du RSESQ.....	11
4	Fiches signalétiques.....	13
4.1	Infobulles de la carte Google du site Internet du Ministère	13
4.2	Fiches signalétiques des puits	14
4.3	Format proposé pour les fiches signalétiques des puits	16
5	Validation et correction des données piézométriques	19
5.1	Stockage des données piézométriques	19
5.2	Validation et correction des données actuelles du RSESQ	20
5.2.1	Heure de référence des niveaux d'eau	20
5.2.2	Doublons dans la table lecture	21
5.2.3	Erreurs dans la table d'installation des sondes	22
5.2.4	Erreurs dans la table d'inventaires de sondes	22
5.2.5	Erreurs dans la table de mesures manuelles.....	23
5.3	Outils pour la gestion et la consultation des données du RSESQ	23
5.4	Mise à jour, validation et correction des données de niveaux d'eau	23
5.5	Preuves de concepts	30
6	Données météorologiques	31
7	Hydrogrammes statistiques.....	35
8	Hydrogrammes des stations du RSESQ.....	38
9	Réponse barométrique et correction des niveaux piézométriques	43
9.1	Méthodologie pour la correction barométrique des niveaux piézométriques	44
9.1.1	Évaluation de la BRF.....	45
9.1.2	Correction barométrique des niveaux piézométriques.....	46
9.2	Outil existant pour évaluer la fonction de réponse barométrique	47
9.3	Outils existants pour la préparation des données d'entrée	48
9.4	Recommandations.....	49
10	Évaluation de l'historique de la recharge	50

10.1	Évaluation de la recharge historique locale avec GWHAT	52
10.2	Estimation de la recharge historique spatialement distribuée avec HELP	55
11	Variations de la recharge en climat futur	60
11.1	Évaluation des effets hydrologiques des changements climatiques	60
11.2	Travaux antérieurs dans l'est du Canada et au Québec.....	62
11.3	Données requises pour évaluer les effets hydrologiques des changements climatiques	62
11.4	Données disponibles sur les changements climatiques au Québec	63
11.5	Approches pour considérer les effets hydrologiques des changements climatiques.....	66
11.6	Prévision saisonnière de la recharge	68
12	SARDES, un outil de gestion du RSESQ	70
12.1	Base de données SQLite.....	70
12.2	Gestionnaire de connexion à la base de données	76
12.3	Présentation de l'outil « Tables ».....	76
12.4	Présentation de l'outil « Lectures ».....	77
12.4.1	Outil de visualisation des données de suivi	77
12.4.2	Outil d'export des données de suivi.....	79
12.5	Présentation de l'outil « Bibliothèques »	80
12.6	Présentation de l'outil de chargement des données de suivi	81
12.7	Outil pour la publication des données	82
12.8	Outil de gestion des données géochimiques.....	82
13	Synthèse des projets PACC et développement du RSESQ.....	83
13.1	Apports des projets PACC	83
13.2	Perspectives de développement du RSESQ	86
13.3	Suite des travaux	89
14	Références.....	91

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 5.1 – Identifiant des puits et date et heure pour lesquelles des données de suivi ont été saisies en double dans la base de données.....	21
Tableau 5.2 – Identifiant des puits et nombre de lectures pour lesquelles aucune installation de sonde n’est associée.	22
Tableau 8.1 - Lexique des commentaires utilisés par la Direction de l’information sur le milieu atmosphérique (DIMAT) pour qualifier le statut des données climatiques journalières lors de leur publication.....	41
Tableau 8.2 - Lexique des commentaires utilisés par la Direction de l’expertise hydrique (DEH) pour qualifier le statut des données de débits des rivières lors de leur publication.....	41
Tableau 10.1 - Données requises et résultats obtenus lors de l’estimation de la recharge avec le modèle « local » GWHAT et le modèle « régional » HELP.	51
Tableau 12.1 – Description des champs de la table « sampling_feature ».....	72
Tableau 12.2 – Description des champs de la table « sampling_feature_type ».....	72
Tableau 12.3 – Description des champs de la table « sampling_feature_metadata »	72
Tableau 12.4 – Description des champs de la table « repere »	73
Tableau 12.5 – Description des champs de la table « location»	73
Tableau 12.6 – Description des champs de la table « process»	73
Tableau 12.7 – Description des champs de la table « sonde_installation»	73
Tableau 12.8 – Description des champs de la table « sonde_feature».....	74
Tableau 12.9 – Description des champs de la table « sonde_model »	74
Tableau 12.10 – Description des champs de la table « observation ».....	74
Tableau 12.11 – Description des champs de la table « observation_type ».....	75
Tableau 12.12 – Description des champs de la table « generic_numerical_data ».....	75
Tableau 12.13 – Description des champs de la table « timeseries_channel ».....	75
Tableau 12.14 – Description des champs de la table « timeseries_data »	75
Tableau 12.15 – Description des champs de la table « observed_property »	75
Tableau 13.1 – Fonctions ou applications actuelles et futures du RSESQ.	87

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 - Schéma fonctionnel du système d'outils informatiques actuellement utilisé pour supporter chacune des étapes de gestion du RSESQ.	12
Figure 3.2 - Aperçu de la carte des puits du RSESQ sur la page d'accueil du MELCC (http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/piezo/index.htm).	12
Figure 4.1 – Exemple de carte montrant les conditions autour des puits du RSESQ : paramètre « pente » du puits de Brome, région du PACES Montérégie Est.	15
Figure 4.2 – Suggestion de contenu des fiches signalétiques des puits du RSESQ (voir le texte pour les explications).	17
Figure 4.3 – Exemple de cartes illustrant le contexte des puits du RSESQ (partie F de la fiche signalétique montrée à la figure 4.2).	18
Figure 5.1 - Configuration des instruments pour le suivi du niveau d'eau des puits du RSESQ. Les profondeurs (Z) sont exprimées en mètres avec l'axe des Z positif vers le bas.	24
Figure 5.2 – Données de niveaux d'eau mesurées dans le puits 05080001 du RSESQ à Pont-Rouge entre 2006 et 2007. Les cercles rouges A à D inclusivement soulignent des discontinuités dans les niveaux d'eau mesurés dans le puits alors que le cercle rouge E montre une valeur aberrante.	27
Figure 5.3 - Données de niveaux d'eau mesurées dans le puits 03090007 du RSESQ à Havelock montrant plusieurs valeurs aberrantes (dans l'encadré rouge) dans les données pour la période 2011-2012. ...	28
Figure 5.4 - Données de niveaux d'eau mesurées dans le puits 02180001 du RSESQ à Padoue montrant dans l'encadré rouge des données aberrantes de niveau d'eau dues à l'inondation de la sonde barométrique dans le puits à plusieurs reprises durant cette période.	28
Figure 5.5 - Données de niveaux d'eau mesurées dans le puits 02000009 du RSESQ à Notre-Dame-des-Neiges montrant dans l'encadré rouge des variations du niveau d'eau dans le puits causées par des activités anthropiques saisonnières de pompage à proximité du puits.	29
Figure 6.1 - Nombre de stations piézométriques du RSESQ en fonction de la distance aux stations climatiques les plus proches pour lesquelles des données sont disponibles sur le site Internet d'Environnement Canada (en bleu) et en fonction de la distance aux stations hydrométriques les plus proches du CEHQ (en jaune).	31
Figure 6.2 - Hydrogramme pour la station 05040001 du RSESQ situé à Saint-Léonard-de-Portneuf. Les données météo extraites de la grille climatique quotidienne du RSCQ au point le plus près de la localisation du puits sont aussi affichées sur le graphique sur une base hebdomadaire.	33
Figure 7.1 - Exemple (a) d'un tableau des valeurs numériques et (b) d'un hydrogramme statistique de la distribution mensuelle des niveaux piézométriques mesurés dans une des stations du réseau de suivi de l'USGS tel que publié sur le site Internet de l'USGS (U.S. Geological Survey 2007).	36
Figure 7.2 - Hydrogrammes statistiques produits pour l'année 2016 pour la station 0216001 du RSESQ située à Matane avec (a) la méthode des niveaux mensuels moyens utilisée par l'USGS et (b) en utilisant toutes les données disponibles pour chaque mois de l'année.	36
Figure 7.3 - Hydrogramme statistique produit pour l'année 2016 pour la station 0216001 du RSESQ situé à Matane avec la méthode des niveaux mensuels minimums, médians et maximums.	37

Figure 8.1 - Exemple de fichier de données Excel pour le puits 05107041 du RSESQ à Lac-Jacques-Cartier tel que publié actuellement sur le site Internet du Ministère. Les cercles rouges indiquent les endroits dans le fichier où le logo du Ministère est manquant et où un mauvais caractère est utilisé pour les degrés Celsius.....	38
Figure 8.2 - Graphiques de l'hydrogramme du puits 04017011 du RSESQ à Mirabel (a) tel que publié actuellement sur le site Internet du Ministère et (b) après avoir appliqué les recommandations de mise en forme émises dans cette section.....	39
Figure 8.3 - Aperçu de l'éditeur permettant de produire des hydrogrammes dans GWHAT.....	42
Figure 9.1 - Séries temporelles des niveaux piézométriques (WL) et barométriques (BP) mesurés aux 15 minutes dans le puits d'observation 03040005 du RSESQ à Saint-Amable illustrant les fluctuations proportionnelles et opposées du niveau d'eau dans le puits (en bleu) et de la pression atmosphérique (en gris).	43
Figure 9.2 - Organigramme de la méthodologie proposée pour la correction des données piézométriques du RSESQ pour les effets barométriques et les marées terrestres à l'aide d'une méthode utilisant la fonction de réponse barométrique (BRF).....	44
Figure 9.3 – Comparaison des niveaux d'eau (gris) avec les niveaux d'eau corrigés pour l'effet des variations de pression barométrique (bleu) pour le puits 03030003 du RSESQ à Saint-Hugues.	47
Figure 9.4 - Aperçu de l'outil disponible dans GWHAT 4.0 pour évaluer la fonction de réponse barométrique des puits.	48
Figure 10.1 - Composantes hydrologiques considérées par diverses méthodes d'estimation de la recharge (tiré de Rivard et al. 2014).	50
Figure 10.2 – Illustration (a) des composantes du bilan hydrologique de surface et (b) du bilan en eau d'un aquifère libre (tiré de Gosselin et al. 2018).	53
Figure 10.3 – Aperçu de l'outil dans GWHAT pour évaluer la recharge à partir de données climatiques et de mesures journalières de niveaux d'eau souterraine.	54
Figure 10.4 - Aperçu des figures générées par GWHAT à partir des résultats obtenus avec la méthode d'estimation de la recharge développée dans le cadre du projet de recherche PACC de l'INRS.	54
Figure 10.5 – Diagramme de la procédure de calcul pour l'estimation de la recharge avec PyHELP (tiré de Gosselin et al. 2019b).	57
Figure 10.6 – Composantes hydrologiques considérées par le modèle HELP pour l'estimation de la recharge (tiré de Raynauld et al. 2018).	58
Figure 10.7 – Exemple de graphiques de comparaison du débit total et du débit de base annuel des rivières pour le bassin versant de calage de la rivière du Nord dans les Laurentides (tiré de Raynauld et al. 2018).	58
Figure 11.1 - Étapes de l'évaluation des effets des changements climatiques sur les conditions hydrologiques : 1) modélisation climatique (globale ou régionale); 2) production de séries météorologiques représentatives du climat futur utilisées comme intrant de modèles hydrologiques; et 3) évaluation des effets hydrologiques et identification des mesures d'adaptation (tiré de Olsson et al. 2016).	60

Figure 11.2 - Étude de l'effet combiné de l'adaptation des pratiques agricoles et du changement de la recharge sur les nitrates dans l'eau souterraine (tiré de Paradis et al. 2016).....	61
Figure 11.3 - Régions couvertes par les études sur les effets des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine dans l'est du Canada (tiré de Larocque et al. 2019).	62
Figure 11.4 - Données requises pour la modélisation de l'effet des changements climatiques sur les processus hydrologiques (tiré de Tsvetkova & Randhir, 2019).	63
Figure 11.5 - Régions couvertes par les simulations du projet ClimEx (tiré de Leduc 2019).	63
Figure 11.6 - Processus de simulation de ClimEx pour la production d'un ensemble de 50 réalisations de simulations climatiques à une résolution de 310 km obtenues du GCM CanESM et qui ont été mises-à-l'échelle avec CRCM5 pour produire un ensemble de données en climat futur à une résolution de 12 km servant de données d'entrée à la modélisation hydrologique (tiré de Leduc et al. 2019).	64
Figure 11.7 - Régions couvertes par les simulations du projet NA-CORDEX (tiré de https://na-cordex.org/domain-map.html , résolution de 50-km / 0.44°).....	65
Figure 11.8 - Processus de sélection des scénarios climatiques parmi l'ensemble de scénarios qui seront utilisés par la DEH pour la réalisation de l'Atlas hydroclimatique 2020 (tiré de Braun 2017). La figure de gauche montre les changements des précipitations et températures moyennes annuelles des simulations climatiques par rapport aux conditions météorologiques actuelles. La figure de droite montre que la sélection des douze réalisations numérotées dans la figure de gauche permet d'expliquer plus de 75% de la variance de l'ensemble des simulations climatiques.	66
Figure 12.1 - Diagramme entité-association présentant la structure de la base de données utilisée par défaut dans SARDES.	70
Figure 12.2 – Gestionnaire permettant de connecter SARDES à une base de données.....	76
Figure 12.3 - Outil « Tables » de SARDES permettant de visualiser les données servant à la gestion du réseau de suivi.....	77
Figure 12.4 - Outil « Lectures » de SARDES permettant de visualiser les séries chronologiques de données acquises aux stations du réseau de suivi.	78
Figure 12.5 – Exemple de graphique interactif affichant des données temporelles de niveau et de température de l'eau dans le visualiseur de données.	78
Figure 12.6 – Exemple (a) de chiffrier Excel et (b) d'hydrogramme de puits produits avec les outils « Créer un document XLSX » et « Créer un hydrogramme » de l'outil « Lectures ».	79
Figure 12.7 – Panneau de configuration permettant de modifier le contenu des fichiers XLSX et des graphiques d'hydrogrammes de puits qui sont produits par SARDES.	80
Figure 12.8 : Outil « Bibliothèque » de SARDES permettant de visualiser l'ensemble des bibliothèques qui sont nécessaires pour le stockage des données dans la base de données.	80
Figure 12.9 : Outil SARDES pour le chargement des données de suivi dans la base de données à partir des fichiers bruts de données produits par les sondes barométriques et à pression.....	81
Figure 13.1 - Histogrammes présentant l'état du RSESQ. Le diagramme (a) montre le nombre de stations piézométriques en fonction du nombre d'années avec des données disponibles alors que le diagramme (b) montre le nombre de stations piézométriques actives en fonctions du temps.	84

1 CONTEXTE

Dans le cadre des plans d'action sur les changements climatiques 2006-2012 et 2013-2020, la Direction de l'eau potable et des eaux souterraines (DEPES) du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) a déployé, depuis 2007, le Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ). L'évolution à long terme des niveaux d'eau dans des puits d'observation permet de diagnostiquer l'état de la ressource en eau souterraine et de détecter l'impact des changements dans les conditions naturelles ou celui des prélèvements importants dans le secteur où les puits sont installés. Ainsi, le RSESQ vise notamment à recueillir les données permettant d'évaluer l'effet des changements climatiques sur la ressource en eau souterraine au Québec. Puisque l'écoulement de l'eau souterraine fait généralement résurgence dans les cours d'eau, les données du RSESQ ont aussi le potentiel de donner des indications à l'avance sur les débits des cours d'eau et plus particulièrement sur leur régime d'écoulement en période d'étiage.

Le RSESQ compte 258 stations de mesure du niveau d'eau réparties dans toutes les régions du Québec. Ces stations sont constituées de puits d'observation qui sont équipés d'appareils de mesure permettant de faire un suivi du comportement de la nappe phréatique par la mesure quasi continue du niveau d'eau, de la température et, dans certains cas (ex. : Îles-de-la-Madeleine et Umiuq), de la conductivité électrique de l'eau souterraine.

Dans le but d'optimiser le RSESQ et d'améliorer la capacité du Ministère à exploiter les données du réseau, la DEPES a lancé à l'hiver 2017 trois projets de recherche réalisés en parallèle par l'Université Laval, l'Université du Québec à Montréal (UQAM) et l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) avec la participation de la Commission géologique du Canada (CGC). Ces projets de recherche s'inscrivent dans le cadre de la priorité 30.3.2 du PACC 2013-2020 et visent une région d'étude d'environ 36 000 km² allant du sud du fleuve Saint-Laurent à la frontière des États-Unis entre Québec et Montréal. Ces projets de recherche et de développement se concentrent particulièrement sur la compréhension des phénomènes en jeu (influence du climat sur la ressource en eau souterraine, liens entre les eaux souterraines et les eaux de surface, etc.). Des méthodes et outils diagnostics seront aussi développés dans le but de produire des informations nouvelles sur les conditions hydrogéologiques des stations du RSESQ, sur la réponse des niveaux d'eau mesurés et sur les liens potentiels entre leurs variations et les changements climatiques ainsi que les débits d'étiage des cours d'eau. À terme, ces projets devraient permettre à la DEPES de procéder à l'optimisation du RSESQ, d'évaluer quantitativement l'effet dans le temps des changements climatiques sur la recharge des systèmes aquifères (climat historique et futur), ainsi que sur leur régime de crue et d'étiage afin d'améliorer la prédiction des débits dans les cours d'eau en période d'étiage.

2 MANDAT

La fin des trois projets réalisés dans le cadre de la priorité 30.3.2 du PACC 2013-2020 était prévue pour l'automne 2020, mais ils vont plutôt se terminer au printemps 2021. Les travaux de l'INRS ont porté sur l'exploitation des mesures de niveaux d'eau en tant qu'outils pour diagnostiquer l'effet des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine. Les travaux de l'INRS s'appuient notamment sur des travaux de recherche réalisés antérieurement dans le cadre de projets d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES Montérégie Est et Chaudière-Appalaches). Le travail réalisé par l'INRS a permis de produire des idées et des méthodes particulièrement prometteuses pour le stockage, la visualisation et l'analyse de séries temporelles de données de niveaux d'eau, comme celles produites par les stations du RSESQ, notamment pour l'évaluation de la recharge des eaux souterraines.

La DEPES se limite présentement à la diffusion des données recueillies par le RSESQ, sans faire l'exploitation de ces données par rapport à leurs applications potentielles. Or, l'exploitation des données et la diffusion des résultats de cette exploitation donneraient une valeur ajoutée importante au RSESQ. C'est le cas notamment pour l'évaluation de la recharge des eaux souterraines qui pourrait se faire pour plusieurs des stations du RSESQ. Une estimation de la recharge dérivée des mesures effectuées aux stations du RSESQ serait notamment précieuse dans le cadre de l'application du mécanisme d'autorisation des prélèvements d'eau afin de considérer la capacité d'exploitation de la ressource.

Comme le précise l'article 31.76 de la Loi sur la qualité de l'environnement (RLRQ, c. Q-2) (LQE), le pouvoir d'autorisation des prélèvements d'eau doit être exercé de manière à assurer la protection des ressources en eau, notamment en favorisant une gestion durable, équitable et efficace de ces ressources ainsi qu'en prenant en compte le principe de précaution et les effets des changements climatiques. Ainsi, publier l'historique des variations de la recharge pour les stations du RSESQ où la recharge peut être estimée faciliterait la tâche des professionnels chargés de concevoir un projet de prélèvement d'eau, donc d'en évaluer les effets, de même que la tâche des analystes des opérations régionales ou des évaluations environnementales du MELCC pour soutenir la prise de décision à l'égard de demandes d'autorisation pour le prélèvement d'eau. Le développement d'une méthodologie permettant de dériver une telle information à chacune des stations du RSESQ, dont les conditions le permettent, pourrait être élargi pour estimer ce que serait la recharge à ces mêmes stations en climat futur. Il serait ainsi intéressant d'évaluer la possibilité d'intégrer les résultats de l'évaluation de la recharge en climat futur à l'Atlas hydroclimatique produit par la Direction de l'expertise hydrique du MELCC.

Dans cette perspective, le Ministre a confié à l'INRS le mandat de revoir, en collaboration avec l'UQAM, l'ensemble des informations et des idées qui auront été produites tout au long des projets PACC et d'évaluer comment celles-ci pourraient être incorporées aux opérations de gestion du RSESQ ou aux informations qui sont publiées sur le site Internet du Ministère à court terme (dans le cadre du présent mandat) ainsi qu'à moyen et long terme. Dans le cadre de son mandat, l'INRS doit réaliser les travaux suivants :

1. Produire une synthèse de l'ensemble des informations et des idées qui auront été produites tout au long des projets PACC, donc de faire un recensement de tout ce qui devrait être fait et de tout ce qu'il serait possible de faire à court et moyen terme pour améliorer la gestion, l'exploitation et la publication des données du RSESQ (section 13 du rapport);
2. Définir les informations qui devraient apparaître à la fiche signalétique de chacune des stations du RSESQ afin d'en compléter la caractérisation et d'en permettre la classification, notamment en fonction des caractéristiques du système aquifère observé par la station (section 4 du rapport);

3. Développer la méthodologie pour valider et corriger les données piézométriques recueillies à chacune des stations du RSESQ, ainsi que formuler au Ministre les recommandations particulières relatives à l'approche à privilégier pour en incorporer l'application aux opérations de gestion du RSESQ (section 5 du rapport);
4. Identifier les données météorologiques (ex. : données de la grille InfoClimat) qui devraient être diffusées conjointement avec les données piézométriques des stations du RSESQ et recommander au Ministre l'approche à privilégier pour représenter ces données parallèlement aux mesures de niveau d'eau (section 6 du rapport);
5. Développer une méthodologie pour la production d'hydrogrammes statistiques représentant les variations historiques des niveaux d'eau des stations du RSESQ par rapport aux niveaux actuels, et formuler au Ministre les recommandations particulières relatives à l'approche à privilégier pour en incorporer l'application aux opérations de gestion du RSESQ et en faciliter la diffusion sur le site Internet du MELCC (section 7 du rapport);
6. Formuler au Ministre des recommandations visant à améliorer le format de présentation des hydrogrammes des stations du RSESQ publiés sur le site Internet du MELCC, ainsi que sur la procédure à appliquer pour les produire (section 8 du rapport);
7. Développer une méthodologie visant à évaluer, pour chacune des stations du RSESQ, la fonction de réponse barométrique et à effectuer la correction barométrique des niveaux piézométriques, ainsi que formuler au Ministre les recommandations particulières relatives à l'approche à privilégier pour en incorporer l'application aux opérations de gestion du RSESQ et en faciliter la diffusion sur le site Internet du MELCC (section 9 du rapport);
8. Développer une méthodologie visant à évaluer l'historique de la recharge des eaux souterraines à chacune des stations du RSESQ permettant de l'évaluer, et formuler au Ministre les recommandations particulières relatives à l'approche à privilégier pour en incorporer l'application aux opérations de gestion du RSESQ et en faciliter la diffusion sur le site Internet du MELCC (section 10 du rapport);
9. Développer une méthodologie visant à anticiper les variations de la recharge des eaux souterraines en climat futur (incluant des recommandations sur les scénarios climatiques à utiliser) à chacune des stations du RSESQ, et formuler au Ministre les recommandations particulières relatives à l'approche à privilégier pour en incorporer l'application aux opérations de gestion du RSESQ et en faciliter la diffusion sur le site Internet du MELCC (section 11 du rapport);
10. Formuler au Ministre des recommandations sur l'approche à privilégier pour intégrer éventuellement les variations de la recharge des eaux souterraines en climat futur à l'Atlas hydroclimatique et proposer une méthodologie à cette fin (section 13 du rapport).

3 SITUATION ACTUELLE DU RSESQ

Afin d'être en mesure de développer des méthodologies et d'émettre des recommandations pour améliorer la capacité du Ministère à gérer et à exploiter les données du RSESQ, il est d'abord nécessaire de dresser un portrait de la situation actuelle du RSESQ. La présente section décrit ainsi le processus actuel d'acquisition et de traitement des données du RSESQ.

Tout d'abord, les données de niveaux d'eau sont relevées deux fois par année (au printemps et à l'automne) et validées par les techniciens responsables du RSESQ. Les opérations effectuées par la DEPES pour faire cheminer les données du RSESQ, de la collecte aux puits jusqu'à leur publication sur le site Internet du Ministère, impliquent un processus en neuf (9) étapes (figure 3.1) (cette liste ne comprend pas l'étape de validation et de correction des données qui est décrite à la section 5 du présent rapport) :

Étape 1: Collecte des niveaux d'eau des sondes installées dans les puits d'observation du RSESQ

Étape 2: Transfert des données provenant des sondes vers la banque de données Access

Étape 3: Transfert des données chimiques sur les échantillons d'eau souterraine prélevés dans les puits du RSESQ dans la banque de données Access (cette étape n'est pas réalisée régulièrement)

Étape 4: Sélection des données par piézomètre

Étape 5: Transfert des données de niveaux d'eau dans des fichiers Excel

Étape 6: Génération des graphiques des hydrogrammes (niveaux d'eau en fonction du temps)

Étape 7: Transfert des données chimiques dans des fichiers Excel

Étape 8: Génération du fichier KML de présentation

Étape 9: Publication des données à jour sur le site Internet du RSESQ (transfert sur une clé USB)

Les données du RSESQ sont stockées dans une base de données Access qui contient à ce jour plus de 30 millions d'enregistrements de niveaux d'eau, de température et de conductivité électrique de l'eau souterraine. La mise en œuvre des différentes étapes nécessaires à la gestion des données du RSESQ repose sur un ensemble d'outils constitués de programmes informatiques Visual Basic version 6 (VB6) et de macros Excel. Un schéma fonctionnel du processus de cheminement des données et des outils présentement utilisés pour supporter chacune des étapes de ce processus est présenté à la figure 3.1. À noter que l'étape 9 consiste à transférer un fichier KML et tous les fichiers en format Excel et PDF à la direction des Communications du MELCC sur une clé USB. Il n'y a donc pas d'outil associé à cette étape et c'est pourquoi celle-ci n'apparaît pas sur le schéma de la figure 3.1. La Direction des communications transfère tous ces fichiers dans les répertoires appropriés du site Internet afin que ces fichiers soient visibles à l'ensemble des internautes sur le site Internet du Ministère.

Les données du RSESQ sont mises à jour et publiées sur le site Internet du Ministère en début de chaque année. Le site Internet du Ministère consiste principalement en une carte interactive Google (figure 3.2). Chaque pointeur sur la carte détermine la localisation d'une station de mesure. L'action de cliquer sur un pointeur de la carte fait apparaître une fiche signalétique contenant des informations sur la station et la nappe (municipalité, identifiant, localisation, nappe captive ou non, niveaux d'eau influencés ou non), de même qu'une liste de liens permettant de télécharger les données disponibles pour la station (graphique de l'évolution dans le temps du niveau d'eau, tableau des résultats d'analyse chimique de l'eau, schéma d'aménagement du puits et données sources sur les niveaux d'eau en fonction du temps).

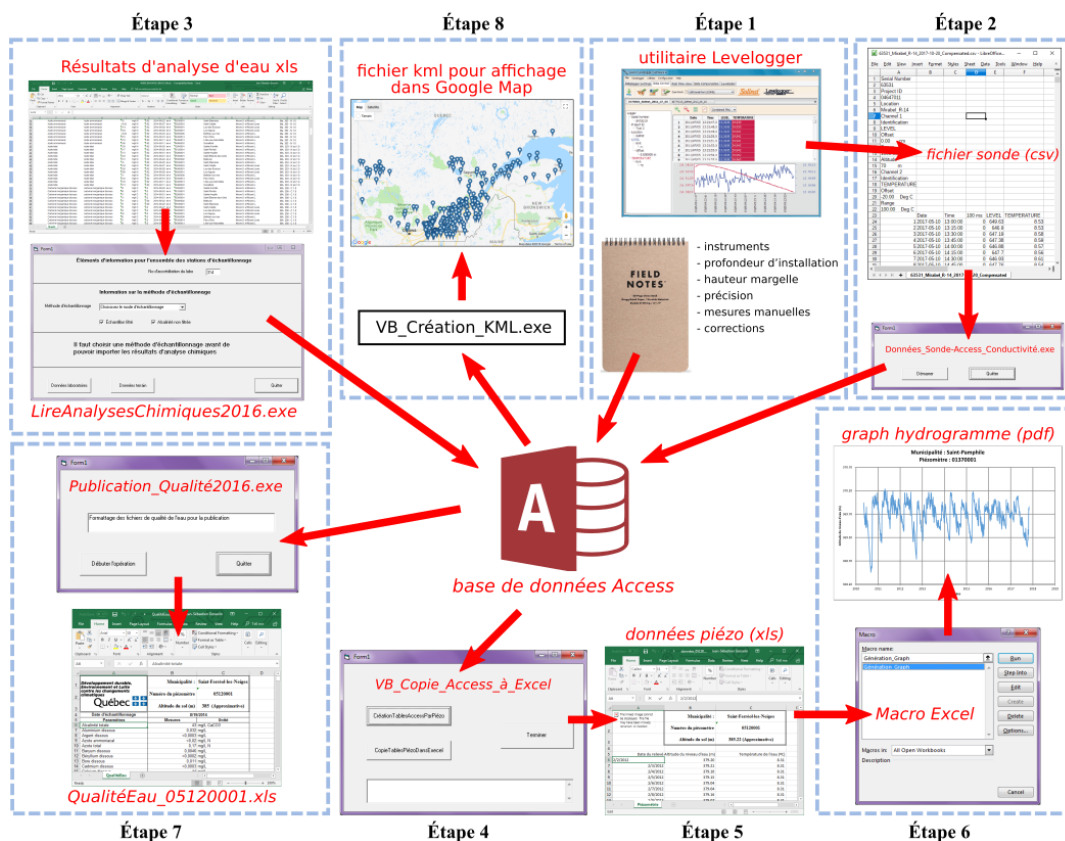


Figure 3.1 - Schéma fonctionnel du système d'outils informatiques actuellement utilisé pour supporter chacune des étapes de gestion du RSESQ.

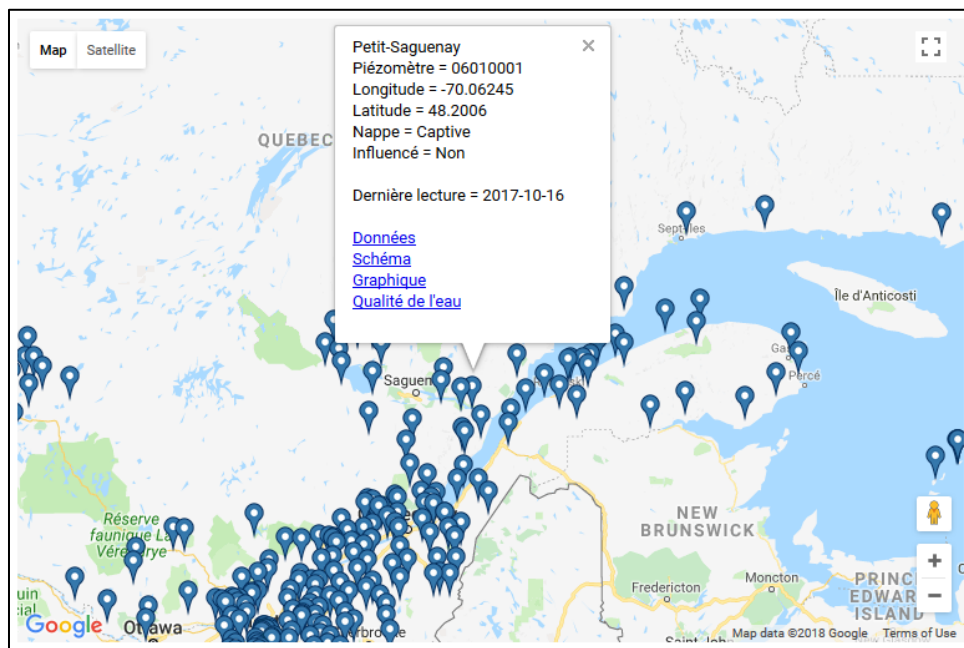


Figure 3.2 - Aperçu de la carte des puits du RSESQ sur la page d'accueil du MELCC (<http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/piezo/index.htm>).

4 FICHES SIGNALÉTIQUES

Mandat : Définir les informations qui devraient apparaître à la fiche signalétique de chacune des stations du RSESQ afin d'en compléter la caractérisation et d'en permettre la classification, notamment en fonction des caractéristiques du système aquifère observé par la station.

4.1 Infobulles de la carte Google du site Internet du Ministère

Tel que mentionné à la section 3, le site Internet du Ministère pour le RSESQ consiste présentement en une plateforme pour distribuer des données brutes avec un minimum de transformation de ces données. Quelques informations de base, telles que la latitude et la longitude du puits, sont aussi disponibles dans une infobulle qui apparaît lorsque l'on clique sur un puits de la carte Google (figure 3.2).

Considérant que les moyens actuels pour naviguer et rechercher des puits sur le site Internet du Ministère sont limités à cette carte Google (figure 3.2), il serait important que les infobulles qui apparaissent lorsque l'on clique sur un pointeur de la carte contiennent toutes les informations sur la nature des puits et les données disponibles, sans avoir à cliquer sur les liens qui permettent d'ouvrir des documents externes. Présentement, on retrouve dans l'infobulle de chacun des puits les informations suivantes :

- Nom de la municipalité
- Identifiant du piézomètre
- Latitude et longitude du piézomètre
- Nature du confinement de la nappe dans laquelle le niveau d'eau est mesuré
- Caractérisation de l'influence du niveau d'eau du puits par des activités anthropiques
- Date de la dernière lecture

À partir des données actuellement stockées dans la base de données du RSESQ, il serait possible d'ajouter les informations suivantes :

- Élévation du sol au puits
- Date de la première lecture
- Nombre d'années avec des données disponibles
- Type d'aquifère (dépôts meubles ou roc ; unité géologique)
- Profondeur moyenne de la nappe par rapport au sol
- Indicateur de station active

De plus, il serait pertinent d'ajouter à l'infobulle des puits pour lesquels cette information sera disponible la valeur de la recharge annuelle moyenne, de même que sa variance (voir section 10).

L'information contenue dans les infobulles est actuellement définie dans un fichier « kml » qui est produit chaque année lors de la mise à jour des données du site Internet du Ministère par les opérateurs du réseau à l'aide d'un outil Visual Basic 6 (étape 8 de la figure 3.1), qui n'est plus supporté par Microsoft.

4.2 Fiches signalétiques des puits

Au terme du projet de recherche PACC réalisé par l'INRS, des informations nouvelles et détaillées seront produites pour plus d'une centaine de puits du RSESQ qui sont situés à l'intérieur de cette région d'étude d'environ 36 000 km² entre Québec et Montréal au sud du fleuve Saint-Laurent jusqu'à la frontière des États-Unis. Ces informations nouvelles pourraient être utilisées pour valoriser le contenu du site Internet du Ministère sous la forme d'une fiche signalétique. Cette fiche pourrait être produite en format PDF et publiée sur le site Internet du Ministère via un lien téléchargeable qui serait ajouté aux infobulles de la carte interactive Google. Nous suggérons à la section 4.3 un format de fiche signalétique des puits du RSESQ qui intégrerait les informations produites dans le cadre du projet PACC.

Nous recommandons d'inclure dans la fiche signalétique toutes les informations contenues dans l'infobulle des puits, incluant les informations supplémentaires qui ont été mentionnées à la section précédente. De plus, la fiche pourrait contenir les autres éléments suivants :

- Une carte présentant la localisation du puits de même qu'une photo montrant le puits et les conditions environnantes;
- Une figure mettant en relation les données de niveaux d'eau et les données climatiques sur un même graphique. Pour ce faire, il serait possible d'utiliser les données météo extraites de la grille climatique quotidienne du Réseau de surveillance du climat du Québec (RSCQ; <http://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/surveillance/>) (voir sections 6 et 8 et l'exemple de la figure 6.2);
- Pour les puits avec suffisamment de données, un hydrogramme statistique de même qu'un tableau des valeurs numériques illustrées dans le graphique. Ceci est discuté en détail à la section 7;
- Une figure présentant la fonction de réponse barométrique du puits de même qu'un tableau présentant les valeurs numériques. Ceci est discuté en détail à la section 9;
- Pour les puits qui le permettent, un graphique montrant des estimations annuelles de recharge de même qu'un tableau présentant les valeurs numériques. Ceci est discuté en détail à la section 10.

De plus, dans le cadre du projet de recherche PACC de l'INRS, des données ont été extraites des PACES afin de définir les conditions prévalant autour des puits du RSESQ par le biais de divers indicateurs (ex. : topographie, végétation, affectation du territoire, etc.). Plus spécifiquement, les données des cartes des projets PACES ont été extraites sur une aire de 1 km² centrée sur le puits ; aire considérée comme représentative de l'environnement proche du puits. Sur ce carré de 1 km x 1 km, 25 points séparés de 250 m ont été utilisés pour obtenir ponctuellement la valeur de la couche d'information. La section 4.3 présente les indicateurs qui ont été retenus pour présentation dans la fiche signalétique des puits.

À partir de ces données, une planche cartographique a été produite pour visualiser le puits et la zone d'extraction de données pour chacun des indicateurs définis dans le cadre du projet PACC. Un exemple de planche cartographique pour l'indicateur « pente » est présenté à la figure 4.1 pour le puits 03030011 du RSESQ à Brome. La planche cartographique est organisée en plusieurs encarts permettant à l'utilisateur d'avoir un niveau d'information suffisant sur le contexte du puits : 1) identifiant et nom du puits de suivi du RSESQ, 2) paramètre affiché sur la planche cartographique, 3) légende détaillée du paramètre, 4) échelles des deux cartes et coordonnées géographiques, 5) carte générale (au 1/550 000 dans l'exemple) du paramètre « pente » avec l'ensemble des puits du RSESQ (en turquoise), incluant le puits en question (en rose), 6) carte de l'environnement proche du puits (au 1/10 000) avec les points d'extraction et les valeurs associées du paramètre, puis 7) statistiques pour le paramètre « pente » pour le puits concerné. Selon le type de données d'entrée, l'organisation générale de la planche cartographique reste semblable, seul l'encart « 7 » est différent.

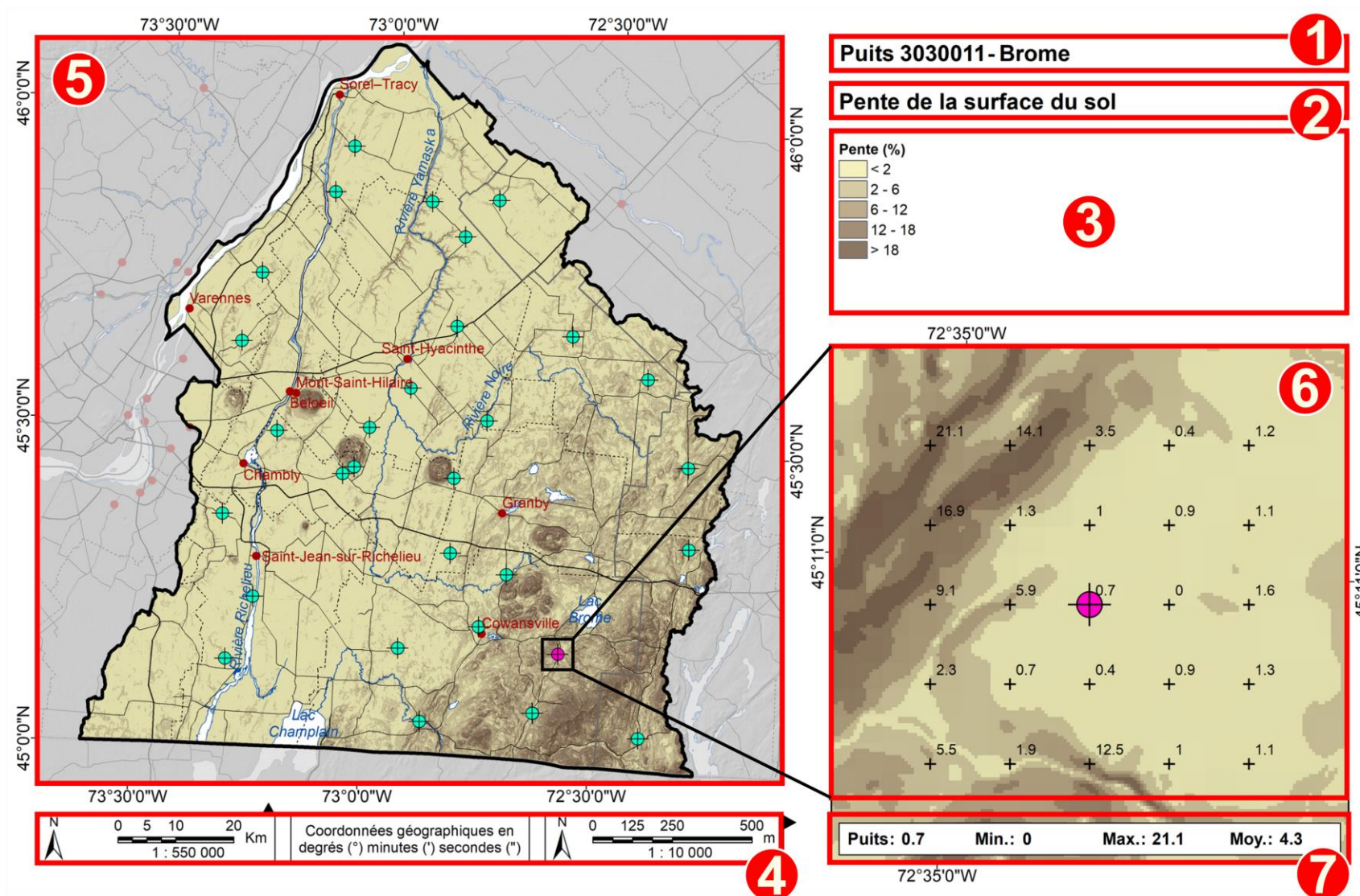


Figure 4.1 – Exemple de carte montrant les conditions autour des puits du RSESQ : paramètre « pente » du puits de Brome, région du PACES Montérégie Est.

Il serait ainsi aisé de joindre ces planches cartographiques au fichier PDF de la fiche signalétique de chacun des puits qui serait publiée sur le site Internet du Ministère. Ces cartes fournissent des informations très utiles sur le contexte local des puits qui peuvent être utilisées, entre autres, pour mieux comprendre le comportement des hydrogrammes de puits, pour statuer sur l'utilisation qui pourrait être faite des niveaux d'eau mesurés dans chacun des puits et pour définir des plages de paramètres hydrologiques plausibles pouvant être utilisés pour l'estimation de la recharge aux puits avec la méthode présentée à la section 10. À moyen ou long terme, le Ministère pourrait développer une procédure permettant la mise à jour des cartes dont le contenu change avec le temps (ex. : végétation, occupation du sol, affectation du territoire, grands utilisateurs d'eau souterraine).

4.3 Format proposé pour les fiches signalétiques des puits

Considérant la discussion faite à la section précédente sur le contenu souhaitable de la fiche signalétique des puits du RSESQ, la présente section décrit le format qui pourrait être envisagé pour ces fiches. Cette description est faite afin de servir de base à la réflexion du Ministère pour l'éventuel développement des fiches. La figure 4.2 illustre le contenu suggéré pour la fiche signalétique. Ce ne sont que les éléments de contenu de la fiche qui sont discutés dans la présente section. Au niveau de la présentation du contenu de la fiche, de très nombreuses variantes sont envisageables au niveau des formats de présentation des divers éléments. Notamment, une orientation « paysage » des pages des fiches signalétiques a été retenue parce que certains graphiques allongés s'intègrent mieux dans ce format. Une réflexion plus approfondie devra être faite pour définir à la fois le contenu et le format des fiches. Il pourrait aussi être envisagé par le Ministère de consulter les usagers du RSESQ afin d'avoir leurs avis sur une version préliminaire d'une éventuelle fiche signalétique.

La figure 4.2 montre que la fiche signalétique pourrait être constituée de huit (8) pages au total. Toutefois, ce ne sont que les quatre (4) premières pages qui seraient produites pour tous les puits du RSESQ, alors que les quatre (4) autres pages ne seraient produites que sur les puits dont les conditions sont adéquates. En fait, les informations sont pratiquement toutes disponibles pour produire les quatre (4) premières pages de la fiche signalétique pour tous les puits du RSESQ, alors que les quatre (4) autres pages ne pourraient être produites que pour les puits à l'intérieur de la région PACC qui ont fait l'objet de travaux particuliers.

La première page (figure 4.2A) de la fiche présenterait les informations sur le puits (voir section 4.2), une carte de localisation et une photo du puits. La deuxième page (figure 4.2B) montrerait le schéma du puits qui peut déjà être téléchargé du site Internet du RSESQ. La troisième page (figure 4.2C) montrerait l'hydrogramme du puits en combinaison avec des données météorologiques tel qu'illustré à la figure 6.2. De l'information sur la station météorologique et les normales climatiques seraient aussi données dans la partie supérieure de cette page. La quatrième page (figure 4.2D) montrerait l'hydrogramme statistique du puits comme à la figure 7.2 ainsi que des statistiques sur la variation mensuelle des niveaux d'eau du puits. La cinquième page (figure 4.2E) documenterait les conditions du puits et particulièrement son confinement déduit de la fonction de réponse barométrique (BRF) du puits. Les puits pour lesquels la BRF ne peut pas être produite n'aurait pas cette information dans la page. Suite au projet PACC de l'INRS, la BRF a été produite pour les puits à l'intérieur de la région PACC pour lesquels il était possible de le faire mais cela n'a pas été fait pour les puits du RSESQ en dehors de la région PACC. La sixième page (figure 4.2F) illustrerait les conditions entourant les puits du RSESQ. La figure 4.3 montre un exemple des 12 cartes qu'il serait envisageable de produire pour caractériser les conditions entourant les puits du RSESQ à partir de données généralement disponibles. Enfin, les pages sept (7) et huit (8) (figures 4.2G et 4.2H) documenteraient l'estimation de la recharge telle que décrite à la section 10 du présent rapport.

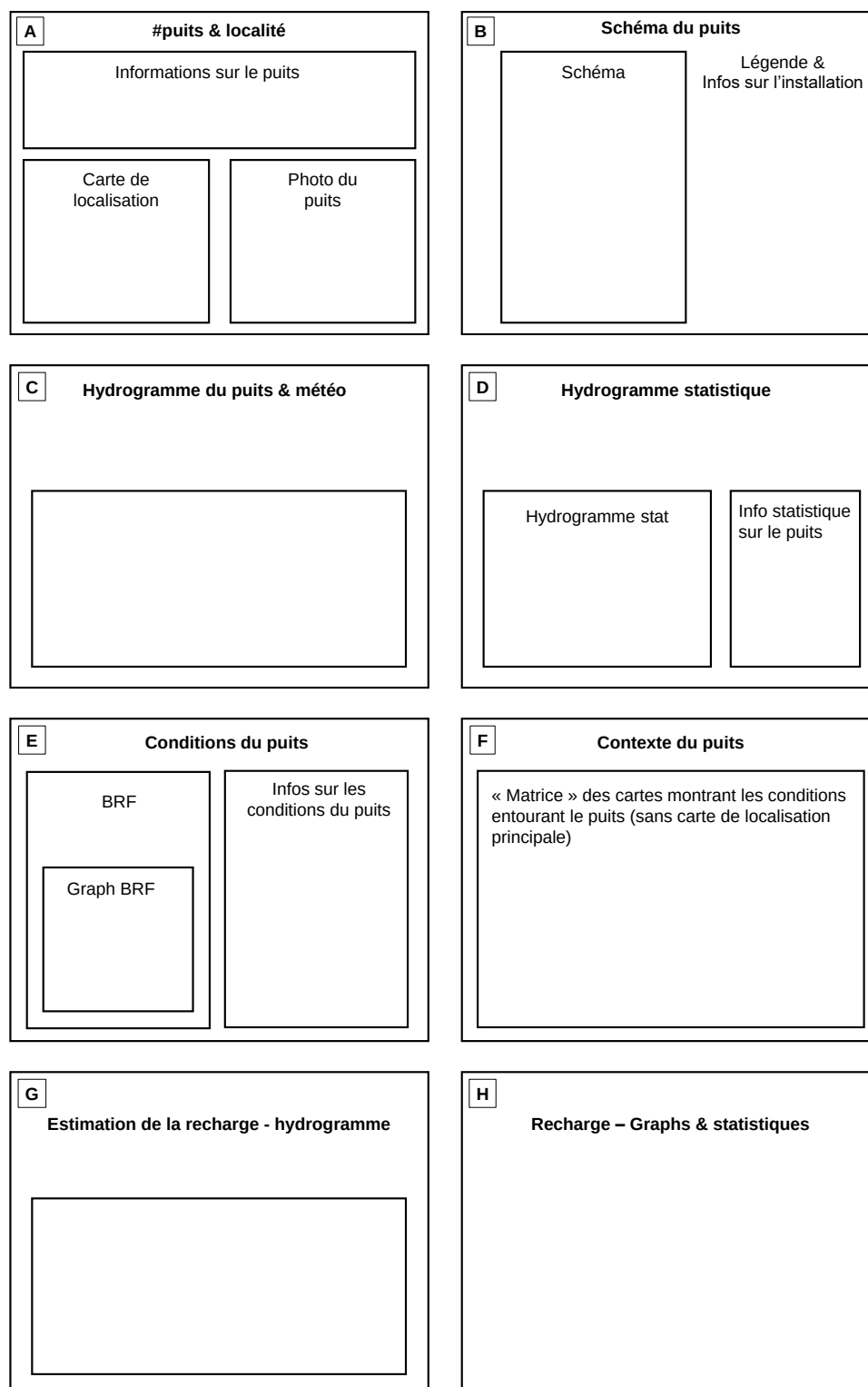


Figure 4.2 – Suggestion de contenu des fiches signalétiques des puits du RSESQ (voir le texte pour les explications).

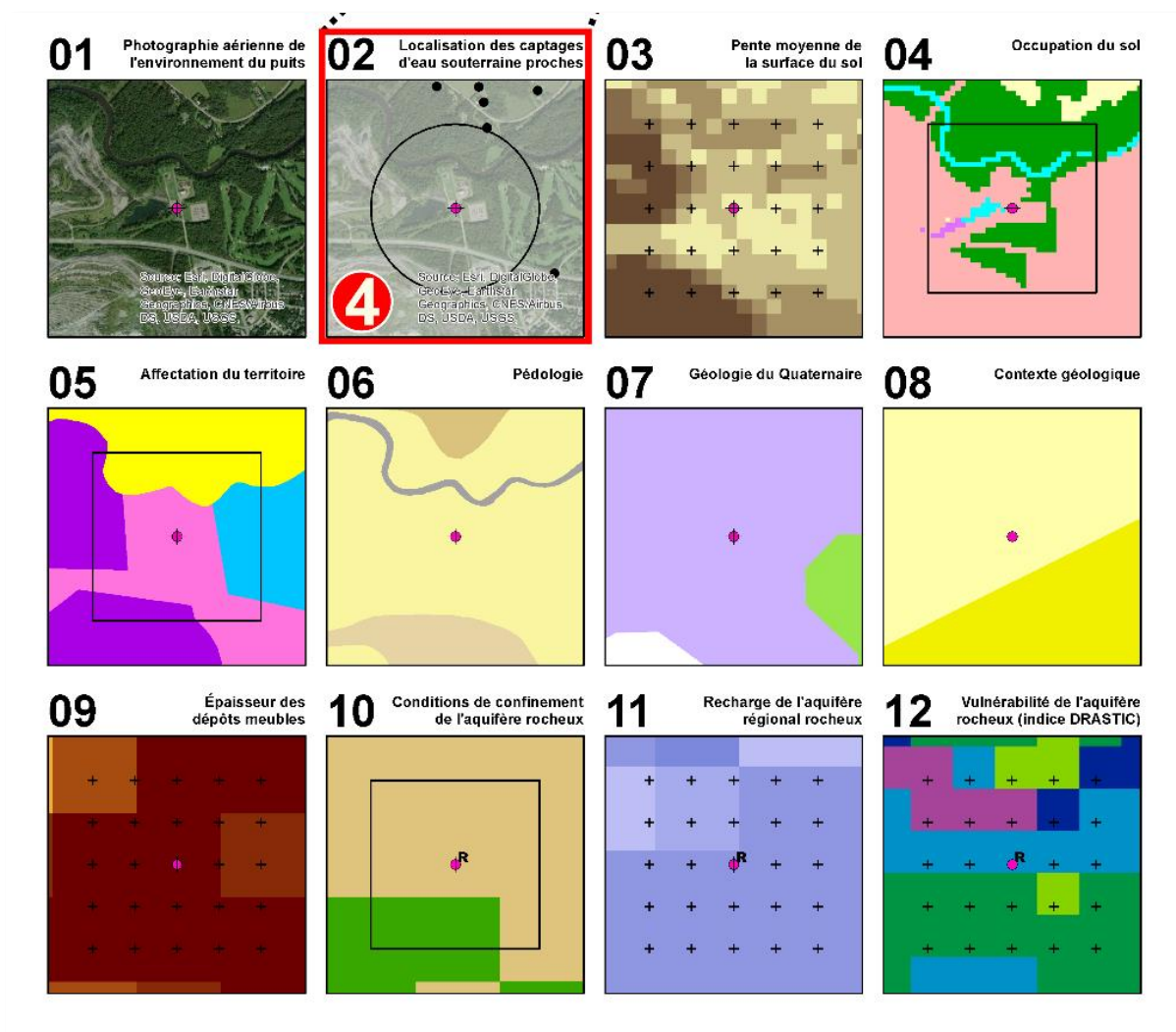


Figure 4.3 – Exemple de cartes illustrant le contexte des puits du RSESQ (partie F de la fiche signalétique montrée à la figure 4.2).

5 VALIDATION ET CORRECTION DES DONNÉES PIÉZOMÉTRIQUES

Mandat : Développer la méthodologie pour valider et corriger les données piézométriques recueillies à chacune des stations du RSESQ, ainsi que formuler au Ministre les recommandations particulières relatives à l'approche à privilégier pour en incorporer l'application aux opérations de gestion du RSESQ.

5.1 Stockage des données piézométriques

La validation et la correction des données piézométriques du RSESQ ne peuvent être faites sans un système fonctionnel de stockage et de gestion de ces données. Tel que mentionné à la section 3, les données du RSESQ sont stockées dans une base de données Access qui n'est pas adaptée à la nature ni au volume des données impliquées, ce qui occasionne de la lourdeur, une baisse de performance et une vulnérabilité dans la conservation de ces données à plus long terme. Sur la base de l'évaluation des capacités de stockage des données du RSESQ faite dans la présente section, une nouvelle structure de base de données ainsi que des outils ont été développés afin de gérer et d'utiliser plus efficacement les données du RSESQ (section 12). Ceci a permis de produire des outils fonctionnels des développements faits dans le cadre de notre mandat.

Actuellement, l'un des plus gros problèmes pour le stockage des données du RSESQ avec Access est la limite de 2 gigaoctets sur l'espace disponible pour le stockage des données¹. Cette limite a d'ailleurs déjà été atteinte lors de la dernière mise à jour des données du RSESQ au printemps 2019. Il serait possible de continuer le stockage des données dans une seconde base de données Access qui pourrait être liée à la première, mais cette solution n'est pas idéale à long terme et ne serait pas compatible avec les divers outils utilisés actuellement pour supporter les opérations de gestion du RSESQ.

Deuxièmement, un problème important rencontré avec la base de données actuelle provient du fait qu'il n'y a pas de séparation entre la représentation logique des données et leur organisation physique. Cette structure a l'avantage de permettre une visualisation et une gestion des données du RSESQ directement à partir des tables primaires de la base de données Access, sans avoir à réorganiser l'information de façon logique. Toutefois, cette situation apporte des contraintes structurelles majeures lorsqu'un nouveau type de données doit être ajouté à la base de données. C'est le cas notamment des nouveaux puits qui ont été ajoutés en 2018 aux Îles-de-la-Madeleine où des mesures de la température et de la conductivité électrique de l'eau sont prises en simultané à plusieurs profondeurs dans le puits. Puisque le modèle physique de la base de données est actuellement structuré pour répondre aux besoins spécifiques de représentation logique des données du RSESQ à des fins de gestion du réseau, il est actuellement difficile d'incorporer ces nouvelles données sans apporter des changements majeurs à la structure principale de la base de données. Enfin, l'organisation physique des données de séries temporelles dans la BD n'est pas appropriée au volume de données récoltées par le RSESQ, ce qui a un impact majeur sur la vitesse et la performance des opérations qui sont faites sur la base de données actuelle.

Afin de régler les principaux problèmes reliés à la base de données actuelle du RSESQ, nous proposons dans un premier temps de migrer les données du RSESQ de la BD Access vers un système de gestion de base de données relationnelle adapté à la gestion de données d'entreprise et au volume de données en jeu. Il existe de nombreux systèmes de gestion de base de données qui seraient adaptés aux besoins, dont les principaux sont SQLite, MySQL, Oracle Database, IBM DB2, PostgreSQL et Microsoft SQL Server.

¹ <https://support.office.com/en-us/article/access-specifications-0cf3c66f-9cf2-4e32-9568-98c1025bb47c>

Deuxièmement, nous recommandons de revoir la structure même de la base de données afin d'établir une séparation claire entre la représentation logique des données et leur organisation physique, de minimiser la redondance des données et de mettre en place un modèle physique qui soit adapté au stockage de données temporelles géoréférencées. Pour ce faire, nous recommandons de structurer le modèle physique de stockage des données en se basant sur le standard ISO 19156 (*Observations and measurements*) de l'*Open Geospatial Consortium* (OGC)² qui a été spécifiquement conçu pour gérer de façon optimale les observations géoscientifiques, notamment les données de séries temporelles géoréférencées telles que celles du RSESQ. La généralisation de la gestion des données permettra une plus grande flexibilité, ce qui facilitera l'ajout éventuel de nouveaux types de données sans changer la structure principale de la base de données.

La mise en œuvre de ces recommandations devrait permettre de régler à court et moyen terme les principaux problèmes mentionnés précédemment avec la base de données actuelle du RSESQ (voir section 12).

5.2 Validation et correction des données actuelles du RSESQ

Une analyse exhaustive du contenu de la base de données Access du RSESQ a permis d'identifier des erreurs et des incohérences qu'il sera nécessaire de corriger avant de migrer les données du RSESQ vers une nouvelle base de données. L'introduction de telles erreurs et incohérences dans la base de données devrait être évitée au moyen de contrôles qui devraient être effectués automatiquement par le système de gestion des données lorsque des modifications sont apportées ou lorsque de nouvelles données sont ajoutées à la base de données. Ceci est d'ailleurs discuté en détail à la section 5.3.

5.2.1 Heure de référence des niveaux d'eau

Au Québec, l'heure normale est utilisée (UTC-05:00) du premier dimanche de novembre au second dimanche de mars, alors que l'heure avancée (UTC-04:00) est utilisée le reste de l'année. Pour cette raison, à chacune des visites aux puits (2 fois par année), les opérateurs du réseau ajustent l'heure des sondes à celle qui est observée au Québec au moment de la visite. Cette opération est effectuée au moyen d'une synchronisation de l'horloge interne des sondes à celle de l'ordinateur portable utilisé pour télécharger les données.

Toutefois, cette approche cause des problèmes au niveau de la cohérence des données de suivi du RSESQ, puisque celles-ci ne sont alors pas toutes stockées dans la base de données sous le même référentiel de temps. De plus, durant une même campagne de terrain, il est possible que certaines sondes soient synchronisées avant et d'autres après la date observée pour le changement d'heure au Québec. Cela signifie ainsi que pour une même période de l'année, il est possible que certaines données de suivi soient enregistrées selon l'heure normale et d'autres selon l'heure avancée. Cela est problématique et pourrait introduire des erreurs lors de l'inter-comparaison des données de suivi ou encore lors de la comparaison de celles-ci avec les données météorologiques ou hydrométriques.

Ainsi, nous recommandons que les futures données de suivi du RSESQ soient sauvegardées dans la base de données selon l'heure normale à longueur d'année et de ne plus effectuer de changement d'heure des sondes lors des visites de terrain. Similairement, les mesures manuelles prises dans les puits devraient toute être enregistrées en utilisant l'heure normale. Idéalement, il serait préférable de ramener l'ensemble des données historiques de suivi qui sont actuellement stockées dans la base de données selon l'heure normale.

² www.opengeospatial.org/standards/om

Cela pourrait toutefois représenter une tâche importante et difficile puisqu'il serait alors nécessaire de re-tracer les dates et les heures de chacune des visites au puits pour pouvoir apporter les corrections nécessaires aux données. Or, cette information n'est pas disponible directement dans la base de données actuelle.

5.2.2 Doublons dans la table lecture

On compte dans la base de données actuelle une série de 19473 lectures dupliquées (niveaux d'eau et températures) pour le puits 03030013 de 2017-05-02 13:00 à 2017-11-21 09:00 et de 644 lectures pour le puits 04300013 de 2018-10-25 07:00 à 2018-05-17 13:00. Ces séries de lectures dupliquées s'expliquent probablement par le fait que les données brutes ont été chargées deux fois dans la base de données à la suite d'une campagne de terrain.

Ensuite, on compte 16 lectures ponctuelles qui sont dupliquées dans la base de données pour différents puits. Dans certains cas, les valeurs des lectures dupliquées sont les mêmes, alors que dans d'autres cas, il peut y avoir des différences importantes. Le tableau ci-dessous présente une liste des puits et des dates et heures pour lesquelles des données dupliquées ont été répertoriées dans la base de données. Dans le cas où les valeurs des lectures en doubles sont les mêmes, il serait simplement nécessaire de retirer une des deux lectures de la base de données. Dans le cas où des écarts importants existent entre les valeurs, il serait alors nécessaire de garder la valeur qui est la plus cohérente avec les valeurs précédentes et suivantes dans la série temporelle. Il est difficile d'expliquer exactement les causes de ces lectures dupliquées. Dans certains cas, cela pourrait avoir été causé par un chevauchement des données dû au changement d'heure des sondes qui est effectué lors des visites aux puits (voir section 5.2.1).

Tableau 5.1 – Identifiant des puits et date et heure pour lesquelles des données de suivi ont été saisies en double dans la base de données.

#	Puits	Date et heure
1	02257001	1979-11-07 01:00
2	02257001	1980-05-22 01:00
3	02400003	2013-04-05 10:00
4	03000003	2002-01-16 13:00
5	03020001	2014-11-05 13:00
6	03040001	2014-11-06 13:00
7	03040008	2012-11-28 00:00
8	03097131	1982-08-02 01:00
9	03097191	2007-10-18 09:00
10	03097191	2010-02-26 00:00
11	03097201	1990-12-14 01:00
12	03097201	1991-05-02 01:00
13	04677031	1975-07-09 01:00
14	04677031	1975-09-26 01:00
15	04677031	1976-08-31 01:00
16	02000005	2018-01-01 01:00

5.2.3 Erreurs dans la table d'installation des sondes

Lorsque l'on recoupe les données contenues dans la table « Lecture » de la base de données Access avec celles de la table « Sonde_installation », on remarque qu'un nombre important de données temporelles ne peuvent pas être associées à une installation de sonde. Cela est problématique et pourrait causer des erreurs lors du transfert éventuel des données vers une base de données relationnelle.

Le tableau ci-dessous présente le nombre de lectures pour lesquelles un numéro de sonde est inscrit dans la table « Lecture », mais pour lesquelles il n'est pas possible d'associer une installation de sonde. La solution à ce problème consisterait simplement à revoir les dates de début et de fin des installations de sonde afin de s'assurer que toutes les données de la table « Lecture » dont le numéro de sonde n'est pas nul puissent être associées de façon exclusive à une installation de sonde.

Tableau 5.2 – Identifiant des puits et nombre de lectures pour lesquelles aucune installation de sonde n'est associée.

#	Puits	Nb. de données	#	Puits	Nb. de données	#	Puits	Nb. de données
1	01030001	1	22	03090002	2	43	05000001	1
2	01120001	1	23	03090003	1	44	05040003	1
3	01160002	1	24	03090004	1	45	05080003	1
4	01370001	1	25	03090007	1	46	05097001	1
5	02247021	1	26	03090008	1	47	05097002	2
6	02370001	1	27	03090009	1	48	05107041	1
7	02370003	1	28	03090010	1	49	05220002	1
8	03000003	1	29	03090015	1	50	06010001	1
9	03030001	2181	30	03090019	1	51	06100001	1
10	03030002	2240	31	03090020	9514	52	06150001	1
11	03030003	2185	32	03097062	1	53	06180001	1
12	03030004	2263	33	03097082	1	54	07000002	1
13	03030006	2219	34	03097094	330	55	07000003	1
14	03030007	1460	35	03097102	2	56	07000004	3
15	03040001	2255	36	03097131	2	57	07230001	5
16	03040002	1729	37	03097182	3	58	07480001	1
17	03040005	2078	38	04017031	1	59	08010003	1
18	03040006	2958	39	04300001	1	60	08010007	
19	03040007	2176	40	04300002	1	61	09000008	1539
20	03040008	2176	41	04647011	1	62	13000006	4
21	03070001	1	42	04677031	1			

5.2.4 Erreurs dans la table d'inventaires de sondes

Toutes les informations sont manquantes en lien avec la sonde dont le numéro de série est 1046180. De plus, cette sonde n'a jamais été installée dans aucun puits du RSESQ et aucune lecture de niveau d'eau n'y est rattachée. Il serait nécessaire de retracer cette sonde et de saisir les informations en lien avec cette dernière dans la base de données. Si cette sonde ne peut pas être retracée, elle devrait tout simplement être retirée de la base de données.

L'information est manquante en lien avec la date de réception des sondes Solinst dont les numéros de séries sont respectivement 1048789 et 2001976. Cela s'explique par le fait que ces sondes ont été cédées au Ministère par l'INRS à la suite du PACES Montérégie Est. Il est conseillé d'ajouter une note pour chacune de ces sondes afin de documenter dans la base de données la raison pour laquelle leur date de réception est inconnue.

5.2.5 Erreurs dans la table de mesures manuelles

Dans la table « Lectures_Manuelles » de la base de données Access actuelle, quatre mesures manuelles de niveau d'eau sont associées à un puits dont l'identifiant est 03097095. Or, ce puits n'apparaît pas dans la table « Localisation » de la base de données. Afin de corriger cette situation, il serait nécessaire d'ajouter les informations en lien avec le puits 03097095 à la base de données. Dans le cas contraire, ces quatre mesures manuelles devraient tout simplement être retirées de la base de données.

5.3 Outils pour la gestion et la consultation des données du RSESQ

La gestion et la consultation des données du RSESQ se font actuellement directement dans Microsoft Access, où aucune vérification n'est faite lorsque des changements sont apportés ou lorsque de nouvelles données sont ajoutées à la base de données. C'est le cas, entre autres, pour l'ajout de nouveaux puits ou lors de la modification d'information en lien avec les puits existants. Ainsi, tel que démontré à la section précédente, il y a un grand risque d'introduire des erreurs lors de la saisie de ces informations. Le système actuel ne permet pas non plus aux utilisateurs de visualiser de façon dynamique les données de niveaux d'eau. Pour ce faire, il est nécessaire à chaque fois d'exporter les données vers des fichiers Excel.

Pour corriger ces problèmes, nous recommandons d'effectuer la gestion et la saisie des données du RSESQ dans un nouveau système qui devrait permettre de faire les vérifications nécessaires pour minimiser les risques d'erreur lors de la modification ou de l'ajout de nouvelles informations dans la base de données. Ce nouveau système devrait également permettre de réorganiser l'information de la nouvelle base de données dans une structure logique qui préserverait, dans l'ensemble, la structure de la base de données Microsoft Access actuelle (voir section 12). Cela permettrait de conserver le cheminement et les différentes étapes qui sont actuellement suivies pour la gestion des données du RSESQ (figure 3.1), ce qui minimiserait les impacts sur les utilisateurs du système. Le nouveau système devrait également permettre aux utilisateurs de visualiser de façon dynamique les données de niveaux d'eau directement à partir de la base de données, sans avoir à exporter les données vers des fichiers Excel ou PDF.

5.4 Mise à jour, validation et correction des données de niveaux d'eau

Les mesures de niveau et de température de l'eau sont faites à intervalle de temps fixe à l'aide de sondes équipées d'un enregistreur automatique de données. Ces sondes sont installées sous le niveau de l'eau dans les puits à une profondeur fixe par rapport à une référence d'élévation (généralement le haut de la margelle du tubage du puits) (figure 5.1). Chaque puits du réseau est visité environ deux fois par année afin de transférer les données des sondes sur un ordinateur portable à l'aide d'un utilitaire du fabricant des sondes. Une lecture manuelle du niveau d'eau est aussi prise lors de chacune de ces visites.

Les sondes utilisées pour la mesure des niveaux d'eau dans les puits d'observation du RSESQ sont dites « non ventilées », c'est-à-dire qu'elles donnent une mesure de pression totale à la profondeur à laquelle elles sont installées. Cette pression résulte de la hauteur de la colonne d'eau au-dessus de la sonde et de la pression atmosphérique. Pour obtenir la hauteur de la colonne d'eau au-dessus des sondes, il est donc né-

cessaire de compenser les valeurs de pression totale pour la pression atmosphérique, c'est ce que l'on appelle la « compensation barométrique » (à ne pas confondre avec la correction barométrique discutée en détail à la section 9).

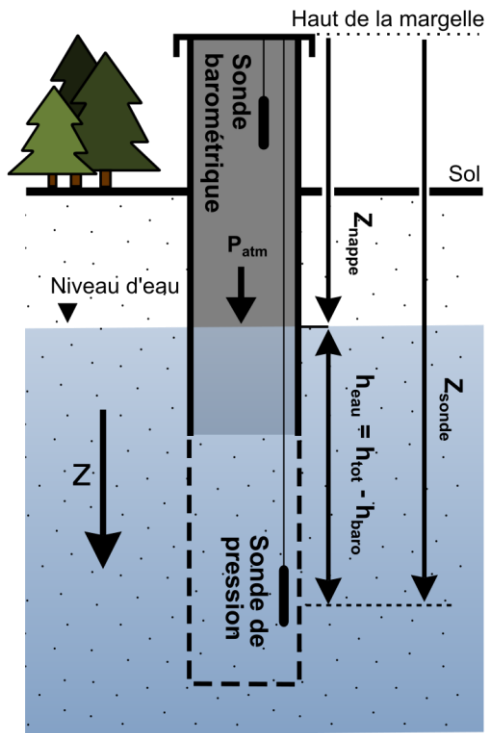


Figure 5.1 - Configuration des instruments pour le suivi du niveau d'eau des puits du RSESQ. Les profondeurs (Z) sont exprimées en mètres avec l'axe des Z positif vers le bas.

Pour permettre la compensation barométrique, des sondes barométriques sont installées dans plusieurs des puits du RSESQ afin de mesurer la pression atmosphérique à la même fréquence d'échantillonnage que les sondes de pression d'eau. En règle générale, il a été établi que les données mesurées avec les sondes barométriques peuvent être utilisées pour compenser des données de sondes de pression d'eau se situant dans un rayon pouvant aller jusqu'à 30 km³.

Suivant le schéma de la figure 5.1, la profondeur de la nappe (Z_{nappe}) par rapport au haut de la margelle du puits est donc calculée en utilisant la relation suivante :

$$Z_{nappe} = Z_{sonde} - (h_{tot} - h_{baro}) \quad \text{où} \quad h_{baro} = P_{atm} / \rho_{eau} \cdot g \quad \text{Équation 1}$$

où Z_{sonde} correspond à la profondeur (m) de la sonde par rapport au haut de la margelle, alors que h_{tot} et h_{baro} correspondent respectivement à la charge totale (m) et la charge barométrique (m) mesurées par les sondes. La charge barométrique correspond à la pression atmosphérique mesurée dans le puits exprimée en hauteur d'eau (m) en divisant la pression atmosphérique (P_{atm} , Pascal) par le produit de la densité de l'eau (ρ_{eau} , kg/m³) et de l'accélération gravitationnelle (g , m/s²).

³ <https://www.solinst.com/products/dataloggers-and-telemetry/3001-levellogger-series/levellogger-edge/datasheet/barometric-compensation.php>

À chaque visite au puits, l'opérateur fait le transfert des mesures enregistrées par les sondes sur un ordinateur portable et effectue la compensation barométrique des données de niveaux d'eau à l'aide du logiciel du fabricant de la sonde. L'opérateur compare ensuite les lectures compensées de la sonde avec la lecture manuelle de niveau d'eau prise au moment du relevé des lectures. Si une différence jugée significative est observée entre la mesure manuelle et la dernière lecture de la sonde, le logiciel offre la possibilité de faire la correction des lectures de la sonde d'une valeur représentant cet écart. Lorsque des corrections particulières ont dû être apportées aux mesures et qu'elles comportent un degré d'incertitude, une mention est inscrite plus tard dans la table « Remarques » de la base de données Access du RSESQ. Les données compensées et corrigées sont ensuite exportées en format csv sur l'ordinateur portable de l'opérateur.

Au retour d'une campagne de récupération de données sur le terrain, certaines tables de la base de données doivent être renseignées pour faire état des changements qui auraient pu être apportés aux puits ou à l'installation des sondes et pour enregistrer dans la base de données les nouvelles mesures manuelles qui ont été prises dans les puits. Ainsi, si des changements ont été apportés aux sondes installées dans les piézomètres ou à leur profondeur d'installation, la table « Sonde_installation » doit être ajustée. Si des modifications ont été apportées à l'élévation de la margelle d'un piézomètre ou si la précision de l'élévation a été améliorée (par exemple grâce à de l'arpentage), la table « Repère » doit être ajustée. Les mesures de niveaux d'eau manuelles qui ont été prises doivent être inscrites dans la table « Lectures_manuelles ». Actuellement, toutes ces opérations sont faites directement dans Access (étape 2 de la figure 3.1).

Par la suite, les données de niveaux d'eau compensées et corrigées qui ont été sauvegardées dans des fichiers csv sont chargées dans la table « Lecture » de la base de données Access à l'aide d'un utilitaire Visual Basic 6 (étape 3 de la figure 3.1). Le nom des fichiers « .csv » produits par le logiciel des sondes doit commencer par le numéro de série de la sonde, car l'utilitaire en a besoin pour déterminer le format des fichiers d'entrées qui varie en fonction du numéro de série de la sonde. Lorsqu'un fichier est transféré avec succès dans la base de données, l'extension du fichier est changée de « .csv » à « .cst » (« t » pour « transféré »). Les données de niveaux d'eau sont sauvegardées dans la base de données en profondeur par rapport au repère (haut de la margelle du puits), comme pour les niveaux mesurés manuellement. Ces données sont plus tard converties en altitude par rapport au niveau moyen des mers pour la publication sur Internet (voir section 8) ou pour toute interrogation *ad hoc*.

Lors du chargement de nouvelles données dans la base de données à partir d'un fichier csv, l'utilitaire VB6 effectue certaines vérifications pour éviter des erreurs de saisie et assurer un contrôle de qualité :

- Le numéro de la sonde dans le nom du fichier correspond à celui lu dans l'en-tête du fichier;
- La sonde de pression d'eau correspondant au fichier existe dans la table « Sonde_Caractéristiques » de la base de données et est bien installée dans un puits du RSESQ (table « Sonde_installation »);
- La dernière donnée de niveau d'eau entrée dans la base de données pour le puits est comparée à la première valeur des nouvelles données et l'écart entre les niveaux est affiché à l'écran. Cette mesure est faite en guise de contrôle de qualité des nouvelles données. C'est alors la responsabilité de l'opérateur de vérifier la différence et de porter un jugement sur la plausibilité des nouvelles mesures de niveau d'eau.

L'exécution de bout en bout des opérations pour la mise à jour des données du RSESQ ne bénéficie actuellement pas d'une automatisation intégrée et nécessite une succession d'actions manuelles requérant chacune une très bonne connaissance des tenants et aboutissants de plusieurs programmes informatiques qu'il est nécessaire d'exécuter. Ces opérations nécessitent beaucoup de temps et présentent surtout certains risques d'introduire des erreurs dans les données du RSESQ. Dans le but d'améliorer le processus de mise à jour,

validation et correction des données de niveaux d'eau, un nouvel outil devrait être développé pour lire les fichiers de données brutes, effectuer les vérifications nécessaires pour éviter l'introduction d'erreur et faire le chargement des nouvelles données dans la base de données. Cet outil devrait idéalement pouvoir être intégré au système de gestion des données du RSESQ discuté à la section précédente (voir section 12). En plus des données de niveau d'eau, ce nouvel outil devrait aussi permettre de charger les données de pression atmosphérique mesurées par les sondes barométriques. Les corrections apportées aux données de niveau d'eau (incluant la compensation barométrique) devraient être documentées dans la base de données de façon à permettre de revenir aux niveaux d'eau non compensés et non corrigés sans avoir à lire à nouveau les données à partir des fichiers de données brutes. Cette opération est discutée davantage à la section 9 qui documente une méthodologie permettant d'évaluer la fonction de réponses barométriques des puits et corriger les niveaux d'eau pour l'influence des variations de pression atmosphérique à la surface.

De plus, des outils devraient être développés pour améliorer le contrôle de qualité à la fois des nouvelles et des anciennes données. Des outils devraient également permettre aux opérateurs d'apporter des corrections aux nouvelles et anciennes données. Les corrections apportées devraient être normalisées et documentées automatiquement dans la base de données de façon à pouvoir retourner en arrière au besoin. Entre autres, il serait nécessaire de pouvoir détecter et corriger les discontinuités (« *step change* ») dans les variations des données temporelles de niveaux d'eau des nouvelles et anciennes données. Ces discontinuités peuvent être dues à des changements non documentés de la position verticale des sondes dans les puits ou à des erreurs de correction des données et ne correspondent pas à des variations réelles du niveau d'eau dans les puits. Plusieurs exemples sont donnés dans la figure 5.2 pour le puits 05080001 du RSESQ à Pont-Rouge. Plusieurs outils existent déjà pour détecter et corriger ce type de discontinuité dans les séries temporelles. Il serait donc nécessaire de faire une revue des méthodes et outils existants et de choisir et adapter ceux qui conviennent le mieux pour le traitement et la validation des données du RSESQ.

Il serait aussi important de pouvoir détecter et éliminer les valeurs aberrantes de niveau d'eau dans les séries de données. Ces valeurs aberrantes peuvent être dues à des mesures prises en dehors du puits par la sonde de pression d'eau lors du téléchargement des données ou à un mauvais fonctionnement des sondes. Des exemples de données aberrantes sont présentés à la figure 5.2 et à la figure 5.3 pour les puits 05080001 et 03090007 du RSESQ situés respectivement à Pont-Rouge et Havelock. Des valeurs aberrantes peuvent également être introduites dans les données lorsqu'une sonde de pression d'eau est dénoyée pendant une certaine période (niveau d'eau plus bas que la sonde) ou lorsqu'une sonde barométrique dont les données sont utilisées pour la compensation barométrique est inondée (niveau d'eau plus haut que la sonde). Un exemple de telles données aberrantes causées par une inondation de la sonde barométrique est présenté à la figure 5.4 pour le puits 02180001 du RSESQ à Padoue. Il serait donc nécessaire de détecter et d'éliminer ou corriger ces valeurs aberrantes pour l'ensemble des données du RSESQ. Comme pour les discontinuités, des outils existent pour détecter les valeurs aberrantes dans les séries temporelles. Il serait donc nécessaire de faire une revue de ces outils et de voir lesquels pourraient être adaptés aux besoins du RSESQ.

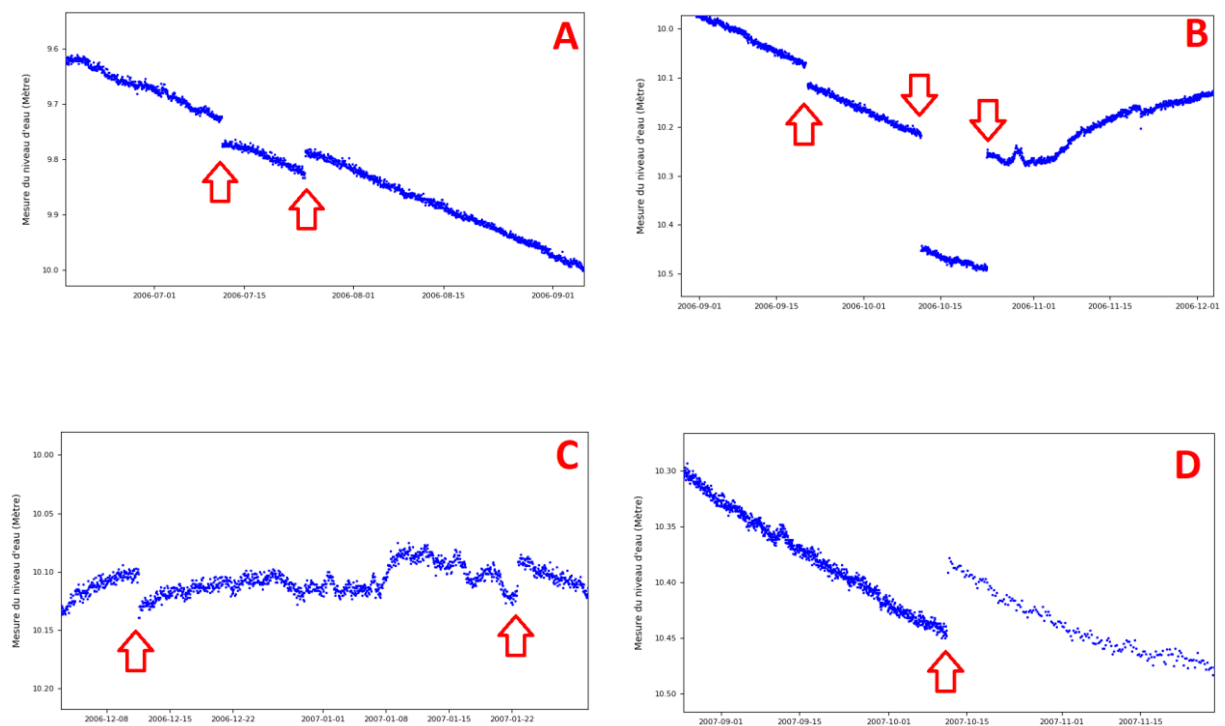
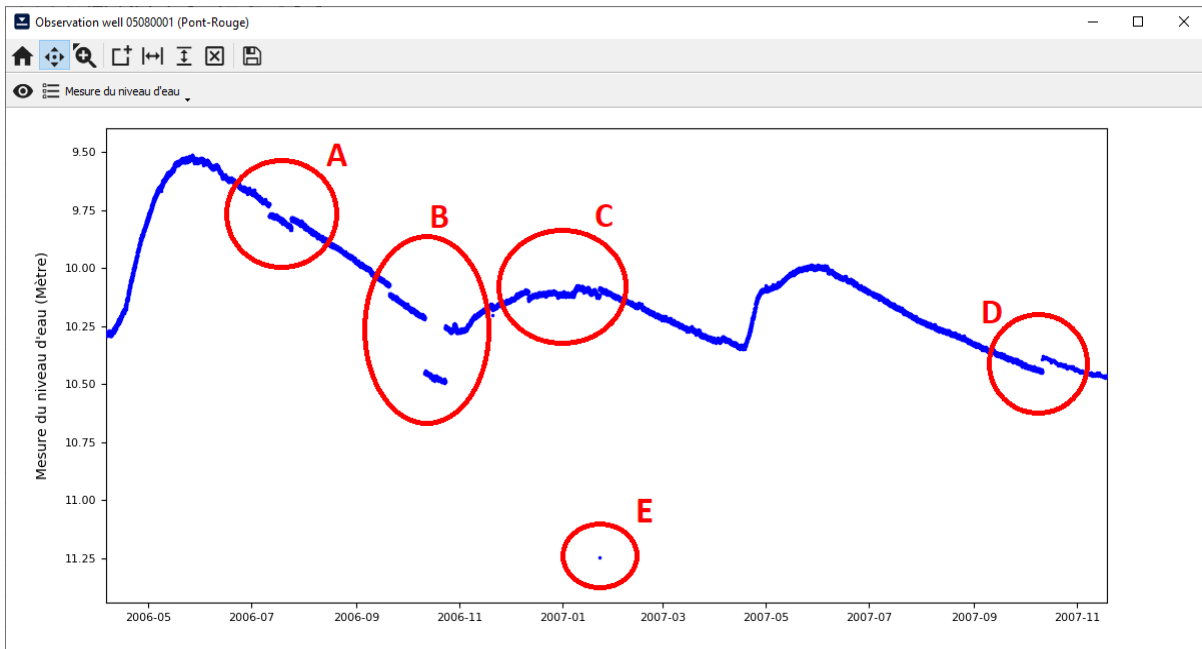


Figure 5.2 – Données de niveaux d'eau mesurées dans le puits 05080001 du RSESQ à Pont-Rouge entre 2006 et 2007. Les cercles rouges A à D inclusivement soulignent des discontinuités dans les niveaux d'eau mesurés dans le puits alors que le cercle rouge E montre une valeur aberrante.

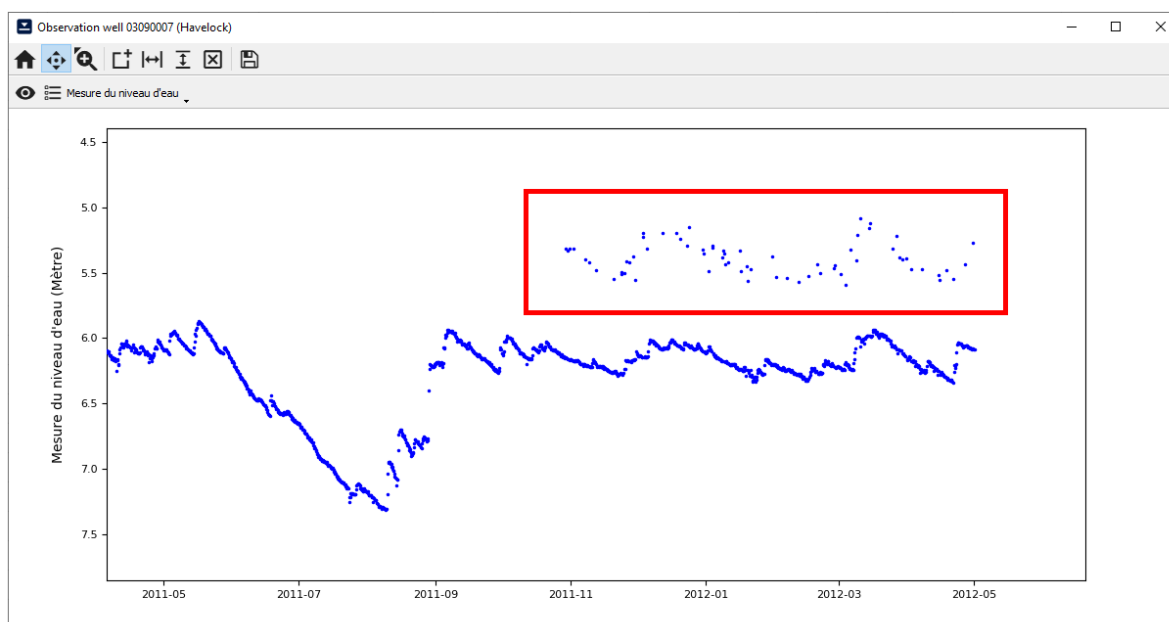


Figure 5.3 - Données de niveaux d'eau mesurées dans le puits 03090007 du RSESQ à Havelock montrant plusieurs valeurs aberrantes (dans l'encadré rouge) dans les données pour la période 2011-2012.

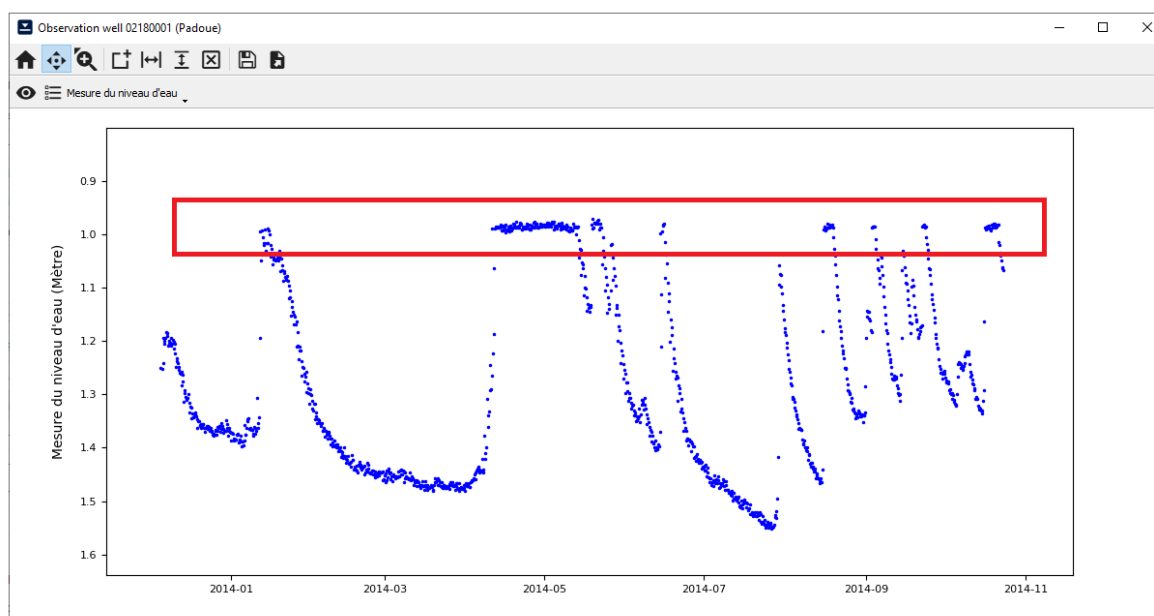


Figure 5.4 - Données de niveaux d'eau mesurées dans le puits 02180001 du RSESQ à Padoue montrant dans l'encadré rouge des données aberrantes de niveau d'eau dues à l'inondation de la sonde barométrique dans le puits à plusieurs reprises durant cette période.

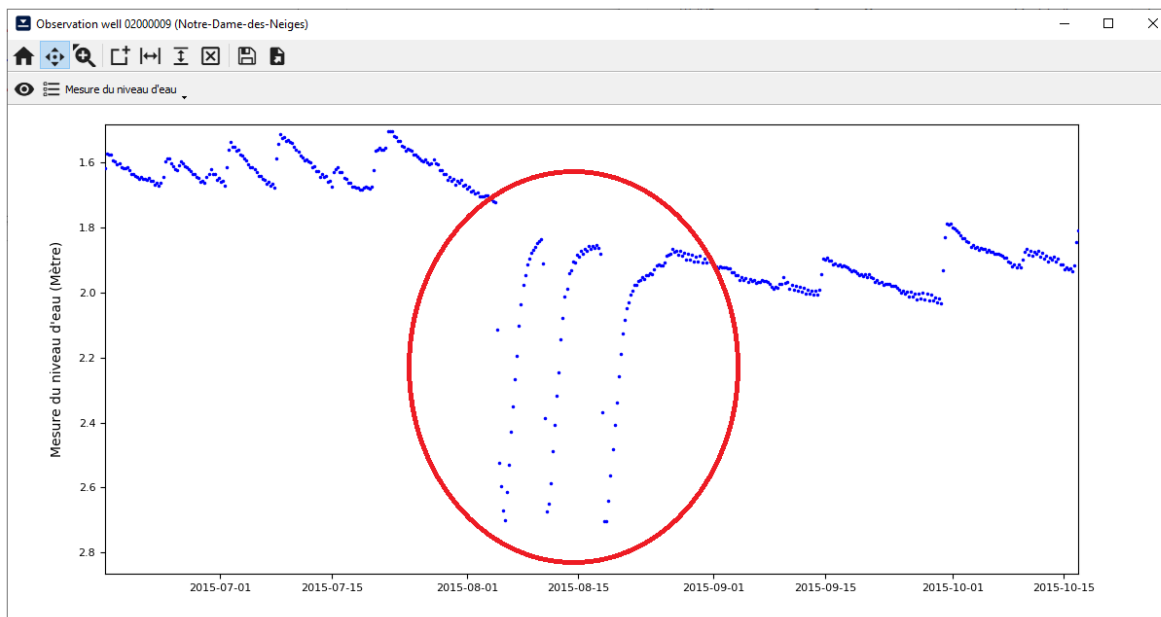


Figure 5.5 - Données de niveaux d'eau mesurées dans le puits 02000009 du RSESQ à Notre-Dame-des-Neiges montrant dans l'encadré rouge des variations du niveau d'eau dans le puits causées par des activités anthropiques saisonnières de pompage à proximité du puits.

Enfin, il serait aussi nécessaire de pouvoir identifier les variations soudaines réelles, mais non naturelles, des niveaux d'eau dans les puits. Ces variations peuvent être causées par du pompage dans le puits même lors de campagnes d'échantillonnage des eaux souterraines ou lors de tests de pompage ou encore par des activités anthropiques à proximité du puits d'observation. Les données correspondant à des niveaux d'eau influencés par des essais faits dans le puits devraient alors être éliminées des séries de données publiées sur Internet, ce qui est déjà fait actuellement par les opérateurs du réseau. En ce qui concerne les niveaux d'eau influencés par des activités anthropiques qui peuvent être identifiés clairement, ces données pourraient être conservées dans la série de données, mais une remarque pourrait être ajoutée aux lectures pour qualifier leur statut via un code. Cette recommandation est discutée plus en détail à la section 8. Un exemple de niveaux d'eau affectés par des activités anthropiques saisonnières à proximité du puits est présenté à la figure 5.5 pour le puits 02000009 du RSESQ à Notre-Dame-des-Neiges.

En résumé de cette section, nous soulignons qu'il serait primordial d'éliminer les valeurs aberrantes dans les données de niveau d'eau du RSESQ et d'identifier les variations des niveaux d'eau causées par des activités anthropiques à proximité des puits. Il serait ensuite nécessaire d'assurer que les séries temporelles de niveaux d'eau aient une variation continue dans le temps en éliminant les discontinuités dans les données. Les valeurs de l'ensemble des données pour un puits pourraient ensuite être ajustées de façon à minimiser l'erreur entre les mesures manuelles et les mesures automatiques. Lors de l'ajout de nouvelles données de niveau d'eau, il serait également important de détecter et d'éliminer à mesure les valeurs aberrantes et les discontinuités dans les données. Les opérations de correction des niveaux d'eau devraient également être normalisées et documentées de façon automatique dans la base de données. Pour ce faire, le Ministère devrait se doter de capacités pour visualiser de façon interactive les données du RSESQ ainsi que d'outils pour faire la détection et la correction des erreurs dans ces données. La visualisation interactive implique que les opérateurs puissent voir les données en même temps que les corrections sont appliquées afin de vérifier visuellement que la correction produit bien l'effet escompté (voir section 12).

5.5 Preuves de concepts

Afin de démontrer la faisabilité de plusieurs des recommandations émises dans ce rapport, des utilitaires de stockage et d'exploitation de données piézométriques développés par l'INRS en marge de travaux de recherche antérieurs (PACES Montérégie Est et Chaudière-Appalaches) et en voie de réalisation (projet de recherche PACC) ont été fournis au Ministère comme preuves de concepts. Ces utilitaires sont constitués d'une base de données SQL basé sur le standard ISO 19156 (*Observations and measurements*) de l'*Open Geospatial Consortium* (OGC)⁴ (voir section 12) et d'un ensemble d'outils Python développés avec des technologies entièrement *Open Source* et visés par une licence GPLv3. Les principaux outils fournis au Ministère sont les suivants :

- SARDES, un outil de stockage et de gestion des données du RSESQ (section 12);
- GWHAT, un outil pour l'estimation de la recharge (section 10.1) permettant aussi l'estimation de la fonction de réponse barométrique (section 9) et la production d'hydrogrammes de puits intégrant les données météorologiques (section 6, figure 6.2; section 8, figure 8.3);
- CDPREP (*Climate Data Preprocessing Tool*), un outil pour le téléchargement des données météorologiques diffusées par Environnement Canada et le comblement des données manquantes à partir des stations météorologiques environnantes (cette fonction initialement intégrée à GWHAT a été séparée et reprogrammée);
- PyHELP, un outil pour aider à l'utilisation du logiciel HELP pour l'estimation régionale et spatialement distribuée de la recharge (section 10.2);
- Divers outils ont aussi été produits, notamment pour documenter les caractéristiques des données contenues dans la base de données du RSESQ (figure 6.1; figure 13.1) ainsi que pour produire des hydrogrammes statistiques des données de niveau d'eau à un puits (figure 7.2) (<https://github.com/cgq-qgc/pacc-inrs>).

⁴ www.opengeospatial.org/standards/om

6 DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

Mandat : Identifier les données météorologiques (ex. : données de la grille InfoClimat) qui devraient être diffusées conjointement avec les données piézométriques des stations du RSESQ et recommander au Ministre l'approche à privilégier pour représenter ces données parallèlement aux mesures de niveau d'eau.

Les variations du niveau de l'eau souterraine sont intimement liées aux conditions climatiques. Il est donc important de pouvoir interpréter les données de niveaux d'eau conjointement aux données climatiques afin de mettre en contexte les comportements observés de la nappe phréatique. De plus, les données météorologiques sont utiles pour l'évaluation de la recharge aux puits en nappe libre. Ceci sera d'ailleurs discuté plus en détail à la section 10.

Au Québec, des données climatiques horaires et journalières sont acquises aux stations du Réseau de surveillance du climat du Québec (RSCQ) et du Réseau météorologique coopératif du Québec (RMCQ) (Lepage et Bourgeois 2011). Cependant, ces jeux de données météorologiques contiennent beaucoup de données manquantes et leur période d'enregistrement varie beaucoup d'une station à l'autre, ne permettant ainsi souvent pas de couvrir toute la période d'enregistrement des données de niveau d'eau du RSESQ. De plus, les stations climatiques ne sont pas nécessairement localisées à proximité des puits d'observation, ce qui peut introduire des erreurs et des biais lors de la comparaison et de l'interprétation de ces données. Par exemple, la figure 6.1 présente un diagramme à bande montrant le nombre de stations du RSESQ en fonction de la distance à la station climatique la plus proche pour laquelle des données publiques sont disponibles sur le site Internet d'Environnement Canada. Puisque les données des stations météorologiques du Québec qui ne sont pas distribuées par Environnement Canada ne sont pas libres d'accès, seulement les stations accessibles librement ont été considérées pour la production de la figure 6.1. Il serait intéressant de reproduire ce même graphique en utilisant la localisation de l'ensemble des stations pour lesquelles des données climatiques sont disponibles au Québec et non simplement à partir des stations apparaissant sur le site Internet d'Environnement Canada. La figure 6.1 montre que seulement 40% des stations du RSESQ sont situées à moins de 10 km d'une station climatique. Ce graphique ainsi que ceux de la figure 13.1 pourraient aussi être ajoutés au site Internet du RSESQ afin de guider les utilisateurs des données de niveau d'eau. Tel que mentionné à la section 4.1, d'autres outils de recherche des données pourraient aussi faciliter l'exploitation des données du RSESQ.

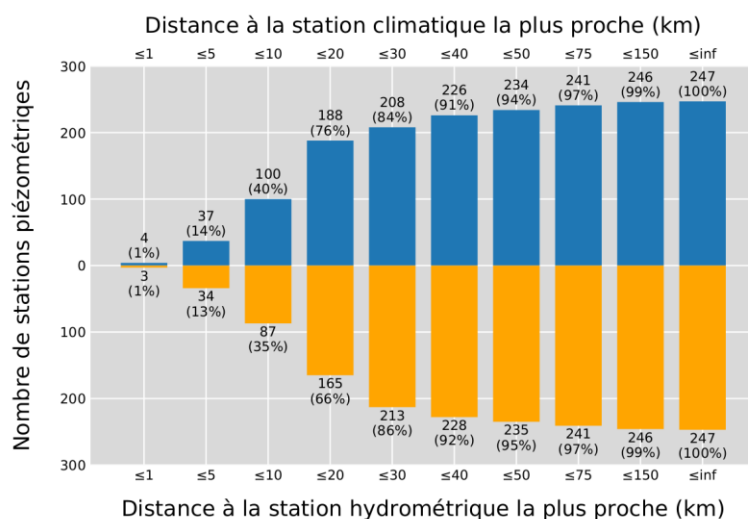


Figure 6.1 - Nombre de stations piézométriques du RSESQ en fonction de la distance aux stations climatiques les plus proches pour lesquelles des données sont disponibles sur le site Internet d'Environnement Canada (en bleu) et en fonction de la distance aux stations hydrométriques les plus proches du CEHQ (en jaune).

Les données manquantes et la période d'enregistrement parfois limitée des données climatiques, de même que la distance parfois importante entre les stations climatiques et piézométriques, sont des obstacles majeurs pour l'utilisation des données climatiques mesurées pour interpréter et analyser les données de niveaux d'eau. Combler les valeurs manquantes et interpoler les données météorologiques peut rapidement devenir une tâche fastidieuse et complexe. Ceci est particulièrement vrai pour les précipitations quotidiennes en raison de leur grande variabilité spatiale et temporelle et de la complexité des processus physiques impliqués (Simolo et al. 2010).

Heureusement, la Direction de l'information sur le milieu atmosphérique (DIMAT) de la Direction générale du suivi de l'état de l'environnement (DGSEE) produit depuis 2015 des données climatiques quotidiennes sur grille à partir des mesures prises aux stations avec observateurs et aux stations automatiques du RSCQ et du RMCQ (Bergeron 2017). La version actuelle de ces données sur grille concerne les précipitations totales quotidiennes (solides et liquides), les températures minimale et maximale quotidiennes et la variance d'interpolation associée à chacune de ces trois variables. Le domaine spatial couvre tout le Québec, y compris les portions hors Québec des bassins versants de la rivière des Outaouais et de la rivière Richelieu alors que le domaine temporel total correspond à la période qui s'étend du 1^{er} janvier 1961 au 31 décembre 2017. Les données sont scindées par année en fichiers NetCDF. Bien que les données météorologiques sur grille présentent de nombreux avantages par rapport à l'usage des données provenant des stations météorologiques, il n'y a pas présentement de données sur grille qui sont disponibles avec peu de délai. Ainsi, afin de représenter des mesures de niveau d'eau souterraine récentes en relation avec des données météorologiques, il est nécessaire d'utiliser des données provenant de stations météorologiques. Il est aussi souhaitable d'utiliser des données météorologiques qui sont librement accessibles.

Les données climatiques devraient être exploitées pour mettre en valeur les données de niveaux d'eau parce que l'interprétation des niveaux d'eau observés dans les puits est beaucoup plus facile et informative lorsque ces niveaux sont tracés conjointement aux données climatiques sur un même graphique. Pour illustrer le tout, prenons l'exemple du puits 05040001 du RSESQ situé à Saint-Léonard-de-Portneuf dont l'hydrogramme est présenté dans la portion inférieure du graphique de la figure 6.2. Des données climatiques hebdomadaires (température de l'air et précipitations) produites à partir des données extraites de la grille climatique quotidienne du RSCQ au point le plus près du puits sont aussi affichées sur la portion supérieure de ce graphique. On remarque d'abord sur ce graphique que la remontée des niveaux d'eau en janvier 2007 et 2008 peut s'expliquer par de la recharge causée par des redoux hivernaux caractérisés sur le graphique par des températures de l'air plus chaudes et des précipitations sous forme liquide. Il est aussi possible d'associer sur le graphique la recharge printanière qui survient au mois de mars de chaque année avec le début de la fonte de la neige en surface alors que la température de l'air passe au-dessus de zéro. On remarque aussi que la recharge du printemps 2007 a été beaucoup moins importante que celle de 2008 et 2009, en raison probablement des accumulations de neige moins importantes durant l'hiver 2006-2007. On peut également constater que de la recharge est possible à ce puits durant la période estivale lorsque l'intensité des précipitations est suffisante, tel qu'observé durant les étés 2007 et 2008. À l'inverse, la recharge estivale ne semble pas significative pour les années 2006 et 2009, alors que l'intensité des précipitations durant cette période semble moins importante. Enfin, on observe sur ce graphique l'occurrence d'une recharge d'automne de faible amplitude causée par les températures plus faibles et les précipitations plus importantes qui sont caractéristiques de cette période de l'année au Québec. On note que la recharge automnale de 2006 est significativement plus élevée que pour 2007 et 2008. Ceci pourrait être expliqué à partir du graphique par les précipitations plus importantes qui sont survenues à l'automne 2006 par rapport aux deux autres années.

Cet exemple simple démontre que les données météorologiques pourraient être utilisées pour valoriser sans trop d'effort les données piézométriques du RSESQ. L'information contenue dans les données de la grille climatique quotidienne du RSCQ pourrait aussi servir à produire une variété d'indicateurs permettant d'exploiter davantage l'information contenue dans les données du RSESQ. Par exemple, il serait possible de calculer l'évapotranspiration potentielle de référence à partir de ces données, ce qui permettrait de faire une interprétation encore plus ferme des épisodes avec de la recharge estivale, comme ceux observés dans l'hydrogramme du puits 05040001 de la figure 6.2.

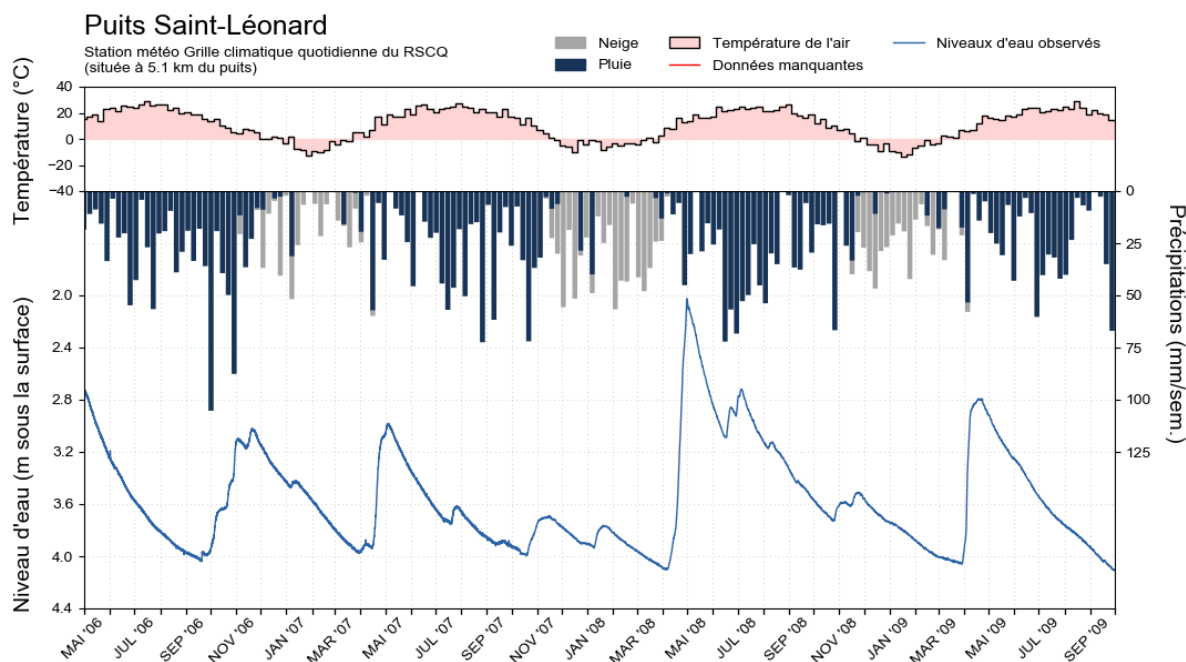


Figure 6.2 - Hydrogramme pour la station 05040001 du RSESQ situé à Saint-Léonard-de-Portneuf. Les données météo extraites de la grille climatique quotidienne du RSCQ au point le plus près de la localisation du puits sont aussi affichées sur le graphique sur une base hebdomadaire.

Il faut rappeler que le RSESQ a été déployé dans le cadre des plans d'action sur les changements climatiques et que la mission de ce réseau vise à recueillir les données permettant d'évaluer l'effet des changements climatiques sur la ressource en eau souterraine au Québec. Or, il est impossible d'analyser l'impact des changements climatiques sur les niveaux et la recharge des eaux souterraines sans avoir accès à des séries de données climatiques complètes et de qualité. Considérant le rôle joué par les conditions climatiques sur les variations saisonnières et les tendances à long terme des niveaux d'eau, il serait donc cohérent avec la mission du RSESQ de déployer des efforts pour mettre en relation, via différents produits, les données de niveau d'eau avec les données climatiques.

Si les données à jour de la grille climatique quotidienne du RSCQ étaient produites de façon régulière, il serait important que la DEPES ait accès à ces données à jour et qu'il se dote d'outils pour manipuler et visualiser ces données conjointement aux données piézométriques du RSESQ. Si les données climatiques sur grille ne sont pas produites de façon régulière, il faudra identifier une autre source de données climatiques à mettre en relation avec les données de niveau d'eau; la source la plus simple étant les données des stations météorologiques.

Les recommandations émises à la section 5.1 concernant le stockage des données faciliteraient l'intégration de données climatiques dans la base de données même du RSESQ, ce qui faciliterait l'accès à ces données. Dans un deuxième temps, il serait aussi très pertinent et utile pour les utilisateurs des données du RSESQ d'avoir accès sur le site Internet du Ministère aux données climatiques provenant de sources les plus près de la localisation des puits conjointement aux données piézométriques. Si elles sont publiques, ces données climatiques pourraient être publiées sur le site Internet du RSESQ sous la forme d'un chiffrier Excel additionnel qui pourrait être téléchargé à partir des infobulles de la carte Google (voir figure 3.2). Les données climatiques pourraient aussi être ajoutées aux hydrogrammes de puits qui sont produits et distribués en format PDF pour chacun des puits du RSESQ sur le site Internet du Ministère (voir section 8). Cela permettrait non seulement de faciliter l'interprétation des données piézométriques par les utilisateurs du RSESQ, mais également d'uniformiser les entrants des différents travaux de recherche qui sont réalisés sur ces données, ce qui faciliterait la comparaison des résultats entre eux. Différents indicateurs pourraient ensuite être dérivés à partir des données climatiques et mis en relation avec les données piézométriques, ce qui permettrait d'exploiter davantage les données du réseau et faciliterait leur utilisation pour le suivi et la gestion des ressources en eaux souterraines du Québec.

7 HYDROGRAMMES STATISTIQUES

Mandat : *Développer une méthodologie pour la production d'hydrogrammes statistiques représentant les variations historiques des niveaux d'eau des stations du RSESQ par rapport aux niveaux actuels, et formuler au Ministre les recommandations particulières relatives à l'approche à privilégier pour en incorporer l'application aux opérations de gestion du RSESQ et en faciliter la diffusion sur le site Internet du MELCC.*

L'*United States Geological Survey* (USGS) gère plusieurs réseaux de suivi des niveaux d'eau souterraine aux États-Unis, notamment le *Climate Response Network* (<https://groundwaterwatch.usgs.gov/>). L'USGS publie des statistiques mensuelles des données piézométriques pour l'ensemble des puits de son réseau avec une période d'enregistrement adéquate. Pour ce faire, les données piézométriques disponibles pour chacun des puits sont d'abord regroupées par année et par mois et la valeur moyenne de chaque groupe est ensuite utilisée pour représenter un mois donné dans une année donnée. Ces valeurs mensuelles moyennes sont ensuite mises en commun pour chacun des 12 mois de l'année. Le minimum, la médiane et le maximum des niveaux mensuels moyens sont ensuite calculés pour chacun des mois de l'année contenant au moins 4 valeurs. Les percentiles (10, 25, 50, 75, 90) des niveaux mensuels moyens sont aussi calculés pour chaque mois avec au moins 10 valeurs. Aucune statistique n'est calculée pour les mois avec moins de 4 valeurs parce que ces statistiques n'ont pas réellement de sens avec un nombre aussi limité de valeurs. Nous recommandons ainsi de produire des hydrogrammes statistiques uniquement aux stations où plus de 4 années de données sont disponibles.

Ces statistiques sont ensuite publiées sur le site Internet de l'USGS sous la forme de tableaux et d'hydrogrammes statistiques (figure 7.1). La distribution statistique des niveaux mensuels moyens est représentée graphiquement par des bandes de couleur (figure 7.1b). Le schéma de couleurs utilisé est le même que celui des autres cartes du réseau de réponse climatique des États-Unis. La valeur médiane des niveaux mensuels moyens est indiquée pour chaque mois par un triangle vert. Le nombre d'années avec des mesures disponibles est indiqué pour chaque mois entre parenthèses. Les niveaux d'eau de la dernière période de 12 mois sont aussi tracés sur cet hydrogramme statistique annuel avec des points rouges. Cette représentation des données constitue un outil d'analyse et de suivi puissant qui permet de comparer facilement les données récentes de niveaux aux conditions historiques des nappes phréatiques au cours d'un mois donné.

On remarque toutefois sur le graphique de la figure 7.1b que les données récentes pour les mois de novembre et décembre sont parfois supérieures aux valeurs maximales des niveaux mensuels moyens pour ces mois, ce qui introduit une incohérence au niveau de la comparaison des données récentes avec les conditions historiques. Pour éviter cela, il serait préférable de calculer la distribution statistique des niveaux d'eau pour chacun des mois de l'année en utilisant toutes les données de la période d'enregistrement, indépendamment de l'année à laquelle les données ont été acquises. Cela permettrait d'obtenir une comparaison visuelle plus cohérente des données récentes avec les conditions historiques. À titre d'exemple, la figure 7.2 présente deux hydrogrammes statistiques calculés pour la station 02167001 du RSESQ située à Matane pour laquelle des données piézométriques sont disponibles de 1979 jusqu'à aujourd'hui. Le graphique de gauche présente la distribution statistique des niveaux mensuels moyens calculée selon la méthode de l'USGS décrite précédemment alors que le graphique de droite présente la distribution statistique mensuelle des niveaux d'eau calculée en utilisant toutes les données disponibles pour chaque mois de l'année. Contrairement au graphique obtenu avec la méthode de l'USGS, on remarque que la courbe des données récentes sur le graphique de droite est bien circonscrite à l'intérieur des valeurs minimales et maximales de la distribution statistique mensuelle des niveaux d'eau, ce qui est beaucoup plus cohérent.

Toutefois, cette dernière approche n'est pas idéale lorsque le nombre de données pour un mois en particulier n'est pas le même d'une année à l'autre sur toute la période d'enregistrement. C'est d'ailleurs le cas pour les données plus anciennes du RSESQ qui ont été acquises avant l'utilisation des enregistreurs de pression, où seulement quelques données par mois sont disponibles. Puisque les données piézométriques sont fortement autocorrélées dans le temps (c'est-à-dire que la valeur du niveau piézométrique à un temps donné dépend fortement des valeurs antérieures), cela fait en sorte que le poids des données anciennes dans le calcul de la distribution statistique mensuelle est beaucoup plus faible, voire négligeable, par rapport au poids des données récentes acquises à grande fréquence.

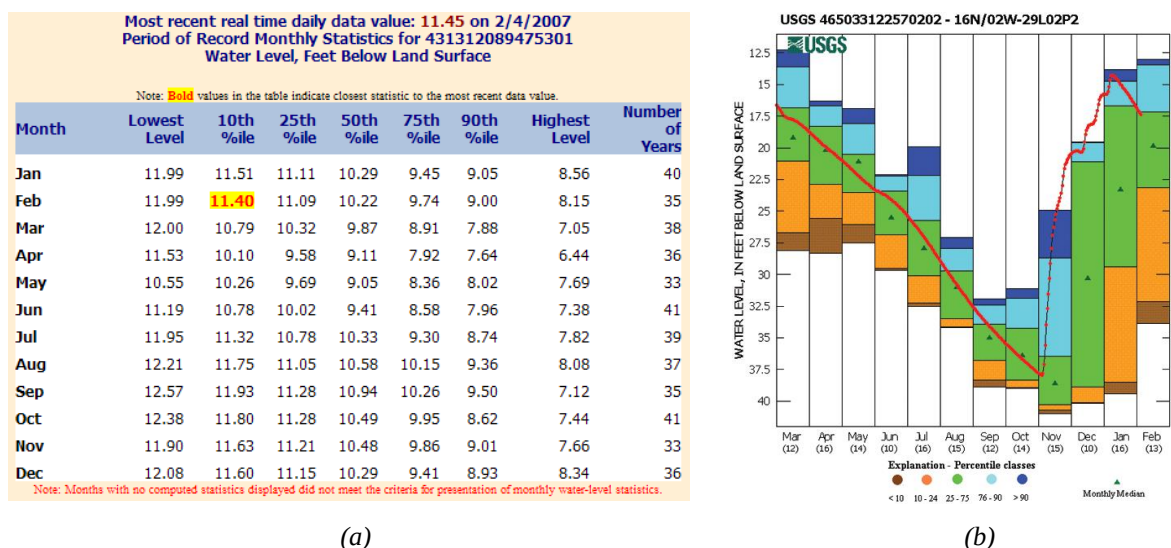


Figure 7.1 - Exemple (a) d'un tableau des valeurs numériques et (b) d'un hydrogramme statistique de la distribution mensuelle des niveaux piézométriques mesurés dans une des stations du réseau de suivi de l'USGS tel que publié sur le site Internet de l'USGS (U.S. Geological Survey 2007).

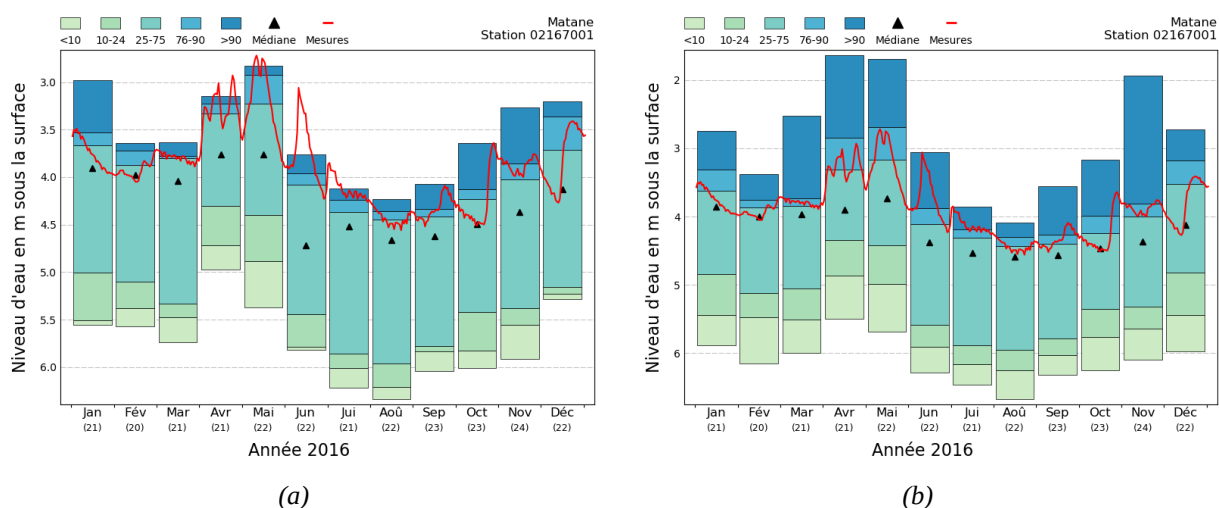


Figure 7.2 - Hydrogrammes statistiques produits pour l'année 2016 pour la station 0216001 du RSESQ située à Matane avec (a) la méthode des niveaux mensuels moyens utilisée par l'USGS et (b) en utilisant toutes les données disponibles pour chaque mois de l'année.

Une solution à ce problème consisterait à utiliser une méthode similaire à celle de l'USGS, mais de calculer la distribution statistique des niveaux d'eau à partir des valeurs minimum, médiane et maximum des niveaux d'eau disponibles pour chaque mois de chaque année (au lieu de n'utiliser que la moyenne). Les résultats obtenus avec cette approche pour la station de Matane sont présentés à la figure 7.3. Cette approche permet d'assurer la cohérence entre les données récentes et les conditions historiques, tout en donnant un poids équivalent aux données anciennes et récentes.

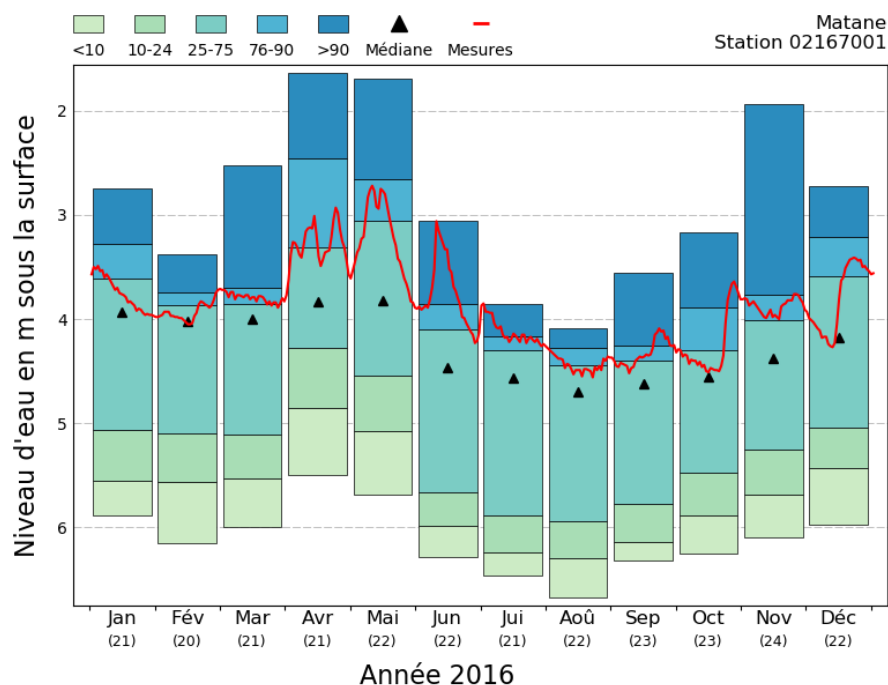


Figure 7.3 - Hydrogramme statistique produit pour l'année 2016 pour la station 0216001 du RSESQ situé à Matane avec la méthode des niveaux mensuels minimums, médians et maximums.

Dans le cadre du projet PACC de l'INRS, un outil Python a été développé pour produire automatiquement des hydrogrammes statistiques à partir des données officielles qui sont publiés par le Ministère sur son site Internet. Cet outil est disponible sur GitHub (<https://github.com/cgq-qgc/pacc-inrs>). Il serait facile d'adapter cet outil pour utiliser les données de production du RSESQ (au lieu des données publiques) et produire les hydrogrammes statistiques pour l'ensemble des puits du RSESQ avec suffisamment de données lors de la mise à jour des données du RSESQ (une ou deux fois par année). Ces résultats pourraient ensuite être publiés en format PDF sur le site Internet du Ministère. Les tableaux des valeurs numériques pourraient aussi être produits automatiquement et joints au fichier PDF de l'hydrogramme statistique. Alternativement, il serait envisageable d'incorporer ces résultats à la fiche signalétique des puits (section 4.3).

8 HYDROGRAMMES DES STATIONS DU RSESQ

Mandat : Formuler au Ministre des recommandations visant à améliorer le format de présentation des hydrogrammes des stations du RSESQ publiés sur le site Internet du MELCC, ainsi que sur la procédure à appliquer pour les produire.

Chaque année, les nouvelles données récoltées dans les puits du RSESQ (température, niveau piézométrique et conductivité électrique de l'eau) doivent être publiées sur le site Internet du Ministère. Pour ce faire, un utilitaire Visual Basic est d'abord utilisé pour répartir les données des puits dans de nouvelles tables de la base de données Access (une nouvelle table par puits du réseau de suivi). Lors de cette opération, seules les lectures prises à 1h00 AM sont préservées dans les nouvelles tables. Lorsqu'une seule lecture existe pour une journée donnée, elle est réputée être prise à 1h00 AM. Cette opération est faite afin de distribuer les données de niveau d'eau à une fréquence quotidienne uniforme. Une fois toutes les tables créées, l'utilitaire VB copie ensuite les données de chaque puits dans des fichiers en format Excel. Les fichiers Excel ainsi créés doivent toutefois être formatés de manière à répondre aux exigences de la publication sur Internet. Cette opération est réalisée à l'aide d'une macro qui fait la mise en page finale des fichiers Excel et génère des lignes blanches aux endroits où il y a des données manquantes dans les séries temporelles de données. Les lignes blanches dans les fichiers sont nécessaires pour assurer que les données manquantes ne soient pas interpolées dans les graphiques générés à l'aide de ces données. Un exemple de fichier Excel ainsi produit est présenté à la figure 8.1. Chaque fichier est constitué des éléments suivants :

- Une image avec le logo du ministère;
- Un en-tête incluant (1) le nom de la municipalité, (2) le numéro du puits et (3) l'altitude du sol au puits en mètres;
- Les données journalières de suivi incluant (1) la date en format yyyy-mm-dd (année-mois-jour), (2) l'altitude du niveau d'eau par rapport au sol en m et (3) la température en °C, si elle a été mesurée.

Une fois les fichiers de données Excel générés, des graphiques des hydrogrammes (niveaux d'eau en fonction du temps) en format PDF sont ensuite produits pour chacun des puits du RSESQ à l'aide d'une autre macro Excel (voir section 3). Un exemple d'hydrogramme ainsi généré est donné à la figure 8.2a pour le puits 4017011 situé à Mirabel.

Municipalité : Lac-Jacques-Cartier		
Numéro du piézomètre : 05107041		
Altitude du sol (m) : 756.19 (Géodésique)		
Date du relevé	Altitude du niveau d'eau (m)	Température de l'eau (°C)
1968-07-04	756.03	
1968-07-05	755.99	
1968-07-06	756.11	
1968-07-09	756.06	
1968-07-10	756.32	
1968-07-11	756.27	
1968-07-12	756.23	
1968-07-15	756.06	
1968-07-16	756.29	
1968-07-17	756.18	
1968-07-18	756.13	
1968-07-19	756.10	

Figure 8.1 - Exemple de fichier de données Excel pour le puits 05107041 du RSESQ à Lac-Jacques-Cartier tel que publié actuellement sur le site Internet du Ministère. Les cercles rouges indiquent les endroits dans le fichier où le logo du Ministère est manquant et où un mauvais caractère est utilisé pour les degrés Celsius.

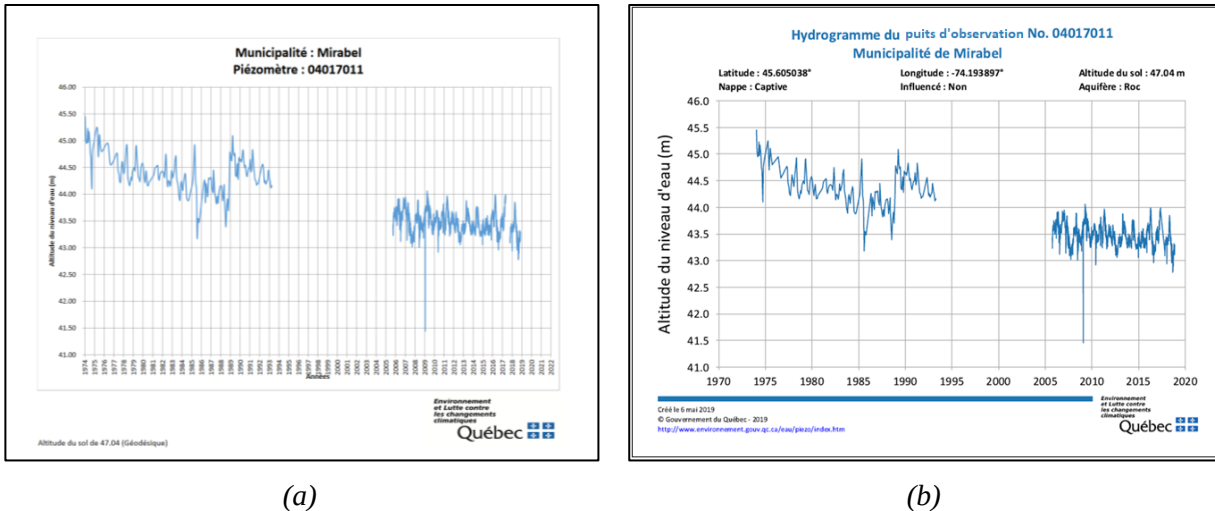


Figure 8.2 - Graphiques de l'hydrogramme du puits 04017011 du RSEQ à Mirabel (a) tel que publié actuellement sur le site Internet du Ministère et (b) après avoir appliqué les recommandations de mise en forme émises dans cette section.

Plusieurs recommandations peuvent être émises pour optimiser la séquence d'opérations nécessaires à la production des fichiers Excel et PDF et pour améliorer le format de présentation des données et des graphiques. Premièrement, des problèmes de présentation doivent être corrigés au niveau du logo du Ministère qui n'apparaît pas dans les fichiers Excel publiés sur le site Internet (voir figure 8.1). De plus, le symbole utilisé pour représenter les degrés Celsius pour la température est erroné. Le caractère « indicateur ordinal masculin » (00BA) est utilisé au lieu du caractère approprié pour représenter les degrés (00B0). Il serait donc nécessaire de corriger ces deux problèmes dans la mise en page des fichiers actuels.

Deuxièmement, il serait plus juste de référer aux stations du RSEQ dans les fichiers de données et les graphiques en tant que « puits d'observation » lorsque la station est un puits d'observation et en tant que « piézomètre » lorsque la station est un piézomètre. Une option alternative serait de référer aux stations du RSEQ par le terme « station » ou « station de suivi piézométrique » dans les fichiers de données et les graphiques. À titre informatif, un puits d'observation est ouvert à la nappe d'eau souterraine environnante sur la majeure partie de la longueur du forage. Ainsi, le niveau d'eau mesuré dans les puits d'observation correspond à une valeur intégrée de la charge hydraulique de l'eau le long de toute la partie ouverte du forage. À l'inverse, un piézomètre est ouvert à la nappe d'eau souterraine seulement à la pointe du tubage enfoncée dans le sol où le long d'une section restreinte de sa longueur. Conséquemment, le niveau d'eau mesuré dans les piézomètres correspond à une valeur ponctuelle de la charge de l'eau souterraine à une profondeur spécifique correspondant généralement à la profondeur du forage. La majorité des stations du RSEQ sont en réalité des puits d'observation et non des piézomètres.

Troisièmement, la production des fichiers de données Excel et des hydrogrammes en format PDF nécessite une succession d'actions manuelles requérant chacune une très bonne connaissance de plusieurs logiciels. Il serait possible de réduire significativement le nombre d'étapes et la complexité de la procédure actuelle pour produire les fichiers de données et les graphiques grâce au développement d'outils plus appropriés. Notamment, il ne devrait pas être nécessaire de créer de nouvelles tables pour produire les fichiers de données Excel de chacun des puits du RSEQ. Le nouvel outil devrait pouvoir faire une requête appropriée dans la base de données pour extraire les données requises et devrait réorganiser ces données en mémoire avant de les sauvegarder dans le format Excel sans devoir créer de nouvelles tables dans la base de données.

De même, les graphiques des hydrogrammes de puits devraient pouvoir être produits sans nécessiter la production des fichiers Excel au préalable. Idéalement, ces deux opérations pourraient être réalisées simultanément et de façon indépendante. Enfin, le format de présentation Excel et PDF semble pour le moment idéal, considérant les capacités technologiques limitées du site Internet du Ministère pour publier les données. Il serait éventuellement possible de produire des versions HTML des données et des hydrogrammes (à l'aide de la librairie D3.js⁵ par exemple) qui pourraient être publiés directement sur le site Internet du RSESQ et ne nécessitant pas de téléchargement de la part des utilisateurs. Toutefois, cela exigerait de changer la structure actuelle du site Internet. La disponibilité des données en format HTML pourrait faciliter le téléchargement automatisé des données de plusieurs puits. Ce type de téléchargement pourrait être réalisé par les utilisateurs ou cette fonctionnalité pourrait être ajoutée aux capacités de recherche des puits ayant une série d'attributs souhaités dont le développement à moyen terme a été recommandé à la section 4.1.

Au niveau du contenu des fichiers de données Excel, il serait d'abord nécessaire d'ajouter les informations retrouvées dans les infobulles des stations de la carte Google (voir figure 3.2) à l'en-tête des fichiers et plus particulièrement les coordonnées latitude et longitude des stations. De même, la date de création du fichier devrait être ajoutée dans l'en-tête. L'ajout de lignes blanches pour signifier la présence de données manquantes ne devrait pas non plus être nécessaire. Ceci est fait actuellement en raison des limitations de l'outil utilisé pour produire les graphiques. Présentement, les données de suivi du RSESQ sont publiées avec un pas de temps journalier, même lorsque les données sont disponibles à une fréquence plus élevées dans la base de données. La publication des données sur une base journalière est certainement suffisante pour la majorité des utilisateurs des données du réseau. Toutefois, il devrait être possible d'exporter les données de la base de données en format Excel sans rééchantillonnage ou avec un pas de temps autre que journalier (ex. : horaire ou mensuel). Cela permettrait aux gestionnaires du réseau de répondre plus efficacement aux demandes provenant des utilisateurs qui ont des besoins plus spécialisés par rapport aux données de suivi. Il serait aussi intéressant d'ajouter un champ « *remarque* » au fichier Excel qui permettrait de qualifier le statut des données de niveau d'eau pour chaque lecture. Ces remarques pourraient être assignées via des codes dont les descriptions pourraient être données dans un lexique sauvegardé à même le fichier Excel. Les codes utilisés pourraient être établis à partir de ceux utilisés par la Direction de l'information sur le milieu atmosphérique (DIMAT) pour ses données climatiques (tableau 8.1) et par la Direction de l'expertise hydrique (DEH) pour les débits des rivières (tableau 8.2). Les remarques concernant le statut et la qualité des données devraient être diffusées aux usagers des données du RSESQ, mais d'autres remarques concernant la gestion interne des données du réseau pourraient être sauvegardées dans la base de données sans être diffusées.

Pour les graphiques des hydrogrammes (figure 8.2b), il serait possible d'améliorer le format de présentation des données en apportant quelques modifications au format actuel. Premièrement, il faudrait réduire l'espace dédié aux marges et enlever le cadre qui entoure le graphique. Les informations pertinentes de la fiche signalétique du puits pourraient ensuite être ajoutées en complément d'information sous le titre principal du graphique, tel que les coordonnées géographiques et le degré de confinement de la nappe. La taille du texte du titre des axes du graphique pourrait être augmentée. De plus, le titre de l'axe du temps pourrait être enlevé complètement puisqu'il est évident que la quantité exprimée par cet axe représente des années. Enfin, l'échelle de l'axe du temps devrait s'adapter à la période pour laquelle des données sont affichées sur le graphique de façon à avoir un nombre adéquat de divisions temporelles sur le graphique. Ainsi, pour des chroniques longues (comme à la figure 8.2), les divisions pourraient être de plusieurs années alors que pour les chroniques courtes elles pourraient être annuelles. De plus, il faudrait limiter la valeur maximale affichée

⁵ <https://d3js.org/>

sur l'axe du temps à l'année en cours. Enfin, la date de création du fichier devrait être ajoutée sur le graphique, de même qu'un hyperlien vers le site du RSESQ. Un exemple de graphique produit avec ces recommandations est présenté à la figure 8.2b.

Similairement aux recommandations émises à la section 5.2, il serait nécessaire de développer de nouveaux outils pour l'exportation des données de la base de données vers des fichiers Excel et pour la production des graphiques d'hydrogrammes en format PDF.

Tableau 8.1 - Lexique des commentaires utilisés par la Direction de l'information sur le milieu atmosphérique (DI-MAT) pour qualifier le statut des données climatiques journalières lors de leur publication⁶.

Symbole	Description
C	Cumulé
D	Douteux
E	Estimé
F	Forcé
I	Incomplet
K	Estimé (krigeage)
Q	Quantité inconnue
T	Trace

Tableau 8.2 - Lexique des commentaires utilisés par la Direction de l'expertise hydrique (DEH) pour qualifier le statut des données de débits des rivières lors de leur publication⁷.

Symbole	Description
C	Cumulé
E	La donnée est estimée
J	Un jaugeage a été exécuté à cette date
MC	La donnée représente un débit moyen converti
MJ	La donnée est une moyenne journalière
P	La donnée est provisoire
PL	La donnée correspond à la première lecture de niveau d'eau de la journée
R	Le débit est corrigé pour tenir compte de l'effet de refoulement
S	La donnée est saisie manuellement
Z	La donnée provient d'une redistribution temporelle des données enregistrées en raison d'une défectuosité de l'appareil de mesure

⁶ <http://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/surveillance/produits.htm>

⁷ <https://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/index.htm>

De plus, outre le format de présentation des fichiers PDF publiés sur le site Internet du RSESQ, il serait également utile pour le Ministère de se doter de la capacité de produire des graphiques sur demande pour un puits sélectionné et de pouvoir spécifier certains aspects de la mise en page, comme l'échelle de l'axe du temps et des niveaux d'eau. Pour ce faire, l'éditeur de figures de GWHAT qui a été développé pour produire des graphiques mettant en relation les données de niveau d'eau et les données météo dans le cadre du projet de doctorat de Jean-Sébastien Gosselin (Gosselin 2016) et du projet PACC de l'INRS pourrait être adapté aux besoins du RSESQ. Un aperçu de cet outil de GWHAT est présenté à la figure 8.3.

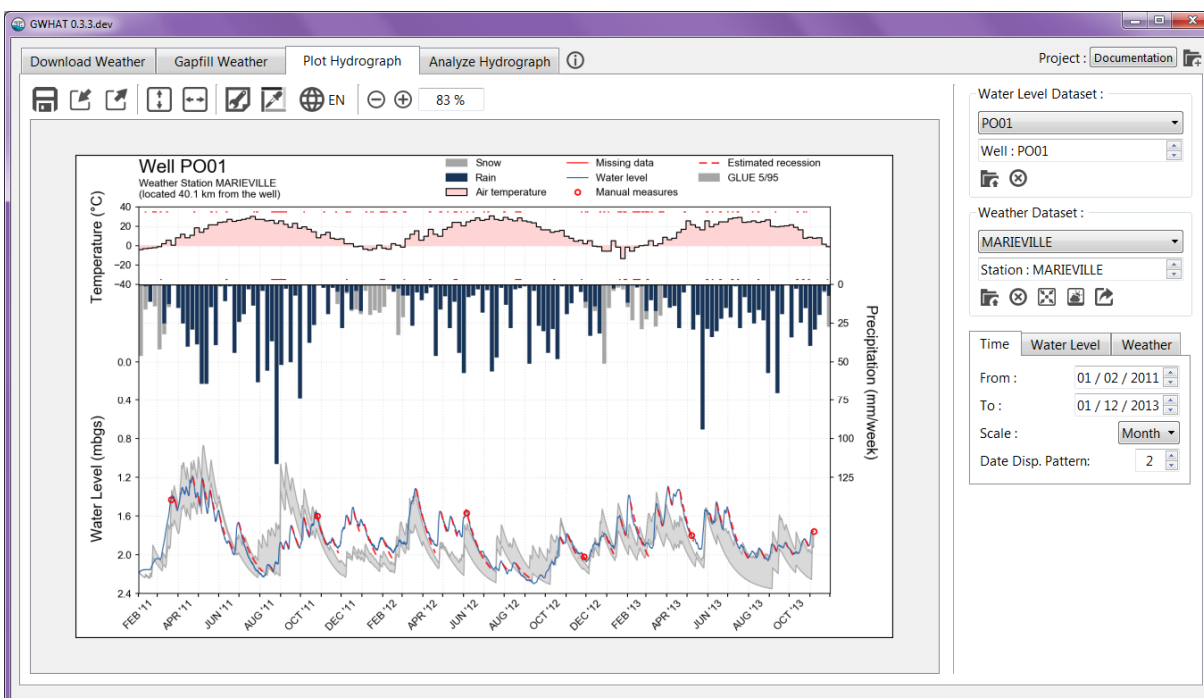


Figure 8.3 - Aperçu de l'éditeur permettant de produire des hydrogrammes dans GWHAT.

9 RÉPONSE BAROMÉTRIQUE ET CORRECTION DES NIVEAUX PIÉZOMÉTRIQUES

Mandat : Développer une méthodologie visant à évaluer, pour chacune des stations du RSESQ, la fonction de réponse barométrique et à effectuer la correction barométrique des niveaux piézométriques, ainsi que formuler au Ministre les recommandations particulières relatives à l'approche à privilégier pour en incorporer l'application aux opérations de gestion du RSESQ et en faciliter la diffusion sur le site Web du MELCC.

Les variations de la pression atmosphérique sont connues pour causer des fluctuations proportionnelles et opposées du niveau d'eau dans les puits. Un exemple de ce phénomène est illustré à la figure 9.1 où des mesures temporelles de niveaux d'eau et de pression atmosphérique acquises simultanément dans un des puits d'observation du RSESQ sont présentées sur un même graphique.

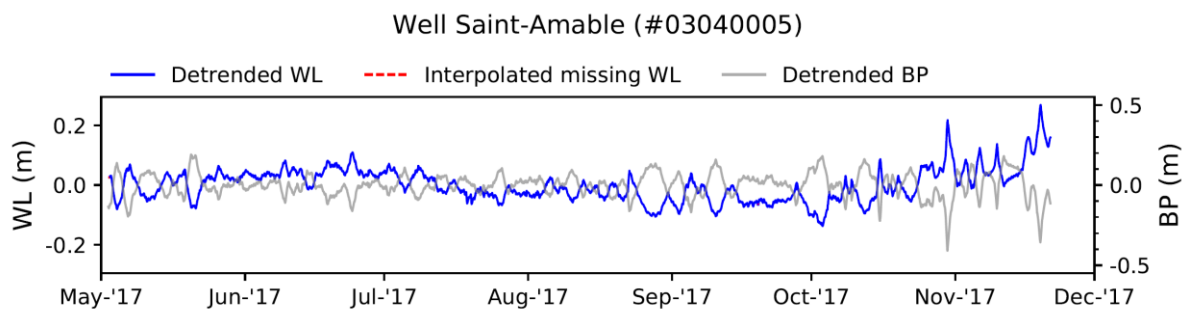


Figure 9.1 - Séries temporelles des niveaux piézométriques (WL) et barométriques (BP) mesurés aux 15 minutes dans le puits d'observation 03040005 du RSESQ à Saint-Amable illustrant les fluctuations proportionnelles et opposées du niveau d'eau dans le puits (en bleu) et de la pression atmosphérique (en gris).

Ce « bruit » dans les séries temporelles de données piézométriques contient de l'information qui peut être utilisée pour mieux caractériser le niveau de confinement des aquifères. Cela a d'ailleurs été démontré dans le cadre du projet PACC de l'INRS où le niveau de confinement des puits à l'échelle de la Montérégie Est a été déterminé par l'évaluation et l'interprétation de la fonction de réponse barométrique des puits (BRF : *Barometric Response Function*), une méthode d'analyse des séries temporelles de niveaux piézométriques et barométriques. Il est toutefois nécessaire d'avoir accès à des données acquises au moins toutes les heures pour que les résultats obtenus avec cette méthode soient valides. Lorsque les conditions le permettent, une fréquence d'acquisition de 4 mesures par heure (toutes les 15 minutes) est même à privilégier (Butler Jr. et al. 2011). À cette fin, les sondes de pression d'eau et barométriques installées dans les puits du RSESQ ont donc été programmées au cours de l'année 2017 pour enregistrer des données aux 15 minutes pour une période d'environ 1 an. En plus de fournir de l'information sur le confinement des aquifères, la BRF peut aussi être utilisée pour corriger les données piézométriques pour l'effet des variations barométriques. Ceci est souhaitable dans plusieurs applications, tel que pour la détection de tendances dans les niveaux piézométriques, l'évaluation des corrélations entre les niveaux et les variables climatiques et la production de cartes piézométriques.

Le projet PACC réalisé par l'INRS a déjà permis de développer la capacité de produire la BRF et de l'utiliser pour corriger les mesures piézométriques du RSESQ. Ces capacités ont d'ailleurs été appliquées à l'ensemble des puits du RSESQ compris à l'intérieur de la région d'étude du projet PACC (environ 36 000 km² au-delà de la rive sud du fleuve Saint-Laurent entre Montréal et Québec). Sur la base de ces

outils et de cette expérience de leur application, la section 9.1 ci-dessous décrit de façon générale une méthodologie qui pourrait permettre au Ministère d'évaluer la BRF et de faire la correction barométrique des niveaux d'eau mesurés dans l'ensemble des puits du RSESQ de 1980 à aujourd'hui alors que les sections 9.2 et 9.3 présentent des outils existants qui pourraient être utilisés par le MELCC pour mettre en œuvre les différentes étapes de la méthodologie proposée.

9.1 Méthodologie pour la correction barométrique des niveaux piézométriques

Cette section présente la méthodologie générale qui a été développée pour faire la correction des niveaux piézométriques du RSESQ. Tel que montré sur l'organigramme de la figure 9.2, la méthodologie développée est scindée en deux parties : 1) l'évaluation de la BRF et 2) l'utilisation de la BRF pour corriger les niveaux piézométriques journaliers mesurés dans les puits du RSESQ. Le rapport final de l'INRS pour le projet PACC donnera plus de détails techniques sur la démarche d'application des outils.

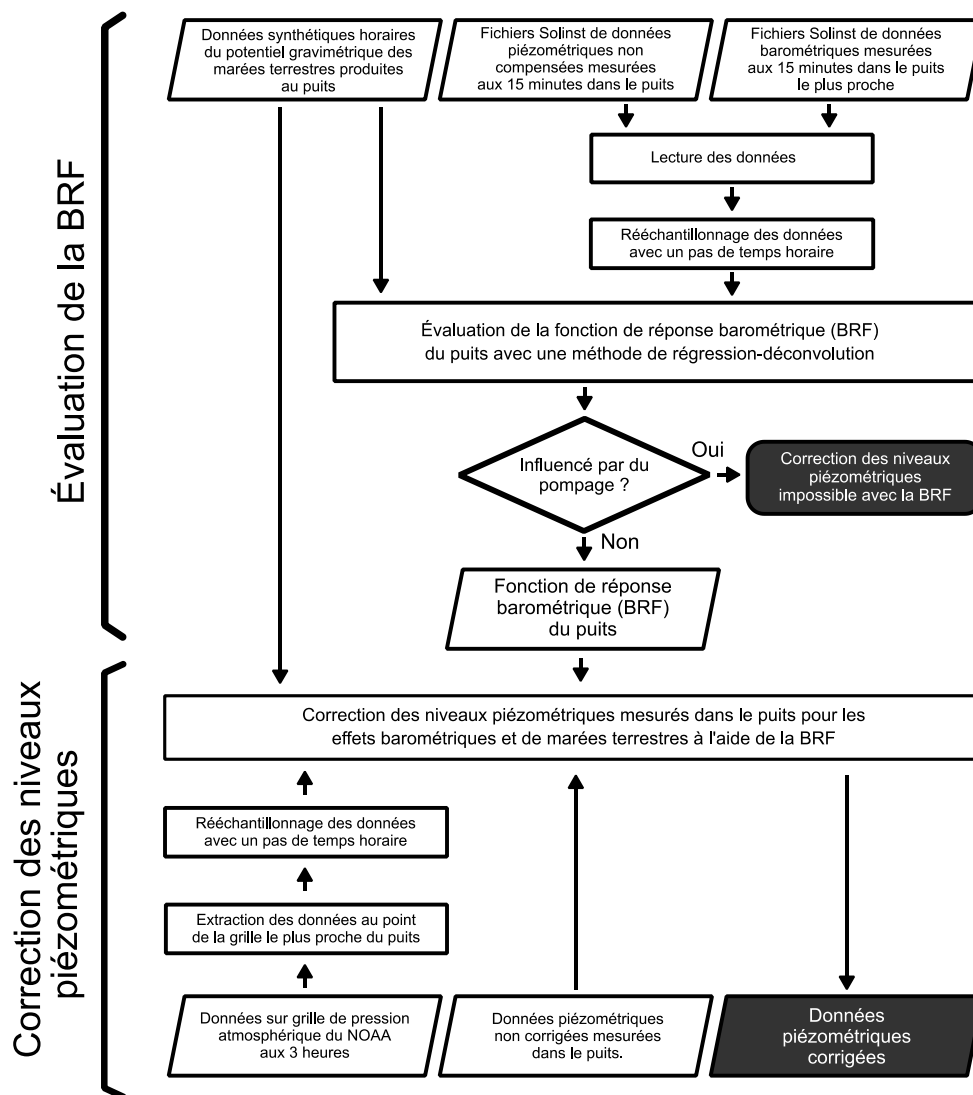


Figure 9.2 - Organigramme de la méthodologie proposée pour la correction des données piézométriques du RSESQ pour les effets barométriques et les marées terrestres à l'aide d'une méthode utilisant la fonction de réponse barométrique (BRF).

9.1.1 Évaluation de la BRF

La fonction de réponse barométrique peut être évaluée pour chacun des puits du RSESQ en suivant les trois étapes suivantes :

- 1.1a. Il est d'abord nécessaire de lire et formater l'ensemble des fichiers bruts Solinst qui contiennent les données de niveaux d'eau non compensés et de pression atmosphérique mesurées aux 15 minutes dans les puits du RSESQ. Cette étape est nécessaire puisque ces données ne sont actuellement pas sauvegardées dans la base de données du RSESQ. À noter que pour les puits qui ne sont pas équipés d'une sonde barométrique, il faudra utiliser les données de la sonde installée dans le puits le plus proche lors de l'évaluation de la BRF à l'étape 3 ci-dessous.
- 1.1b. Au terme de l'étape 1a, il est ensuite nécessaire de rééchantillonner les données de niveaux d'eau non compensés et de pression atmosphérique sur une base horaire. Malgré ce qu'en dit la littérature (Butler Jr. et al. 2011), des tests réalisés dans le cadre du projet PACC de l'INRS ont montré que pour la correction barométrique des niveaux d'eau, il est préférable d'évaluer la BRF avec des données horaires et non pas aux 15 minutes. Cela peut s'expliquer, entre autres, par le fait que la correction barométrique des niveaux piézométriques journaliers est faite à l'aide des données de pression atmosphérique de la grille NARR qui sont disponibles aux 3 heures.
- 1.2. En parallèle, des données synthétiques horaires de marées terrestres doivent être produites à chacun des puits pour la période allant de 1980 à aujourd'hui. Cela peut être fait à l'aide de l'un des outils recommandés à la section 9.3.
- 1.3. Les données horaires de niveaux d'eau, de pression atmosphérique et du potentiel de gravité des marées terrestres peuvent finalement être utilisées pour évaluer la BRF à chacun des puits de la zone d'étude. Pour ce faire, il est suggéré d'utiliser l'approche présentée par Butler et al. (2011) qui est basée sur la méthode de régression-déconvolution de Rasmussen et Crawford (1997). Le principe de cette approche consiste à résoudre un modèle de régression linéaire multiple qui représente la relation dans le domaine temporel entre les changements observés dans les données redressées du niveau piézométrique mesuré dans un puits d'observation, ΔW , avec les changements antécédents observés au puits dans les données redressées de la pression atmosphérique, ΔB , et du potentiel de gravité des marées terrestre, ΔE .

Ce modèle de régression linéaire multiple peut être exprimé sous la forme suivante :

$$\Delta W(t) = \sum_{i=0}^m \alpha_i \Delta B(t - i\Delta t) + \sum_{i=0}^m \beta_i \Delta E(t - i\Delta t) \quad \text{Équation 2}$$

où t est le temps, Δt est le pas de temps d'acquisition des données, i correspond au décalage temporel des variations de la pression atmosphérique et du potentiel de gravité des marées terrestre par rapport aux variations observées du niveau piézométrique, n et m sont les décalages temporels maximums considérés dans l'évaluation de la réponse des niveaux d'eau aux variations de la pression atmosphérique et du potentiel de gravité des marées terrestres, α_i et β_i correspondent aux coefficients de la fonction de réponse des niveaux piézométriques aux changements observés de la pression atmosphérique et du potentiel de gravité des marées terrestre.

Cette méthode d'évaluation de la BRF repose sur l'hypothèse que les changements observés du niveau piézométrique pour une période donnée ne sont fonction que des changements de la pression atmosphérique et du potentiel de gravité des marées terrestre. C'est pourquoi l'évaluation de la BRF avec cette méthode doit être faite à partir de données judicieusement sélectionnées durant les périodes de récession des niveaux d'eau, lorsque la recharge est supposée négligeable et ne produit pas de variations des niveaux d'eau. La BRF ne peut également pas être évaluée pour les

puits dont les niveaux d'eau sont influencés par du pompage. Cette technique est donc intéressante puisqu'elle fournit une méthode permettant d'identifier les puits influencés par du pompage. Toutefois, pour les puits influencés, il n'est alors pas possible de corriger les niveaux d'eau pour les effets des variations barométriques.

Il est également recommandé d'évaluer la BRF à partir de données de niveau d'eau mesurées en été ou à l'automne pour éviter que les résultats soient affectés par le gel et le couvert nival tel que discuté par Butler et al. (2011). De plus, suivant les recommandations émises par Huchet (2018), les analyses doivent être réalisées avec un délai temporel maximal de 24 heures, sauf pour les puits ayant une faible transmissivité et montrant un effet d'emménagement important.

À noter que la mise en œuvre de cette étape peut être facilitée grandement par l'utilisation de l'outil BRF intégré à GWHAT qui a été développé à cette fin dans le cadre du projet de recherche PACC (voir section 9.2).

9.1.2 Correction barométrique des niveaux piézométriques

Puisqu'il n'y a pas de données barométriques disponibles pour les anciennes mesures de niveau d'eau et que les données barométriques récentes (depuis les années 2000) n'ont pas été sauvegardées dans la base de données du RSESQ, nous recommandons d'utiliser les données barométriques de la grille du *North American Regional Reanalysis* (NARR)⁸ du NOAA *Earth System Research Laboratory* pour faire la correction barométrique des niveaux d'eau du RSESQ. Ces données sont disponibles aux 3 heures sur une période allant de 1979 à aujourd'hui pour tout le Québec avec une résolution spatiale d'environ 30 km². Des analyses réalisées dans le cadre du projet PACC de l'INRS ont permis de démontrer une excellente correspondance entre les données barométriques de la grille NARR et les données mesurées dans les puits du RSESQ pour l'année 2017. En raison de la plage sur laquelle les données de pression atmosphérique sont disponibles, la correction des données de niveaux d'eau avec la BRF est toutefois limitée aux mesures faites à partir de 1980 jusqu'à aujourd'hui.

La correction des données de niveaux d'eau du RSESQ avec la BRF peut donc se faire en trois étapes :

- 2.1. Dans un premier temps, les données barométriques de la grille NARR doivent être téléchargées du site FTP où ces données sont disponibles gratuitement en format NetCDF sous la forme de blocs de données annuels.
- 2.2. Il faut ensuite extraire les séries de données barométriques des fichiers NetCDF aux points de la grille NARR situés les plus près des puits du RSESQ et rééchantillonner les données sur une base horaire.
- 2.3. Il est enfin possible de corriger les données piézométriques pour les puits non influencés par du pompage pour la période allant de 1980 à la période la plus récente des données piézométriques à l'aide des BRF évaluées précédemment. Pour ce faire il suffit d'utiliser, pour chacun des puits, les données horaires redressées de pression atmosphérique de la grille NARR obtenues à l'étape 2.2, les données horaires synthétiques redressées du potentiel de gravité des marées terrestres produites à l'étape 1.2 et les valeurs des coefficients α et β des fonctions de réponses barométriques et de marées terrestres calculées à l'étape 1.3 pour calculer, avec l'équation 2, les variations correspondantes des niveaux piézométriques dans les puits.

La correction des niveaux piézométriques consiste ensuite simplement à enlever ces variations de niveaux piézométriques des niveaux non corrigés tel que :

⁸ <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.narr.html>

$$W_{corr}(t) = W_{brut}(t) - \Delta W(t) \quad \text{Équation 3}$$

où t correspond au temps, W_{corr} et W_{brut} correspondent, respectivement, aux niveaux piézométriques corrigés et non corrigés et ΔW correspond aux variations piézométriques induites dans le puits par les variations dans le temps de la pression atmosphérique et du potentiel gravimétrique des marées terrestres au puits.

Un exemple de résultat de correction réalisé dans le cadre du projet PACC est présenté à la figure 9.3 pour le puits 03030003 du RSESQ à Saint-Hugues. La correction a un effet relativement important pour ce puits qui est en condition captive. L'effet de la correction peut être minime pour les puits en condition libre.

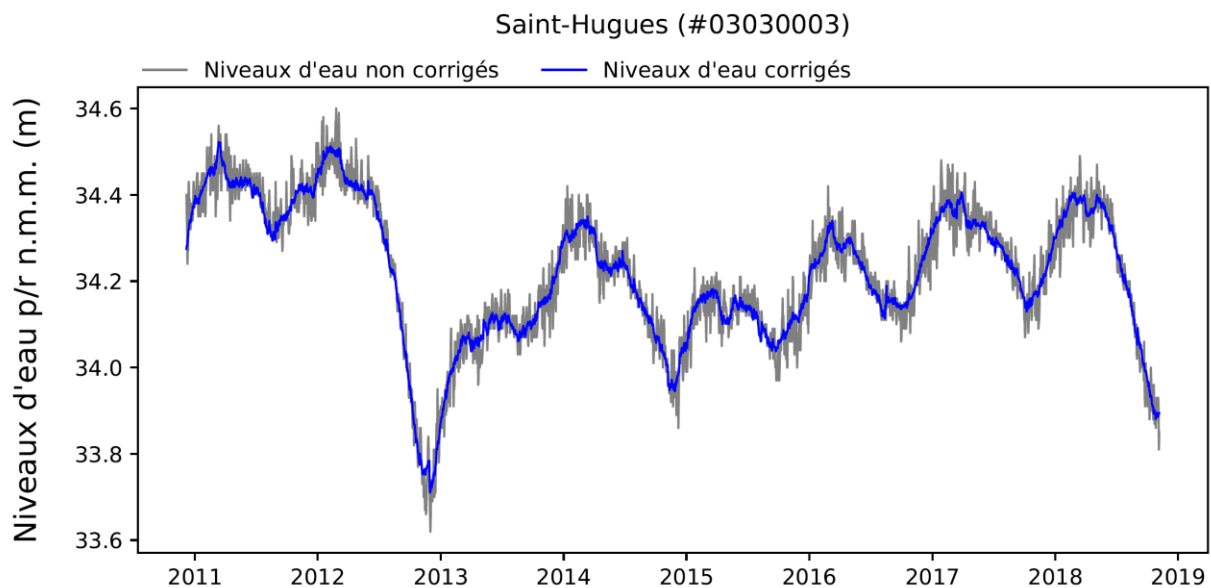


Figure 9.3 – Comparaison des niveaux d'eau (gris) avec les niveaux d'eau corrigés pour l'effet des variations de pression barométrique (bleu) pour le puits 03030003 du RSESQ à Saint-Hugues.

9.2 Outil existant pour évaluer la fonction de réponse barométrique

Quelques outils existent déjà pour calculer la BRF, dont le logiciel KGS BRF (Bohling et al. 2011) développé par la *Kansas Geological Survey* qui est disponible sur leur site Internet⁹. Le logiciel KGS BRF a deux composants : une feuille de calcul Excel et un programme exécutable. La feuille de calcul Excel sert d'interface graphique au programme et permet de gérer les données et de produire automatiquement les fichiers d'entrée requis par l'exécutable. La feuille permet aussi de lancer l'exécutable, de lire les résultats des fichiers de sortie produits par le programme et d'afficher les résultats. Toutefois, l'utilisation de la feuille de calcul Excel n'est pas conviviale et demande beaucoup d'efforts pour la gestion des données et des résultats lorsque la BRF doit être calculée pour plusieurs puits et pour différentes périodes.

⁹ Voir http://www.kgs.ku.edu/HighPlains/OHP/index_program/brf.html

Afin de faciliter l'évaluation de la BRF pour l'ensemble des puits du RSESQ, un nouvel outil a été développé dans la cadre du projet de recherche PACC de l'INRS pour remplacer la feuille de calcul Excel du logiciel KGS BRF. Ce nouvel outil a été incorporé à GWHAT, un logiciel *open source* et disponible gratuitement sur GitHub¹⁰ qui a été développé dans le cadre des travaux doctoraux de Jean-Sébastien Gosselin et du projet de recherche PACC de l'INRS (Gosselin 2016; Gosselin et al. 2019a). Ce nouvel outil permet de calculer rapidement la BRF et d'afficher les résultats sur un graphique (figure 9.4). Les résultats sont stockés automatiquement dans le fichier de projet GWHAT et peuvent être exportés dans des fichiers csv ou Excel. Ainsi, cet outil pourra être utilisé pour évaluer rapidement la BRF pour l'ensemble des puits du RSESQ et pour différentes périodes de l'année.

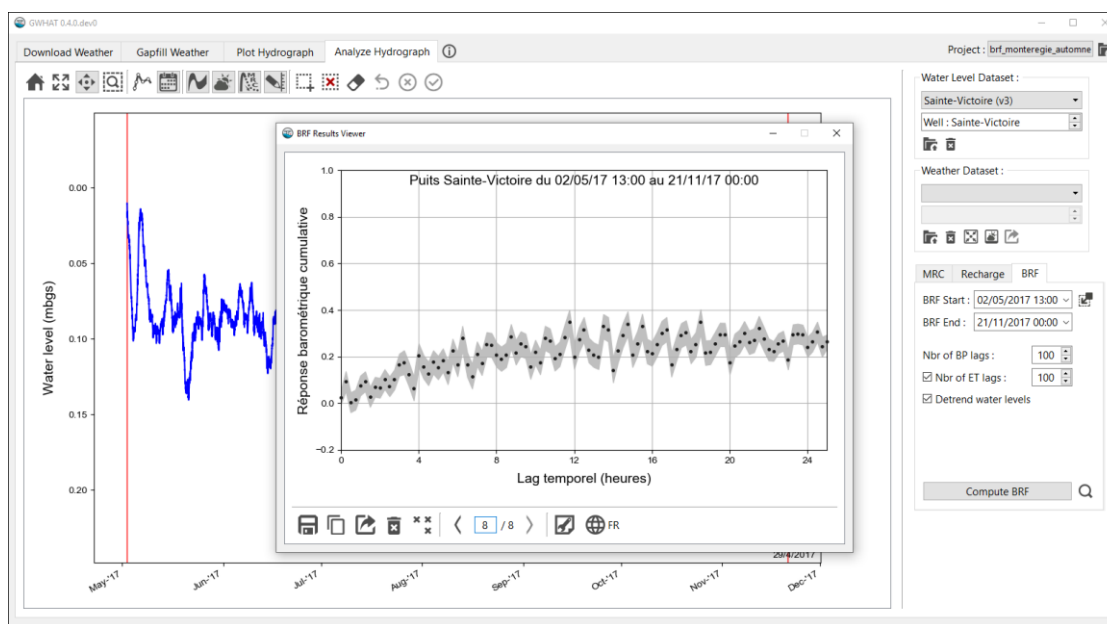


Figure 9.4 - Aperçu de l'outil disponible dans GWHAT 4.0 pour évaluer la fonction de réponse barométrique des puits.

9.3 Outils existants pour la préparation des données d'entrée

Tel que mentionné précédemment, les niveaux piézométriques non compensés et les données barométriques mesurées aux 15 minutes dans les puits du RSESQ au cours de l'année 2017 ne sont pas sauvegardés dans la base de données Access du RSESQ, car la procédure actuelle est de ne garder dans la base de données que les niveaux piézométriques compensés. Ces données nécessaires à l'évaluation de la BRF sont tout de même disponibles via les fichiers de données brutes issues du logiciel Solinst lors de l'extraction des données des sondes.

Ainsi, bien que l'outil présenté à la section précédente permette de faciliter grandement l'évaluation de la BRF à partir des données hautes fréquences acquises dans les puits du RSESQ, un travail important doit tout de même être fait au préalable pour préparer ces données d'entrée. Pour ce faire, il est d'abord néces-

¹⁰ Voir <https://github.com/jnsebgosselin/gwhat>

saire de pouvoir lire et formater les données des niveaux piézométriques et barométriques à partir des fichiers de données brutes archivés par le Ministère. Cela peut être fait à l'aide du module Python HydroSensorReader qui a été développé par la Commission géologique du Canada avec la participation de l'INRS dans le but de fournir un moyen simple de lire des fichiers scientifiques produits par n'importe quel type de sonde, de capteur ou tout autre élément utilisé en hydrogéologie. Cet outil est distribué gratuitement sous une licence *open source* et est disponible sur GitHub¹¹.

En plus de l'influence des variations barométriques, l'outil KGS BRF permet aussi de considérer l'effet des marées terrestres sur les niveaux d'eau. Dans certains cas, le fait de considérer l'effet des marées terrestres permet d'améliorer significativement la qualité des évaluations de la BRF. Pour ce faire, le manuel d'utilisateur du logiciel KGS BRF (Bohling et al. 2011) suggère d'utiliser le logiciel TSoft¹² qui a été développé par la *Royal Observatory of Belgium* pour générer des séries temporelles synthétiques des marées terrestres synchronisées avec les données piézométriques et barométriques. Toutefois, l'utilisation de TSoft pour produire des séries temporelles synthétiques des marées terrestres pour tous les puits du réseau aurait demandé un effort considérable. Nous recommandons donc plutôt d'utiliser le module Python PyGTide qui est distribué gratuitement sous une licence *open source* sur GitHub¹³.

9.4 Recommandations

Quelques recommandations peuvent être émises pour améliorer la gestion des données du RSESQ à la suite du développement et de l'application dans le cadre du projet PACC de la méthode présentée dans cette section pour permettre la correction barométrique des niveaux d'eau des puits du RSESQ.

- Premièrement, lors de l'ajout de nouveaux puits au RSESQ, des données aux 15 minutes devraient être acquises pour une période d'au moins un an afin de pouvoir réaliser les analyses de BRF sur ces nouveaux puits. Après cette période, les mesures pourraient être acquises dans ces nouveaux puits aux 6 heures, tel que fait actuellement pour l'ensemble des puits du réseau.
- Il serait nécessaire de stocker les données barométriques qui sont mesurées dans les puits du RSESQ dans la base de données. De plus, il serait important de garder un lien entre les données piézométriques et les données barométriques utilisées pour compenser ces données afin de pouvoir revenir au besoin à des niveaux d'eau non compensés sans avoir à lire à nouveau ces données à partir des fichiers de données brutes.
- Enfin, il serait nécessaire de pouvoir exporter facilement les données de la base de données à différentes fréquences d'acquisition.

¹¹ <https://github.com/cgq-qgc/HydroSensorReader>

¹² <http://seismologie.oma.be/en/downloads/tsoft>

¹³ <https://github.com/hydrogeoscience/pygtide>

10 ÉVALUATION DE L'HISTORIQUE DE LA RECHARGE

Mandat : Développer une méthodologie visant à évaluer l'historique de la recharge des eaux souterraines à chacune des stations du RSESQ permettant de l'évaluer, et formuler au Ministre les recommandations particulières relatives à l'approche à privilégier pour en incorporer l'application aux opérations de gestion du RSESQ et en faciliter la diffusion sur le site Internet du MELCC.

De nombreuses méthodes existent pour évaluer la recharge. À cause de la difficulté que représente l'évaluation de la recharge, ainsi que des limites des différentes méthodes d'estimation, plusieurs auteurs ont préconisé l'usage simultané d'approches multiples (ex. : Scanlon et al. 2002; Healy 2010; Rivard et al. 2014). La figure 10.1 ci-dessous montre que diverses méthodes d'estimation de la recharge ne considèrent pas les mêmes processus hydrologiques. De plus, Rivard et al. (2014) indiquent que différentes méthodes peuvent être applicables à une échelle locale alors que d'autres sont applicables à une échelle régionale. Enfin, les méthodes d'estimation de la recharge n'exigent pas toutes les mêmes données pour réaliser les calculs ou calibrer les résultats.

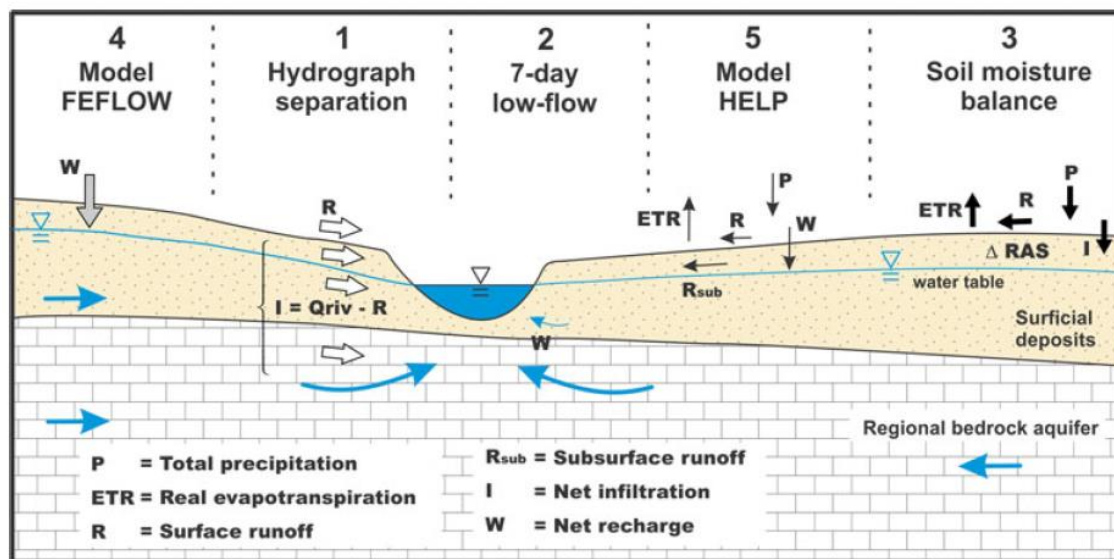


Figure 10.1 - Composantes hydrologiques considérées par diverses méthodes d'estimation de la recharge (tiré de Rivard et al. 2014).

Dans le cadre du présent projet, les outils considérés pour l'estimation de la recharge sont GWHAT et HELP. GWHAT a été développé dans le cadre des travaux doctoraux de Gosselin (2016) afin d'appliquer une approche d'estimation de la recharge qui combine un bilan de surface (*Soil Moisture Balance SMB*) avec un bilan dans l'aquifère (*Water Table Fluctuation WTF*) (voir aussi Gosselin et al. 2019a). Cette approche permet d'exploiter les données du RSESQ afin d'en tirer des estimations de la recharge pour les puits dont les conditions le permettent, soient les puits en condition libre et dont la zone non saturée n'est pas trop complexe au niveau des propriétés hydrauliques des matériaux. Cette approche permet l'estimation de la recharge à une échelle relativement locale autour des puits.

L'autre outil considéré pour l'estimation de la recharge est le modèle d'infiltration HELP (Schroeder et al. 1994b; 1994a). Bien que ce modèle ait été conçu pour l'évaluation ponctuelle de l'infiltration à travers les membranes, Croteau et al. (2010) ont adapté ce modèle à l'estimation régionale de la recharge sur des

mailles régulières pour lesquelles les paramètres requis par HELP sont définis. Cette approche est toutefois plutôt lourde à mettre en œuvre. Afin d'améliorer et faciliter l'exécution et le calage de HELP, le module *PyHELP* a été développé (Gosselin et al. 2019b).

Dans le cadre de ses travaux de maîtrise, Huchet (2018) a montré que les estimations locales de la recharge obtenues de GWHAT étaient cohérentes avec l'estimation spatialement distribuée produite avec HELP. Ces deux approches d'estimation de la recharge sont donc complémentaires et peuvent être utilisées pour valider les résultats obtenus de l'une ou l'autre des approches. Le tableau 10.1 compare GWHAT et HELP aux niveaux des données requises pour l'estimation de la recharge, des données à utiliser pour la calibration des paramètres ainsi que des résultats produits par les deux méthodes. Bien que les données soient requises à des échelles différentes, les besoins en données sont assez similaires pour l'application des deux méthodes d'estimation de la recharge. Des travaux antérieurs ont montré que les données requises pour l'application de GWHAT et HELP pouvaient être assemblées pour diverses régions du Québec ou ailleurs au Canada (Gosselin et al. 2019a).

Tableau 10.1 - Données requises et résultats obtenus lors de l'estimation de la recharge avec le modèle « local » GWHAT et le modèle « régional » HELP.

Paramètres	GWHAT	HELP
Données d'entrée	• Météo : précipitations et température • Plages plausibles de la porosité de drainage de l'aquifère et des valeurs des paramètres hydrologiques	• Météo : précipitations, température, humidité, vitesse du vent et radiation solaire • Période de croissance des plantes (début et fin) • Topographie et pente • Utilisation du territoire • Propriétés du sol • Stratigraphie et propriétés hydrauliques
Données pour le calage	• Hydrogramme de puits	• Bassin jaugé (débit total et débit de base)
Résultats obtenus	• Recharge locale pour un puits et composantes du bilan hydrologique • Paramètres hydrologiques (coefficient de ruissellement, emmagasinement d'eau dans le sol, ETR)	• Recharge et composantes du bilan hydrologique spatialement distribuées régionalement

L'estimation de la recharge à l'aide de GWHAT et de HELP implique un processus de calage des paramètres et de validation de l'estimation obtenue. Il est ainsi possible de mettre à jour les estimations à l'aide de nouvelles données d'entrée plus récentes (mesures météorologiques, données de niveau d'eau souterraine). De même, en supposant que les conditions de surface et hydrogéologiques restent similaires, il serait également possible de représenter le changement de la recharge en climat futur en utilisant les simulations climatiques mises à l'échelle en tant que données d'entrée de GWHAT ou de HELP. Cela est d'ailleurs discuté en détails à la section 11.

Les sous-sections 10.1 et 10.2 suivantes présentent de façon plus détaillée chacune des deux méthodes d'estimation de la recharge considérées dans cette étude et les outils qui ont été développés pour leur application. Des recommandations sur l'approche à privilégier pour incorporer l'application de ces méthodes

aux opérations de gestion du RSESQ et faciliter la diffusion des résultats par le MELCC sont également présentées.

10.1 Évaluation de la recharge historique locale avec GWHAT

Un nombre restreint de méthodes permet d'exploiter directement les mesures de niveau d'eau dans les puits pour estimer la recharge. La recharge peut être estimée directement à partir de la fluctuation des niveaux d'eau causés par l'infiltration d'eau jusqu'à la nappe (*Water Table Fluctuation*, WTF). Cette méthode est bien établie et a été largement appliquée à de nombreuses études (Healy et Cook 2002). La méthode implique la mesure du changement de niveau d'eau en réponse à une infiltration par rapport à l'extrapolation de la récession du niveau d'eau. La recharge est simplement obtenue en multipliant ce changement de niveau d'eau par la porosité de drainage de l'aquifère. La mesure des changements de niveau d'eau est toutefois assez subjective et surtout il faut connaître avec précision la porosité de drainage de l'aquifère, ce qui est particulièrement problématique pour les milieux fracturés. Le problème fondamental de cette méthode est que ses résultats ne peuvent pas être validés.

Une autre méthode simple d'estimation de la recharge consiste à faire un bilan hydrologique (*Soil Moisture Balance*, SMB) à partir de données météorologiques et d'obtenir la recharge à partir des précipitations auxquelles sont soustraits le ruissellement et l'évapotranspiration, tout en tenant compte du changement dans l'emménagement de l'eau dans le sol (Rushton et al. 2006). Cette approche est aussi communément utilisée parce qu'elle ne nécessite que des données météorologiques qui sont généralement disponibles. Ce bilan peut être fait sur une base quotidienne ou mensuelle. Toutefois, il y a une grande incertitude sur les paramètres nécessaires au calcul du bilan, ce qui fait que l'estimation obtenue par cette approche est très incertaine. Larose-Charrette et al. (2000) ont appliqué cette méthode aux aquifères libres deltaïques de Portneuf en considérant la plage plausible des valeurs des paramètres du bilan. La recharge ainsi estimée était de l'ordre de 300 mm/an, mais avec une incertitude excédant ± 100 mm/an. Le problème fondamental de cette méthode est qu'il n'est pas possible d'évaluer précisément l'incertitude des résultats obtenus.

Dans le cadre de son doctorat, Jean-Sébastien Gosselin a développé une approche qui combine un bilan de surface (de type SMB) avec un bilan dans l'aquifère (de type WTF) afin d'estimer la recharge (Gosselin 2016). Ces développements ont par la suite été poursuivis dans le cadre du projet de recherche PACC de l'INRS supporté par le Ministère (Gosselin et al. 2019a). La recharge estimée par le bilan de surface est utilisée pour produire un hydrogramme synthétique qui est comparé à un hydrogramme mesuré dans l'aquifère. La combinaison de ces méthodes donne un moyen de valider le bilan hydrologique (SMB) grâce aux niveaux d'eau mesurés. De plus, en considérant la plage des valeurs plausibles des paramètres hydrologiques du bilan, un ensemble d'estimations peut être produit à partir duquel l'incertitude de l'estimation peut être calculée. La figure 10.2 montre les composantes des deux bilans qui sont calculés :

$$\text{Bilan de surface:} \quad Re = P_{avail} - Ru - ETR + \Delta RAS \quad \text{Équation 4}$$

$$\text{Bilan d'aquifère :} \quad Re = S_y \cdot \Delta h + (Q_{out} - Q_{in}) \quad \text{Équation 5}$$

Où Re est la recharge, P_{avail} représente les précipitations disponibles, Ru est le ruissellement, ETR est l'évapotranspiration réelle, ΔRAS est le changement de la réserve en eau utile dans le sol, S_y est la porosité de drainage, Δh est le changement de niveau d'eau et la différence $Q_{out} - Q_{in}$ représente la récession du niveau d'eau souterraine causé par sa sortie nette d'eau de l'aquifère en l'absence de recharge.

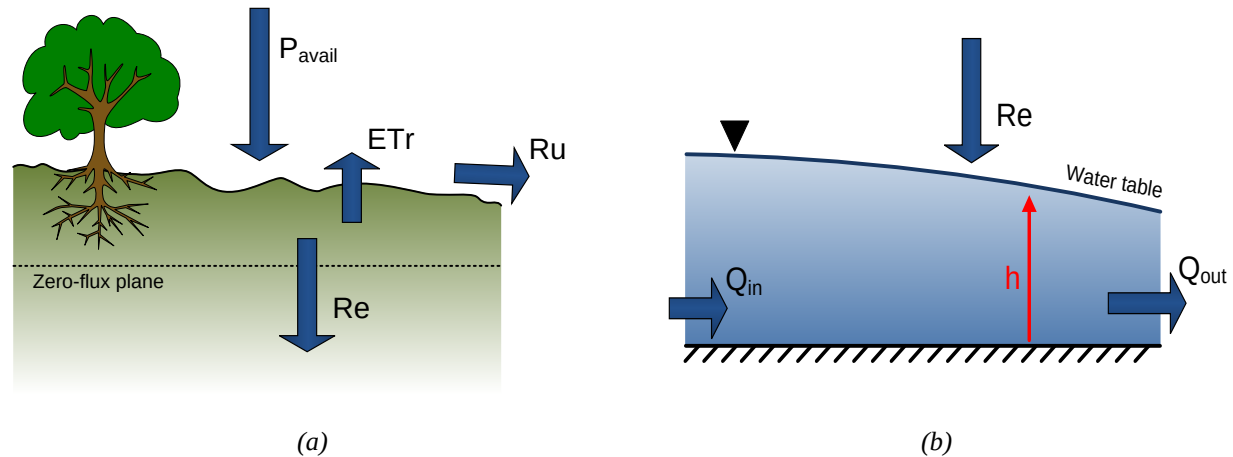


Figure 10.2 – Illustration (a) des composantes du bilan hydrologique de surface et (b) du bilan en eau d'un aquifère libre (tiré de Gosselin et al. 2018).

La méthode d'estimation de la recharge qui a été développée consiste à utiliser les niveaux d'eau mesurés pour caler un bilan hydrologique de surface couplé à un bilan en eau d'un aquifère à nappe libre. Le calage du modèle est réalisé à l'aide de la méthode d'optimisation globale GLUE (*Generalized Likelihood Uncertainty Estimation*). Une description détaillée de même que tous les développements mathématiques nécessaires à l'application de cette méthode sont donnés dans la thèse de doctorat de Jean-Sébastien Gosselin (Gosselin 2016) qui est disponible sur le site Internet de la bibliothèque de l'INRS¹⁴. En résumé, l'approche de résolution implique d'abord la définition de plages de valeurs plausibles pour les paramètres hydrologiques du modèle (coefficient de ruissellement, porosité de drainage du sol, réserve en eau utile maximale). La méthode consiste ensuite à produire une grande quantité de réalisations (hydrogrammes de puits synthétiques) à partir de plusieurs combinaisons de valeurs des paramètres tirées des plages définies *a priori*. Une mesure de vraisemblance aux valeurs observées est ensuite calculée pour chaque hydrogramme synthétique ainsi simulé en les comparant aux observations de niveau d'eau. Les mesures de vraisemblance sont ensuite utilisées pour établir une fonction de répartition de la recharge (CDF : *Cumulative Distribution Function*) sur une base journalière, puis les CDFs sont utilisées pour évaluer l'incertitude et les valeurs modales de la recharge. En plus de la recharge obtenue sur une base journalière, cette technique permet aussi d'évaluer toutes les composantes du bilan hydrologique et de faire de la prévision des niveaux d'eau. Une interface graphique a également été développée afin de faciliter l'application de la méthode et le tout a été intégré à GWHAT (figures 10.3 et 10.4).

Cette méthode présente plusieurs avantages par rapport à la méthode des fluctuations de la nappe qui est mieux connue et généralement utilisée en hydrogéologie pour évaluer la recharge à partir des séries temporelles de niveaux d'eau (Healy et Cook 2002). Premièrement, la méthode permet une meilleure reconnaissance des événements de recharge diffuse que la méthode des fluctuations de la nappe qui tend à sous-estimer cette recharge. La méthode permet aussi d'évaluer les plages d'incertitude sur les estimations de recharge par l'application de la méthode d'optimisation globale GLUE. La méthode fournit aussi un moyen de restreindre les plages de valeurs utilisées pour les paramètres hydrologiques et la porosité de drainage de l'aquifère, ce qui est une faiblesse importante de la méthode des fluctuations de la nappe. Enfin, la méthode peut être utilisée pour estimer la recharge, ainsi que l'évapotranspiration et le ruissellement, sur toute

¹⁴ <http://espace.inrs.ca/5122/1/T767.pdf>

la période pour laquelle des données météorologiques sont disponibles. Cela signifie que la méthode peut être utilisée pour prédire les niveaux de recharge et d'eau souterraine même pendant les périodes pour lesquelles les mesures de niveau d'eau ne sont pas disponibles.

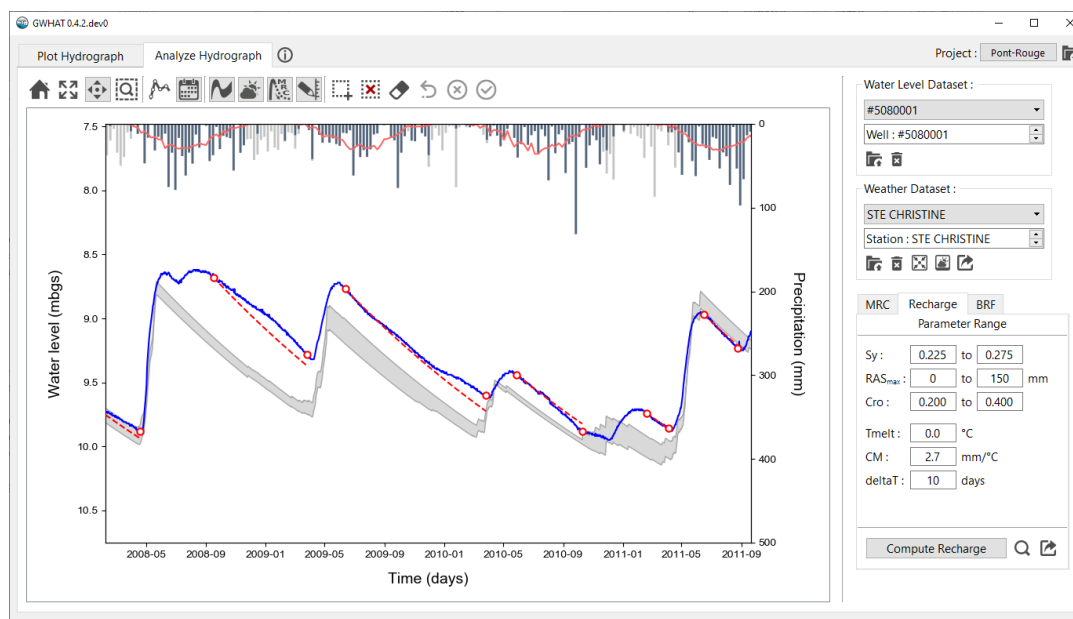
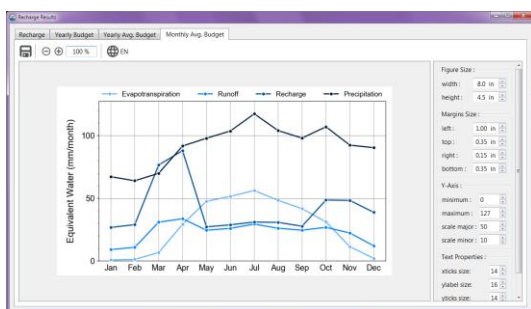
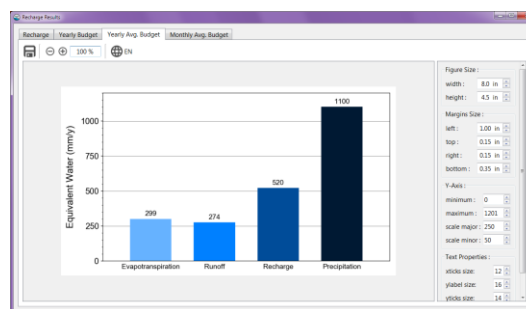


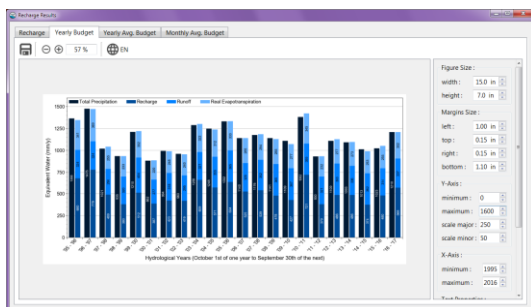
Figure 10.3 – Aperçu de l'outil dans GWHAT pour évaluer la recharge à partir de données climatiques et de mesures journalières de niveaux d'eau souterraine.



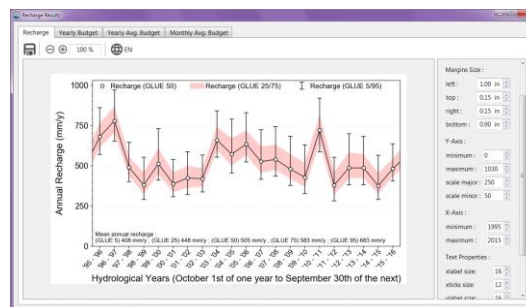
(a) Bilan hydrologique mensuel moyen



(b) Bilan hydrologique annuel moyen



(c) Bilan hydrologique annuel



(d) Recharge annuelle et incertitude

Figure 10.4 - Aperçu des figures générées par GWHAT à partir des résultats obtenus avec la méthode d'estimation de la recharge développée dans le cadre du projet de recherche PACC de l'INRS.

Les figures 10.3 et 10.4 présentent divers graphiques générés par GWHAT à partir des différents résultats produits par l'application de cette méthode. Dans le cadre du projet de recherche PACC de l'INRS, l'outil GWHAT a été testé sur plusieurs puits du RSESQ et les gammes de valeurs plausibles à utiliser pour les différents paramètres de calage de la méthode ont été établis à partir des données extraites des cartes PACES autour et au droit de chacun des puits. Les travaux réalisés dans le cadre du projet de recherche PACC de l'INRS fournissent ainsi les outils et la méthodologie nécessaires pour permettre au Ministère d'appliquer la méthode pour l'ensemble des puits du RSESQ qui le permettent.

Un autre avantage de la méthode qui a été développée pour l'évaluation de la recharge est qu'il est possible de facilement mettre à jour les évaluations lorsque de nouvelles données climatiques sont disponibles. Ainsi, dans le but d'incorporer l'application de la méthode aux opérations de gestion du RSESQ et en faciliter la diffusion sur le site Internet du MELCC, il serait nécessaire dans un premier temps que la DEPES ait accès aux données à jour de la grille climatique quotidienne du RSCQ ou aux données de stations météorologiques, tel que discuté précédemment à la section 6. Ensuite, un outil pourrait être développé pour produire automatiquement les évaluations de recharge et générer les graphiques à partir des résultats obtenus pour la nouvelle période couverte par les données climatiques en utilisant pour chacun des puits les plages des paramètres qui auront été établies précédemment à l'aide de l'outil GWHAT. Lors de la mise à jour des évaluations de recharge, les nouvelles données de niveaux d'eau pourraient aussi être utilisées, ce qui devrait permettre de réduire l'incertitude des résultats obtenus.

Les nouvelles données de niveau d'eau pourraient aussi être utilisées pour mettre à jour les plages des paramètres utilisées par la méthode à l'aide de l'outil GWHAT. Cette opération n'aurait toutefois pas besoin d'être réalisée toutes les années. Une étude de sensibilité devrait être faite pour déterminer la fréquence optimale à laquelle la mise à jour des paramètres de la méthode devrait être faite.

Les évaluations journalières de recharge pourraient être publiées sur le site Internet du ministère pour tous les puits qui le permettent sous la forme d'un fichier csv ou Excel. Les différents graphiques générés à partir des résultats pourraient également être ajoutés à la fiche signalétique des puits (section 4.3). De plus, la valeur de recharge annuelle moyenne évaluée aux puits qui le permettent pourrait être ajoutée aux informations de la fiche descriptive du puits (bulle sur la page Internet, voir figure 3.2).

10.2 Estimation de la recharge historique spatialement distribuée avec HELP

HELP (*Hydrologic Evaluation of Landfill Performance*) est un modèle déterministe quasi-bidimensionnel de transport de l'eau qui a été conçu pour évaluer les performances hydrologiques des sites d'enfouissement et des installations de confinement. HELP est un modèle qui est largement accepté par la communauté scientifique et dont le code source est disponible gratuitement. Bien qu'il ait été développé pour l'analyse hydrologique des membranes des sites d'enfouissement, ce modèle peut également être utilisé pour calculer la recharge naturelle des eaux souterraines. En effet, HELP permet de simuler tous les processus hydrologiques importants affectant la recharge : l'interception des précipitations, l'évapotranspiration, le ruissellement de surface et de sous-surface de même que les effets du gel et l'accumulation et la fonte de la neige à la surface du sol. D'ailleurs, le modèle HELP a déjà été utilisé dans de nombreuses études régionales pour générer des estimations physiques de la recharge très détaillée dans le temps et l'espace.

Jyrkama et al. (2002) ont été les premiers à utiliser cette approche pour démontrer l'importance d'utiliser une condition aux limites de recharge spatialement distribuée et variant dans le temps pour la modélisation des eaux souterraines. Croteau et al. (2010) ont ensuite amélioré et développé la méthodologie davantage pour évaluer la recharge spatialement distribuée pour le bassin versant de la rivière Châteauguay. La méthode a également été utilisée pour estimer la recharge dans de nombreux projets régionaux PACES, y

compris ceux couvrant les régions de la Montérégie Est (Carrier et al. 2013) et de Chaudière-Appalaches (Lefebvre et al. 2015). Récemment, dans le cadre du projet RADEAU2 une approche similaire a été suivie pour estimer la recharge spatialement distribuée des aquifères pour les régions de Laval et des Laurentides puisque ces régions n'avaient alors pas encore été couvertes par les projets PACES (Raynauld et al. 2018).

Toutefois, l'évaluation de la recharge spatialement distribuée à l'échelle régionale avec le modèle HELP est plutôt lourde à mettre en œuvre. Premièrement, le modèle HELP n'est pas maintenu ou développé de façon active actuellement et les technologies dont il dépend sont rendues obsolètes. Le code source du modèle est écrit dans le langage de programmation FORTRAN 77 et n'a subi aucune révision ou mise-à-jour depuis 1997. De plus, la version compilée la plus récente du modèle (HELP v3.07) est un programme DOS exécutable 16 bits qui ne fonctionne pas sur Windows 7 et les systèmes plus récents et nécessite l'utilisation d'un émulateur. Deuxièmement, tel que mentionné précédemment, HELP a été développé pour la conception des sites d'enfouissement et une condition unique de couches de matériaux. L'application de HELP à plusieurs milliers de cellules avec des conditions variables nécessite des efforts importants pour traiter les données d'entrée et de sortie, ce qui est sujet aux erreurs.

Afin de faciliter l'application de HELP pour évaluer la recharge des eaux souterraines spatialement distribuée à l'échelle régionale, Gosselin et al. (2019b) ont développé une nouvelle librairie Python nommé PyHELP. Pour ce faire, Gosselin et al. (2019b) ont tout d'abord corrigé quelques problèmes avec le code source afin de pouvoir compiler HELP avec le compilateur GFortran¹⁵ sur Windows 64 bits. Ils ont ensuite adapté le code pour construire une extension Python de HELP, ce qui permet de gérer plus facilement les entrées et les sorties de HELP avec Python et de paralléliser les calculs. La librairie PyHELP comprend un ensemble d'outils pour intégrer facilement les données météorologiques sur grille ou par station, les conditions du sol définies par une série de cartes GIS, ainsi que les propriétés du sol et des matériaux géologiques dans les fichiers d'entrée HELP. PyHELP traite également les résultats de simulation HELP et permet de les afficher sous forme de cartes et de graphiques, y compris 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 HELP, de l'assemblage du fichier d'entrée, à la calibration du modèle et à la documentation des résultats. PyHELP est un projet à code ouvert et est disponible gratuitement sur GitHub¹⁶.

La procédure de calcul pour l'estimation de la recharge avec PyHELP est illustrée à la figure 10.5 et consiste d'abord à diviser la région d'étude en une grille uniforme. Par la suite, les données géomatiques (latitude, longitude, pente moyenne, etc.) et les propriétés des couches de sols (porosité, épaisseurs des couches, conductivité hydraulique, etc.) doivent être définies pour chacune des cellules de la grille et le tout doit être formaté et sauvegardé dans un fichier csv dans le format prescrit dans la documentation de PyHELP¹⁷. De plus, des données climatiques journalières (précipitations, température moyenne de l'air et radiation solaire) doivent être préparées et sauvegardées dans des fichiers csv dans le format prescrit dans la documentation de PyHELP. À noter qu'il n'est pas requis de définir des données climatiques à chacune des cellules de la grille de la région d'étude, ni d'avoir des données climatiques sur des grilles homogènes ou régulières.

¹⁵ <https://gcc.gnu.org/wiki/GFortran>

¹⁶ <https://github.com/cgq-qgc/pyhelp>

¹⁷ <https://pyhelp.readthedocs.io/en/latest/data.html>

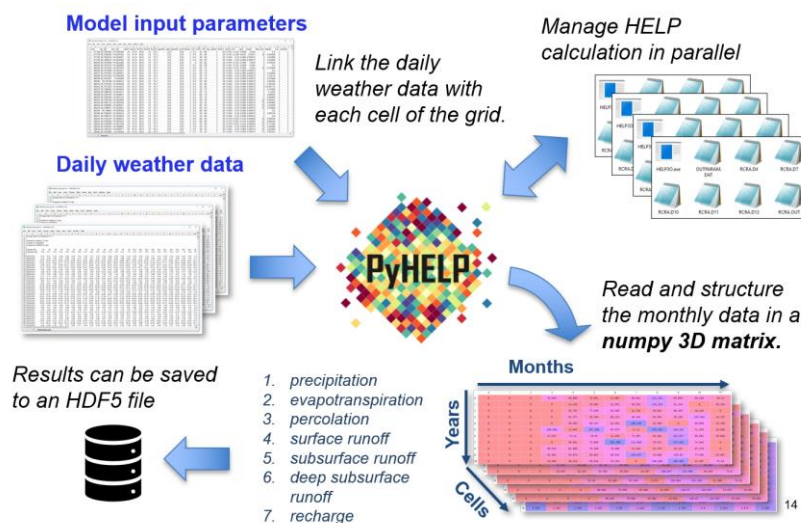


Figure 10.5 – Diagramme de la procédure de calcul pour l'estimation de la recharge avec PyHELP (tiré de Gosselin et al. 2019b).

Une fois les données d'entrée préparées, PyHELP permet de lancer l'exécution de HELP pour calculer l'évapotranspiration, le ruissellement de surface, le ruissellement de sous-surface (superficiel et profond) et la recharge de l'aquifère rocheux sur une base mensuelle pour chacune des cellules pour lesquelles le contexte le permet. La figure 10.6 illustre les différentes composantes du bilan hydrogéologique qui sont considérées par HELP lors du calcul de la recharge. Le ruissellement de surface correspond au ruissellement sur la surface du sol. Le ruissellement de sous-surface superficiel correspond à l'écoulement latéral de l'eau dans le sol alors que le ruissellement de sous-surface profond correspond à l'écoulement latéral de l'eau dans les dépôts meubles. La percolation correspond à la quantité d'eau qui s'infiltre sous les horizons de sol, soit les précipitations moins l'évapotranspiration et moins le ruissellement de surface et de sous-surface superficiel. Enfin, la recharge correspond à la quantité d'eau qui atteint l'aquifère rocheux.

Les calculs pour chaque cellule sont exécutés en parallèle. Pour chacune des cellules, PyHELP s'occupe de produire automatiquement les fichiers d'entrée nécessaires aux calculs de HELP, de lancer les calculs avec HELP et de lire les données de sortie de HELP et de compiler les résultats dans une grille qui peut ensuite être sauvegardée dans un fichier HDF5. PyHELP permet ensuite de traiter les résultats et de les afficher sous forme de cartes ou de graphiques.

Le processus de calage 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 et au débit de base mesurés dans une rivière d'un sous-bassin jaugé. Le débit total annuel est calculé en sommant la recharge avec le ruissellement de surface et de sous-surface (superficiel et profond) alors que le débit de base est obtenu en sommant la recharge avec le ruissellement de sous-surface (superficiel et profond) tel que :

$$\text{Débit Total} = \text{Précipitations} - \text{Évapotranspiration} \quad \text{Équation 6}$$

$$\text{Débit de Base} = \text{Recharge} + \text{Ruissellement de sous-surface} \quad \text{Équation 7}$$

Un exemple de figures de calage produites par PyHELP est présenté à la figure 10.7 pour le bassin versant de calage de la rivière du Nord situé dans les Laurentides.

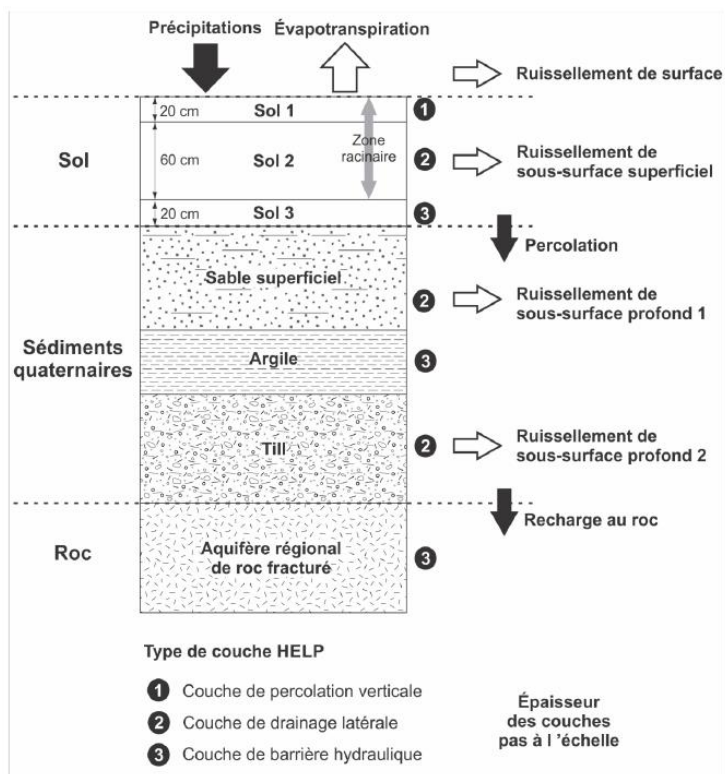


Figure 10.6 – Composantes hydrologiques considérées par le modèle HELP pour l'estimation de la recharge (tiré de Raynauld et al. 2018).

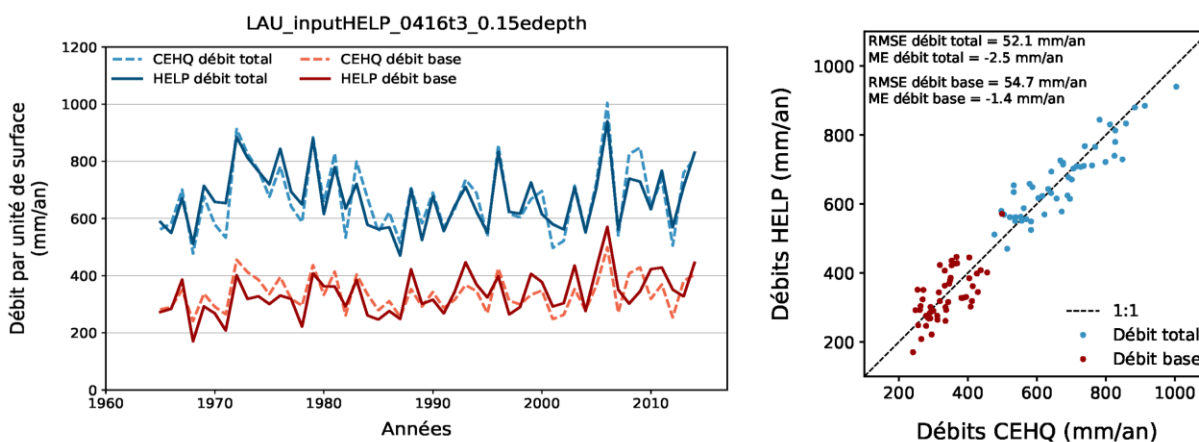


Figure 10.7 – Exemple de graphiques de comparaison du débit total et du débit de base annuel des rivières pour le bassin versant de calage de la rivière du Nord dans les Laurentides (tiré de Raynauld et al. 2018).

Ainsi, il serait possible d'utiliser cette approche pour évaluer la recharge spatialement distribuée sur l'ensemble du territoire couvert par le RSESQ. Le travail a d'ailleurs déjà été réalisé pour une bonne partie du territoire dans le cadre de quelques projets PACES et divers autres projets de caractérisation hydrogéologique (ex. : Lefebvre et al. 2015; Carrier et al. 2013; Raynauld et al. 2018; Croteau et al. 2010). Les travaux réalisés à ce jour dans ces diverses études régionales n'ont toutefois permis de produire qu'un portrait sta-

tique de la recharge au moment de la réalisation de ces projets. Dans un premier temps, il serait donc essentiel de développer des outils et un cadre méthodologique qui permettraient de facilement incorporer les nouvelles données climatiques et d'assimiler les nouvelles données de calage afin de produire des estimations à jour de la recharge sur une base régulière. En parallèle, il serait nécessaire de faire un recensement de tous les projets de caractérisation hydrogéologique qui ont permis d'évaluer la recharge spatialement distribuée sur le territoire québécois. Dans un second temps, il serait nécessaire de reprendre les travaux d'évaluation de la recharge spatialement distribuée sur le territoire du Québec et d'uniformiser et formater les données d'entrée dans un format compatible avec PyHELP. Des évaluations à jour de la recharge pourraient ensuite être produites pour les régions concernées. Enfin, il serait nécessaire de réaliser le travail pour les régions du Québec couvertes par le RSESQ, mais pour lesquelles la recharge spatialement distribuée n'a pas encore été évaluée.

Les travaux proposés ci-dessus permettraient de fournir des informations essentielles pour la production éventuelle de rapports périodiques de suivi de l'état des nappes à l'échelle du Québec, tel qu'il est fait actuellement de façon mensuelle en France par la Direction Eau, Environnement et Ecotechnologies du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)¹⁸. De plus, ce travail pourrait constituer une base sur laquelle des travaux futurs pourraient s'appuyer pour évaluer l'impact des changements climatiques sur la recharge en climat futur. Ceci est d'ailleurs discuté plus en détail à la section suivante.

¹⁸ <https://www.brgm.fr/publication-presse/etat-nappes-eau-souterraine-1er-juin-2020>

11 VARIATIONS DE LA RECHARGE EN CLIMAT FUTUR

Mandat : Développer une méthodologie visant à anticiper les variations de la recharge des eaux souterraines en climat futur (incluant des recommandations sur les scénarios climatiques à utiliser) à chacune des stations du RSESQ, et formuler au Ministre les recommandations particulières relatives à l'approche à privilégier pour en incorporer l'application aux opérations de gestion du RSESQ et en faciliter la diffusion sur le site Internet du MELCC.

11.1 Évaluation des effets hydrologiques des changements climatiques

Les changements climatiques peuvent avoir de multiples effets sur les conditions environnementales telles que l'érosion des berges, les inondations, l'intrusion d'eau marine dans les aquifères, etc. Au niveau des ressources en eau souterraine, il est donc essentiel d'évaluer les effets que les changements climatiques pourraient avoir sur l'exploitation durable des ressources en eau et d'identifier des mesures de mitigation. De nombreuses études ont d'ailleurs été réalisées au cours de la dernière décennie à cette fin et une démarche reconnue a finalement émergée de ces travaux. La figure 11.1 montre ainsi les étapes habituelles du processus d'évaluation de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau. Ce processus en trois étapes implique 1) la modélisation du climat futur à l'aide de modèles climatiques globaux (*Global Climate Models*, GCM) ou régionaux (*Regional Climate Models*, RCM), 2) l'adaptation des résultats des GCM ou RCM afin de produire des chroniques météorologiques servant de données d'entrée à des modèles numériques hydrologiques (de surface, souterrains ou intégrés), et 3) l'évaluation des effets des changements climatiques sur les conditions hydrologiques et l'identification de mesures possibles d'adaptation (Olsson et al. 2016).

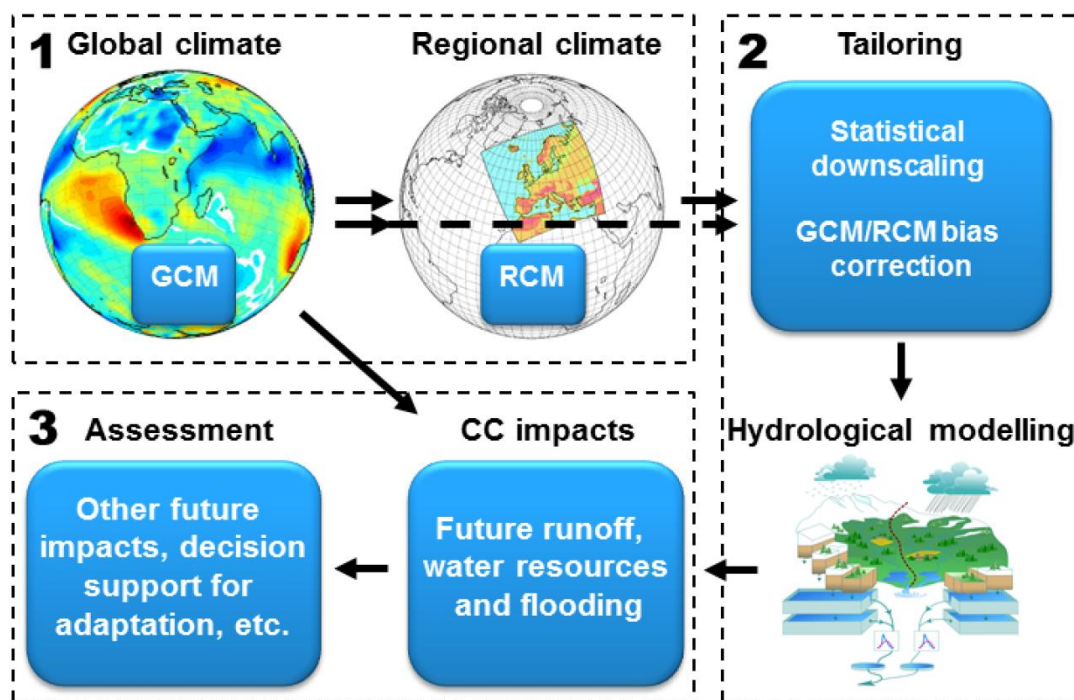


Figure 11.1 - Étapes de l'évaluation des effets des changements climatiques sur les conditions hydrologiques : 1) modélisation climatique (globale ou régionale); 2) production de séries météorologiques représentatives du climat futur utilisées comme intrant de modèles hydrologiques; et 3) évaluation des effets hydrologiques et identification des mesures d'adaptation (tiré de Olsson et al. 2016).

Les modèles climatiques globaux (GCM) permettent la représentation des changements globaux du climat. Leur résolution spatiale (entre 100 et 450 km) est toutefois trop faible pour les besoins des modèles hydrologiques (Leduc et al. 2019), d'où l'usage de méthodes de mise à l'échelle des résultats des GCM (Paradis et al. 2016). Alternativement, le climat peut également être simulé à l'aide de modèles climatiques régionaux (RCM). Les RCM ont en fait les mêmes capacités que les GCM mais ils se concentrent sur une région limitée de la surface terrestre. Les RCM font des simulations en utilisant le forçage d'un GCM à leur surface et à leurs limites. Les RCM donnent des résultats à une résolution de 12 à 50 km qui est d'intérêt pour leur utilisation par des modèles hydrologiques (Leduc et al. 2019). Afin de représenter la variabilité naturelle et l'occurrence d'événements extrêmes à partir de projections basées sur les simulations par des GCM ou RCM, les travaux des dernières années ont généralement été basés sur la production de « grands ensembles » (*large-ensemble framework*) à partir d'un grand nombre de réalisations obtenues de simulations réalisées avec un seul GCM (Leduc et al. 2019). Par exemple, au niveau canadien, le grand ensemble produit par le modèle climatique régional canadien (*Canadian Regional Climate Model Large Ensemble*, CRCM5-LE) représente une mise à l'échelle dynamique à une résolution de 12 km sur un domaine européen (EU) et un domaine nord-américain (NNA) de simulations allant de 1950 à 2099 sur la base du scénario RCP8.5 d'émission de CO₂ (Leduc et al. 2019).

En plus de considérer les effets hydrologiques des changements climatiques, il est possible d'évaluer conjointement l'effet d'autres conditions qui pourraient évoluer dans le temps à la suite des changements climatiques, telles que l'utilisation du territoire, l'urbanisation, les pratiques agricoles, etc. Par exemple, la figure 11.2 montre le cas d'une étude qui a considéré l'effet du changement des pratiques agricoles et de la recharge sur la présence de nitrate dans l'eau souterraine.

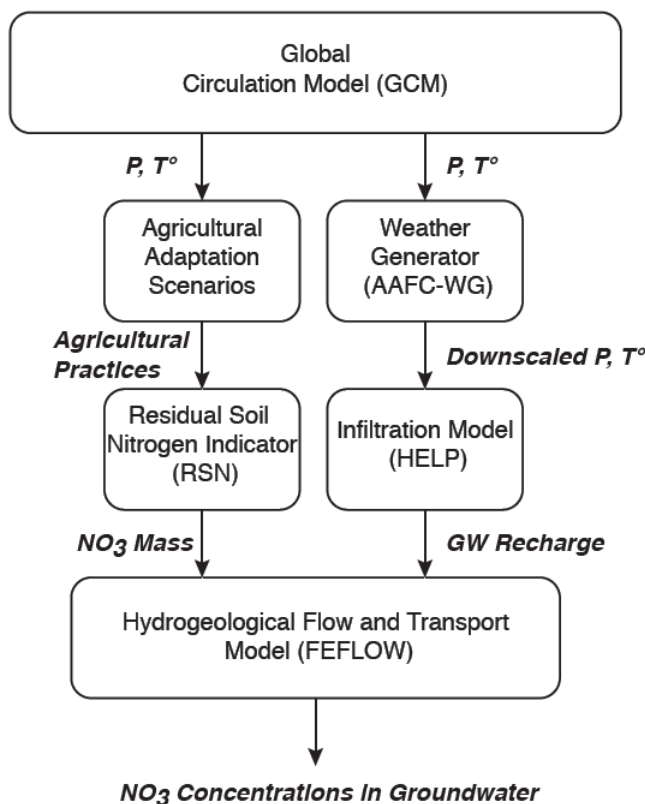


Figure 11.2 - Étude de l'effet combiné de l'adaptation des pratiques agricoles et du changement de la recharge sur les nitrates dans l'eau souterraine (tiré de Paradis et al. 2016).

11.2 Travaux antérieurs dans l'est du Canada et au Québec

Larocque et al. (2019) ont fait la revue des travaux réalisés sur les effets des changements climatiques sur l'eau souterraine dans l'est du Canada (figure 11.3). Cette revue a compilé les conditions des études relativement au scénario d'augmentation du CO₂ atmosphérique considéré, à la période future représentée et aux résultats des simulations sur les changements du débit de base des cours d'eau et de la recharge des nappes.

Les travaux antérieurs répertoriés par Larocque et al. (2019) ont été réalisés à l'aide de modèle hydrologiques (HYDROTEL, MikeSHE), hydrogéologiques (MODFLOW) ou intégrés (CATHY, HydroGeoSphere). Les résultats obtenus montrent une vaste plage de changements positifs ou négatifs du débit de base et de la recharge des nappes, avec une tendance qui semble plus importante au niveau de la réduction de la recharge et du débit de base, mais surtout avec d'importants changements par rapport aux conditions saisonnières.

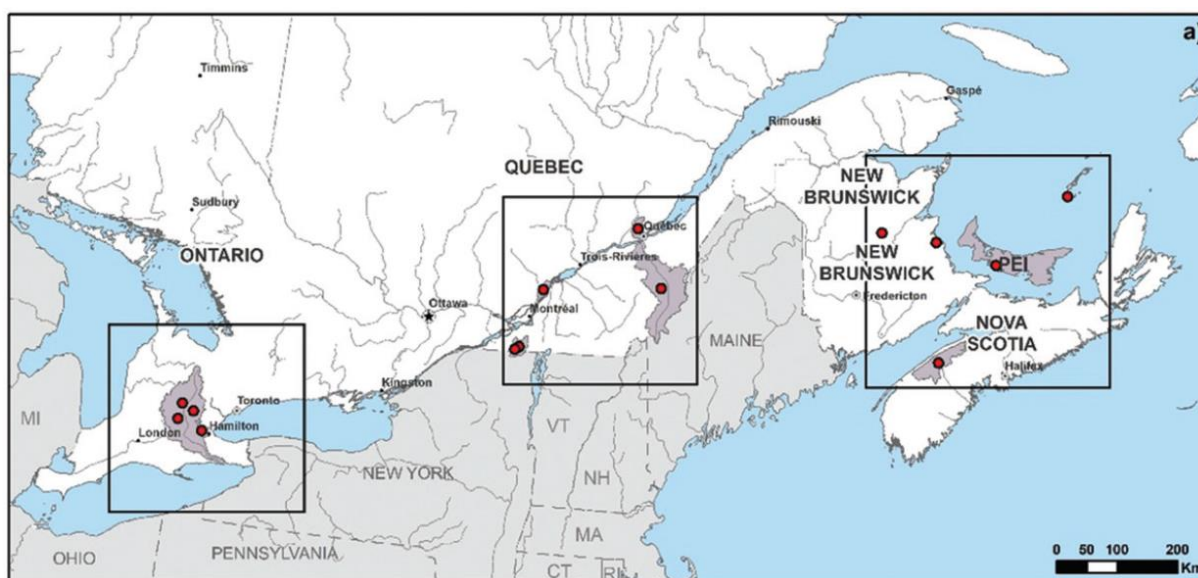


Figure 11.3 - Régions couvertes par les études sur les effets des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine dans l'est du Canada (tiré de Larocque et al. 2019).

11.3 Données requises pour évaluer les effets hydrologiques des changements climatiques

La figure 11.4 illustre les données qui sont requises pour évaluer les effets hydrologiques des changements climatiques à l'aide d'un modèle physique. Dans ce cas-ci, il s'agit du modèle hydrologique SWAT (Tsvetkova et Randhir 2019). Ainsi, en plus des données climatiques mises à l'échelle (précipitations et température) obtenues d'un GCM ou d'un RCM, il est nécessaire de disposer de données sur les conditions qui vont influencer les processus hydrologiques (évapotranspiration, ruissellement, emmagasinement de l'eau dans les sols, infiltration). Selon le type de modèle physique considéré, ces données doivent être disponibles localement ou être spatialement distribuées.

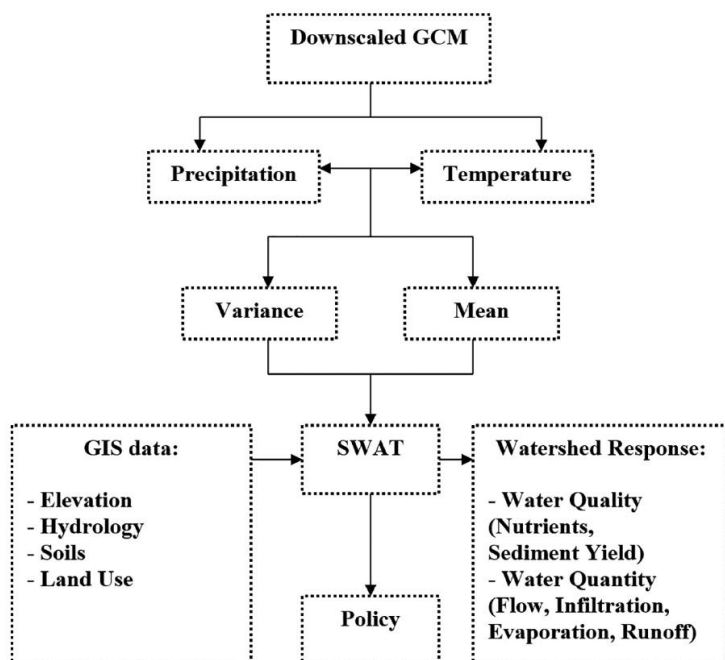


Figure 11.4 - Données requises pour la modélisation de l'effet des changements climatiques sur les processus hydrologiques (tiré de Tsvetkova & Randhir, 2019).

11.4 Données disponibles sur les changements climatiques au Québec

Le projet ClimEx¹⁹ avait pour but de développer une base de prédictions climatiques nécessaire à l'évaluation des effets hydrologiques des changements climatiques en Bavière (Allemagne) et au Québec (Canada). Sur la base du scénario d'émissions RCP8.5 GHGA, ClimEx a produit un ensemble de 50 projections climatiques allant de 1950 à 2099 à une résolution de 12 km couvrant deux domaines, soit le nord-est de l'Amérique du Nord et l'Europe (Figure 11.5; Leduc et al. 2019; Leduc 2019).

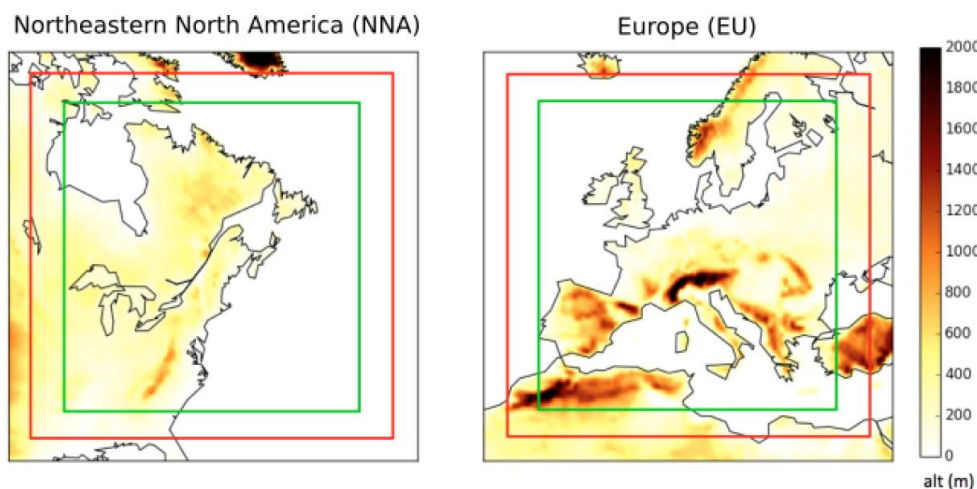


Figure 11.5 - Régions couvertes par les simulations du projet ClimEx (tiré de Leduc 2019).

¹⁹ <https://www.climex-project.org/>

La figure 11.6 montre le processus de production de l'ensemble de prédictions climatiques (Leduc et al. 2019). Le GCM canadien CanESM2 (*Canadian Earth System Model*, version 2) a été utilisé pour produire un grand ensemble (*large ensemble*) de 50 projections climatiques nommé CanESM2-LE. Cet ensemble est basé sur une simulation de 1000 ans à l'équilibre aux conditions préindustrielles. Des perturbations atmosphériques aléatoires ont été appliquées à cette simulation afin d'obtenir 5 simulations historiques débutant en 1850. D'autres perturbations atmosphériques appliquées en 1950 ont permis de faire 10 autres simulations à partir de chacune des 5 simulations historiques, produisant ainsi 50 membres provenant de 5 « familles » de simulations. Les conditions atmosphériques observées ont été imposées à tous les membres jusqu'à l'année 2005, puis les simulations ont été prolongées de 2006 à 2099 sur la base des conditions du scénario RCP8.5. Le RCM canadien CRCM5 (*Canadian Regional Climate Model*, version 5) a été utilisé par Ouranos pour mettre à l'échelle de façon dynamique le grand ensemble CanESM2-LE, passant ainsi d'une résolution spatiale de 310 km à 12 km pour la période allant de 1950 à 2099. Les simulations climatiques réalisées par ClimEx ont ainsi produit des résultats similaires aux données météorologiques et sont disponibles sur une grille de 12 km dans le même format que les données météorologiques d'InfoClimat²⁰. Les données ne sont toutefois disponibles publiquement que pour le domaine européen et il faudra obtenir d'Ouranos l'accès aux données pour le domaine nord-américain.

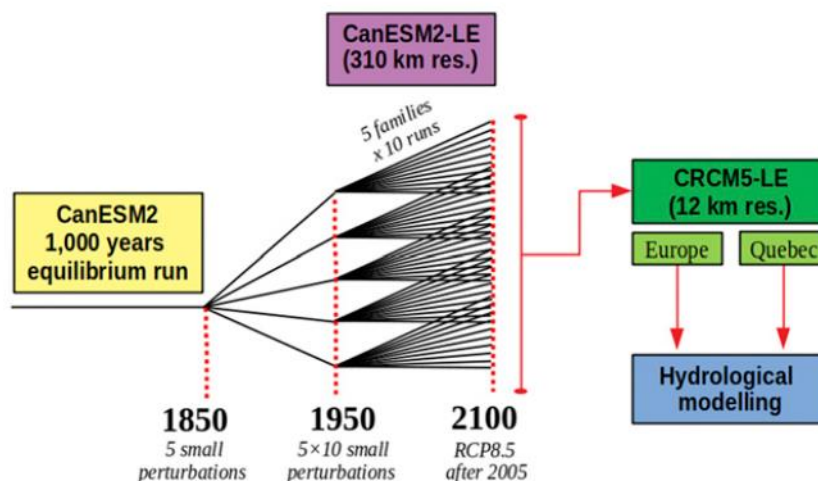


Figure 11.6 - Processus de simulation de ClimEx pour la production d'un ensemble de 50 réalisations de simulations climatiques à une résolution de 310 km obtenues du GCM CanESM et qui ont été mises-à-l'échelle avec CRCM5 pour produire un ensemble de données en climat futur à une résolution de 12 km servant de données d'entrée à la modélisation hydrologique (tiré de Leduc et al. 2019).

Similairement au projet ClimEx, Les archives de données NA-CORDEX²¹ (Mearns et al. 2017) contiennent les résultats de plusieurs modèles climatiques régionaux exécutés sur un domaine couvrant la majeure partie de l'Amérique du Nord (figure 11.7) en utilisant comme conditions aux limites les simulations des modèles climatiques globaux du CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*). Ces simulations s'étendent de 1950 à 2100 avec une résolution spatiale de 25 km et 50 km. Les données sont disponibles à des fréquences quotidiennes au format NetCDF.

²⁰ <https://climex-data.srv.lrz.de/Public/>

²¹ <https://na-cordex.org/>

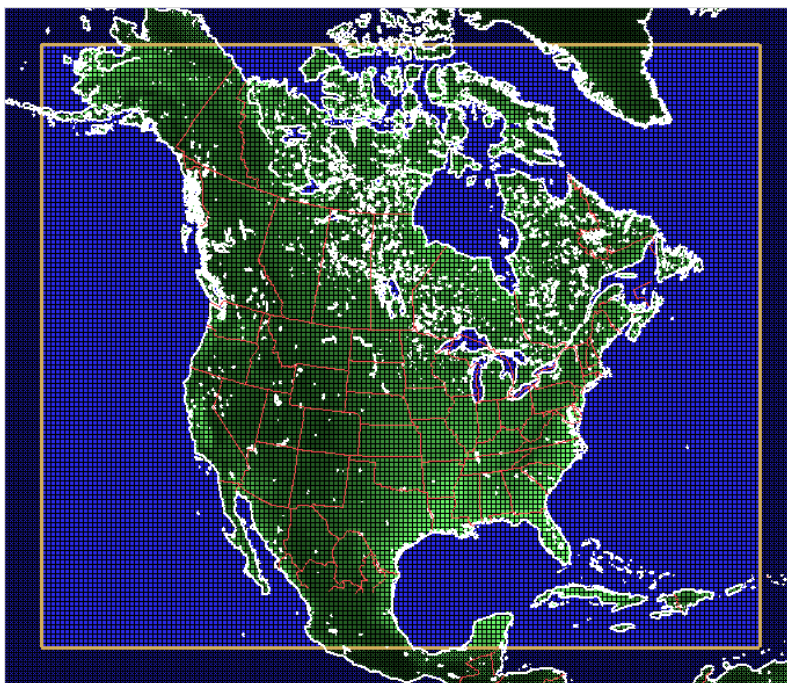


Figure 11.7 - Régions couvertes par les simulations du projet NA-CORDEX (tiré de <https://na-cordex.org/main-map.html>, résolution de 50-km / 0.44°).

La version 2020 de l'Atlas hydroclimatique sera produite à partir de modélisations hydrologiques utilisant en tant qu'intrant météorologique un ensemble de 71 simulations climatiques tirées des projets ClimEx et NA-CORDEX (MELCC 2018; Larocque et al. 2019). Il serait donc pertinent de baser les travaux futurs visant à évaluer l'impact des changements climatiques sur la recharge des nappes sur le même ensemble de scénarios climatiques que celui utilisé pour produire l'Atlas hydroclimatique 2020 dans le but de faciliter l'inter-comparaison des résultats. Toutefois, il ne serait pas réaliste d'exploiter l'ensemble des 71 réalisations climatiques utilisées par l'Atlas hydroclimatique 2020. Il est ainsi nécessaire de faire une sélection d'un certain nombre de réalisations qui permettraient de bien représenter la variance des résultats des simulations climatiques.

Braun (2017) explique le processus de sélection d'un nombre restreint de simulations climatiques permettant de bien représenter la variabilité des conditions climatiques de l'ensemble des 71 scénarios utilisés par la DEH pour la réalisation de l'Atlas hydroclimatique. La figure 11.8 montre que les changements des températures et précipitations moyennes annuelles des simulations climatiques par rapport aux conditions actuelles couvrent un vaste domaine. Ces variations reflètent le niveau d'incertitude par rapport aux prédictions des conditions climatiques futures. Afin de tenir compte de cette incertitude dans les estimations de la recharge en climat futur, il est ainsi nécessaire de sélectionner suffisamment de réalisations climatiques pour couvrir l'ensemble des conditions futures potentielles. La figure 11.8 montre que la sélection de douze réalisations climatiques permet de représenter plus de 75% de la variance de l'ensemble des scénarios climatiques utilisés pour la réalisation de l'Atlas hydroclimatique 2020. Ces douze réalisations sont également celles qui ont été sélectionnées par l'UQAM dans le cadre de leur projet de recherche relié au Plan d'action sur les changements climatiques (PACC). Le même groupe de réalisations pourrait donc être aussi utilisé en tant que données d'entrées aux outils GWHAT ou HELP pour estimer les changements potentiels de la recharge des nappes en climat futur.

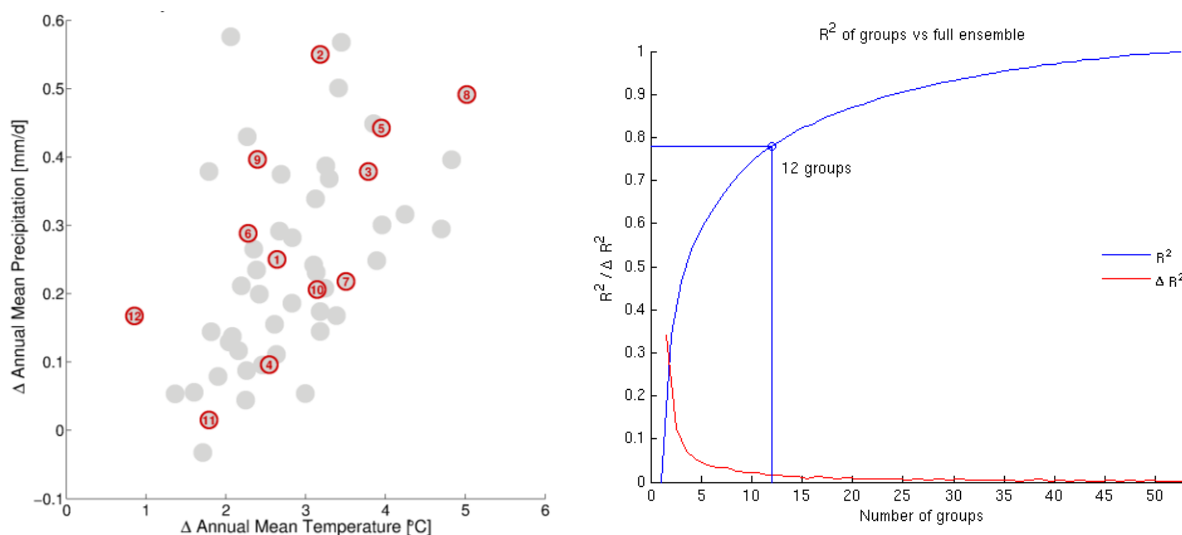


Figure 11.8 - Processus de sélection des scénarios climatiques parmi l'ensemble de scénarios qui seront utilisés par la DEH pour la réalisation de l'Atlas hydroclimatique 2020 (tiré de Braun 2017). La figure de gauche montre les changements des précipitations et températures moyennes annuelles des simulations climatiques par rapport aux conditions météorologiques actuelles. La figure de droite montre que la sélection des douze réalisations numérotées dans la figure de gauche permet d'expliquer plus de 75% de la variance de l'ensemble des simulations climatiques.

En plus de l'utilisation directe des simulations climatiques ClimEx et CODEX, il pourrait aussi être envisageable d'exploiter directement les données de l'Atlas hydroclimatique du Québec (DEH 2018). L'Atlas rend disponible des prédictions du changement d'un vaste ensemble de paramètres hydrologiques en climat futur²². Puisque l'Atlas représente déjà l'effet hydrologique du changement climatique, il pourrait être envisagé de déduire le changement de la recharge à partir des paramètres de l'Atlas. Il faut toutefois considérer cette possibilité avec prudence parce que l'emphase des travaux de simulation hydrologique a porté sur les crues alors que la recharge est reliée plutôt aux étiages qui sont plus difficiles à représenter par les modèles hydrologiques. De plus, les projections de l'Atlas se limitent au régime d'écoulement des bassins versants de superficie supérieure à 250 km².

11.5 Approches pour considérer les effets hydrologiques des changements climatiques

Afin d'évaluer l'effet des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine et plus spécifiquement sur la recharge des nappes, il est proposé d'utiliser les mêmes outils qui ont été présentés à la section 10 pour l'évaluation de la recharge historique. Ainsi, en considérant les caractéristiques des méthodes envisagées pour faire l'estimation de la recharge en climat futur (GWHAT et HELP) et des données disponibles pour définir les conditions climatiques futures, trois approches peuvent être envisagées pour évaluer l'impact du climat futur sur la recharge des nappes. Ces approches sont brièvement décrites dans les sous-sections suivantes, de l'approche indirecte la plus simple à mettre en œuvre à l'approche exploitant directement les résultats des simulations climatiques ClimEx et NA-CORDEX.

²² <https://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/CruesPrintanieres/Q1max2P.htm>

Approche 1 – Modélisation des conditions météorologiques d'années typiques

La figure 11.8 montre les écarts des précipitations et des températures moyennes annuelles de l'ensemble de 71 scénarios climatiques utilisés pour la production de l'Atlas hydroclimatique 2020 par rapport aux conditions présentes. Une première approche simple serait de répertorier les années à l'intérieur des données climatiques historiques pour lesquelles les conditions moyennes se rapprochent des écarts obtenus par les simulations climatiques. Les conditions pour ces années présentant différents niveaux d'écarts de la température et des précipitations pourraient être utilisées en tant que données météorologiques d'entrée pour GWHAT ou HELP, en répétant les conditions de la même année sur une longue période de l'ordre de 10 ans.

Une approche similaire a déjà été utilisée par Lavigne et al. (2010) afin d'évaluer l'impact de changements possibles des conditions climatiques sur la recharge estimée par HELP (Croteau et al. 2010). Ces travaux avaient permis de conclure que ce sont les zones de recharge dans les hauts topographiques qui sont les plus sensibles aux changements climatiques. Bien que cette approche ne soit pas basée sur les simulations des conditions climatiques futures, elle pourrait tout de même fournir une estimation du changement possible de la recharge en climat futur.

Approche 2 – Relations entre la recharge et les conditions météorologiques

Une autre approche qui pourrait être considérée pour évaluer l'impact du climat futur sur la recharge serait de baser cette évaluation sur la relation entre les conditions météorologiques historiques et la recharge estimée. Ainsi, sur la base d'une relation entre les conditions météorologiques et la recharge, le changement possible de la recharge en climat futur pourrait être déduit directement de la plage de changements potentiels des précipitations et températures annuelles moyennes en climat futur (figure 11.8). Une difficulté de cette approche est toutefois reliée à l'effet des conditions météorologiques des années antérieures sur la recharge.

Une variante de la même approche pourrait être de relier statistiquement la magnitude de la recharge estimée avec les données météorologiques historiques aux conditions hydrologiques. Ensuite, les changements anticipés en climat futur pour ces conditions hydrologiques de l'Atlas hydroclimatique (pour la version 2020 à venir) pourraient être utilisés pour en déduire les changements de la recharge. Par exemple, l'évolution des débits totaux annuels par rapport aux précipitations totales annuelles en climat futur pourraient indiquer l'évolution de l'évapotranspiration (ET). Ce changement d'ET pourrait être utilisé pour estimer son impact sur la recharge en climat futur. Des déductions similaires pourraient être tirées du changement dans les conditions de ruissellement.

Approche 3 – Modélisation des résultats des modèles climatiques

Finalement, l'approche la plus directe, mais la plus lourde au niveau des calculs, serait d'utiliser une gamme de réalisations des simulations du climat futur de ClimEx et CORDEX en tant que données d'entrée de GWHAT ou HELP. Dans ce cas, les mêmes simulations climatiques utilisées par l'UQAM, qui permettent de représenter plus de 75% de la variance de l'ensemble des scénarios climatiques utilisés pour la réalisation de l'Atlas hydroclimatique 2020, seraient employées (figure 11.8). Cette approche permettrait d'estimer la recharge produite par les conditions climatiques futures. En plus de la lourdeur des calculs impliqués par cette approche, le traitement de la masse de résultats produits représente aussi un défi. Cette approche permettrait d'évaluer la gamme possible du changement de recharge en climat futur.

11.6 Prédiction saisonnière de la recharge

Il serait également très utile pour le Ministère de se doter de capacités pour produire des prévisions saisonnières de la recharge ainsi que des niveaux de nappe. Pour ce faire, il serait envisageable de développer une méthodologie basée sur les prévisions météorologiques saisonnières (1 à 12 mois) qui sont produites au début de chaque mois par le système de prévision interannuelle et saisonnière canadien (SPISCan) du Centre météorologique canadien d'Environnement Canada²³.

Le SPISCan est un système d'ensemble multi-modèle (*Multi-Model Ensemble*, MME) de prévision à long terme dont l'objectif est de prévoir l'évolution des conditions météorologiques à l'échelle globale pour l'année à venir. Ce système de prévision est entièrement couplé atmosphère-océan-glace-sol. Les prévisions sont basées sur un ensemble de 20 membres, soit 10 membres de chacun des deux modèles couplés d'Environnement et Changement Climatique Canada (CanCM4 et GEM-NEMO). Les moyennes mensuelles de l'ensemble des 20 membres du système SPISCan sont distribuées publiquement dans des fichiers GRIB²⁴ sur une grille globale avec une projection latitude-longitude rectangulaire et une résolution de 145 x 73 (2.5 degrés) et 360 x 180 (1 degré)²⁵. Des prévisions sont ainsi disponibles pour plusieurs variables climatiques, incluant les taux moyens de précipitations et la température moyenne.

Il serait donc possible d'utiliser la méthode d'estimation de la recharge avec GWHAT présentée à la section 10.1 pour produire des prévisions mensuelles saisonnières de la recharge et des niveaux de nappe en utilisant comme données d'entrée la gamme de prévisions météorologiques produite par le SPISCan. LeFebvre et al. (2011) ont d'ailleurs démontré que cette méthode pouvait être utilisée pour faire des calculs mensuels de recharge, à condition d'utiliser les paramètres hydrologiques qui ont été déterminés suite au calage du modèle à partir des données historiques journalières météorologiques et de niveaux.

Plus concrètement, pour les puits qui le permettent, des taux de recharge mensuels devraient être calculés à partir des prévisions climatiques mensuelles du SPISCan pour chacune des combinaisons de valeurs des paramètres hydrologiques pour lesquelles une mesure de vraisemblance a été calculée lors de l'estimation de la recharge historique journalière avec GWHAT. Cette opération devrait être répétée pour chacun des 20 membres de l'ensemble de prévisions climatiques du SPISCan. Les mesures de vraisemblance calculées lors de l'évaluation de la recharge historique journalière pourraient ensuite être utilisées pour établir une fonction de répartition des taux prédits de la recharge saisonnière sur une base mensuelle en utilisant les valeurs de toutes les réalisations produites à partir des 20 membres de l'ensemble de prévisions climatiques du SPISCan. Ces fonctions de répartitions pourraient ensuite être utilisées pour calculer l'incertitude et les valeurs modales des taux prédits de la recharge saisonnière au-delà d'un horizon de 1 à 12 mois. La plage de valeurs de recharges obtenues pourrait aussi être utilisée pour estimer le changement des niveaux de nappe en considérant le taux de récession du niveau de nappe qui aurait déjà été défini spécifiquement pour chaque puits lors de l'estimation de la recharge pour les conditions météorologiques historiques.

Il est toutefois important de souligner que les prévisions climatiques saisonnières du SPISCan sont produites à partir de deux modèles climatiques globaux (GCM). Or, tel que mentionné précédemment, la résolution des GCM est généralement trop faible pour les besoins des modèles hydrologiques. Il serait alors recommandé de faire une mise à l'échelle des prévisions climatique du SPISCan avant de les utiliser pour effectuer des prévisions de la recharge aux puits du RSESQ. Une approche simpliste consisterait à utiliser les prévisions saisonnières rétrospectives qui sont rendues disponibles par Environnement Canada pour la

²³ https://meteo.gc.ca/saisons/index_f.html

²⁴ https://meteo.gc.ca/grib/what_is_GRIB_f.html

²⁵ https://meteo.gc.ca/grib/grib2_cansips_f.html

période allant de 1981 à 2010 pour calculer les anomalies mensuelles saisonnières de chacune des variables climatiques prédites. La mise à l'échelle des prévisions pourrait alors être faite simplement en additionnant ces anomalies aux normales mensuelles calculées aux points de la grille ou aux stations climatiques associées à chacun des puits du RSESQ.

Il ne serait toutefois pas possible d'utiliser les prévisions climatiques saisonnières du SPISCan pour produire des prédictions saisonnières de la recharge avec la méthode présentée à la section 10.2 avec HELP, puisque le modèle HELP requiert des données climatiques journalières. Néanmoins, il serait possible de faire une mise à l'échelle dans le temps des prévisions climatiques saisonnières du SPISCan afin de produire des prévisions climatiques quotidiennes en utilisant une approche similaire à celle développée par Ressources naturelles Canada pour anticiper la sévérité des conditions météo propices aux incendies²⁶. L'approche consisterait d'abord à utiliser les données climatiques journalières du RSCQ (voir section 6) pour produire une année météorologique typique à chacun des points de la grille. La production des années météorologiques typiques pourrait être faite à l'aide d'un générateur de données météo, tel que celui développé par Agriculture and Agri-Food Canada (Hayhoe 2000). C'est d'ailleurs cet outil qui a été utilisé pour faire la mise à l'échelle des résultats des GCM dans le cadre du projet de la Commission Géologique du Canada portant sur l'évolution de la concentration des nitrates dans les eaux souterraines dans le contexte des changements climatiques et des adaptations agricoles à l'Île-du-Prince-Édouard (Paradis et al. 2016).

L'étape suivante consisterait à utiliser les prévisions saisonnières rétrospectives pour calculer les anomalies mensuelles pour chacune des variables et chacun des points de la grille des prévisions climatiques saisonnières du SPISCan. Les prévisions journalières pour la température moyenne seraient alors calculées pour chacun des points de la grille du RSCQ en ajoutant l'anomalie correspondante de la grille de prévisions du SPISCan aux valeurs quotidiennes de l'année météorologique typique. Pour les précipitations, l'anomalie serait appliquée aux valeurs de l'année météorologique typique via un changement en pourcentage des pluies hebdomadaires. Cet exercice pourrait être réalisé pour l'ensemble des 20 membres de l'ensemble de prévisions du SPISCan et les séries climatiques journalières ainsi produites pourraient être utilisées pour prolonger les séries climatiques historiques utilisées comme données d'entrée de HELP pour produire une gamme de prévisions saisonnières de la recharge spatialement distribuée sur un horizon de 1 à 12 mois.

²⁶ <https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/renseignements/sommaire/ffws>

12 SARDES, UN OUTIL DE GESTION DU RSESQ

La réalisation du présent mandat a impliqué le développement de plusieurs méthodologies afin de traiter et exploiter les données acquises par le RSESQ. Ainsi, plusieurs preuves de concepts fonctionnelles ont été produites pour mettre en œuvre ces méthodologies et les appliquer aux données du RSESQ. L'application des méthodologies exigeait que les données du RSESQ soient facilement accessibles, ce qui n'était pas possible avec la base de données existante du RSESQ. Une nouvelle base des données et les outils requis pour exploiter cette base de données ont donc été développés pour permettre la démonstration des méthodologies. La présente section décrit l'outil de gestion des données du RSESQ ainsi développé qui a été nommé « Suivi, analyse et représentation de données d'eau souterraine » (SARDES). Cet outil peut servir à exploiter les données du RSESQ ou de tout autre système de suivi de l'eau souterraine.

12.1 Base de données SQLite

Par défaut, SARDES permet de se connecter à une base de données SQLite dont la structure a été spécialement pensée pour la gestion et le stockage des données d'un réseau de suivi de l'eau souterraine. La structure de la BD est présentée par un diagramme entité-association à la figure 12.1 et une description des champs de chacune des tables de la BD est donnée dans les tableaux 12.1 à 12.15.

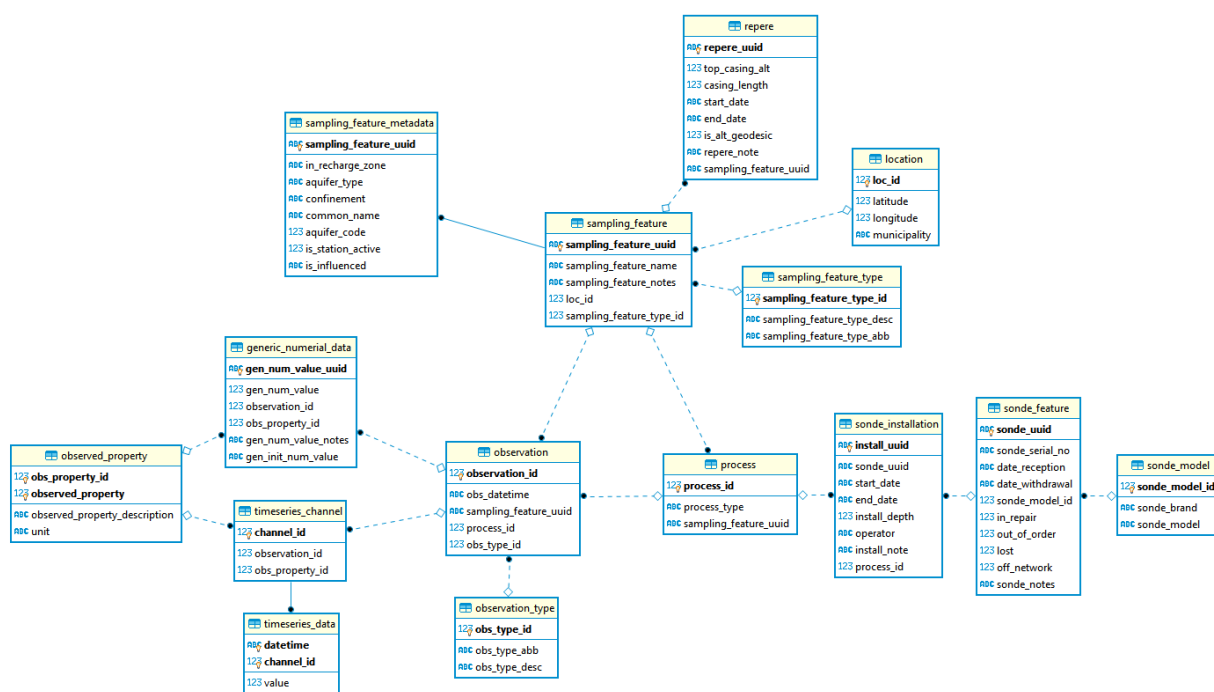


Figure 12.1 - Diagramme entité-association présentant la structure de la base de données utilisée par défaut dans SARDES.

L'organisation des données dans la BD est centrée autour des trois tables nommées « sampling_feature », « process » et « observation ». La table « sampling_feature » sert à cataloguer l'ensemble des stations de suivi de l'eau souterraine, comme les puits d'observation, les piézomètres, les puits municipaux ou les puits résidentiels. La table « process » sert à cataloguer l'ensemble des procédés qui sont effectués aux stations

de suivi (« `sampling_feature` ») pour la collecte des données, comme l'installation des sondes barométriques et de pression dans les puits et la collecte d'échantillon d'eau pour les analyses géochimiques. Enfin, la table « `observation` » sert à cataloguer l'ensemble des observations qui sont faites aux stations de suivi par le biais des procédés (« `process` »).

Au niveau des stations de suivi (« `sampling features` »), les différents types de stations sont catalogués dans la table « `sampling_feature_type` ». La table « `repere` » contient les informations permettant de référencer à chacune des stations de suivi les mesures de niveau d'eau et le niveau de la surface du sol par rapport au niveau moyen de la mer. Une date de début et de fin est associée à chacune des entrées de la table « `repere` », ce qui permet de cataloguer les changements qui pourraient survenir par rapport à l'altitude de référence ou au niveau du sol aux stations de suivi. La table « `sampling_feature_metadata` » contient les informations permettant de caractériser la station de suivi elle-même, mais également la nappe d'eau souterraine et le contexte hydrogéologique autour de la station. Enfin, la table « `location` » contient le nom de la municipalité dans laquelle chaque station de suivi est située, de même que les coordonnées latitude et longitude des stations en degrés décimaux.

Au niveau des procédés (« `process` »), l'information en lien avec l'installation des sondes barométriques et à pression aux stations de suivi est stockée dans la table « `sonde_installation` » alors que l'information en lien avec les sondes (ex. : modèle, marque, numéro de série, etc.) est stockée dans la table « `sonde_feature` ». De plus, la table « `sonde_model` » contient une librairie de modèles et de marques de sondes à pression et barométriques qui sont disponibles sur le marché pour le suivi des niveaux de l'eau souterraine. Une installation de sonde consiste en une profondeur d'installation par rapport à l'altitude de référence de la station de suivi (« `top_casing_alt` » dans la table « `repere` »), une date de début correspondant à l'installation de la sonde et une date de fin lorsque la sonde a été retirée de la station de suivi. Les informations en lien avec l'installation des sondes sont utilisées lors du chargement des données brutes pour transformer les données d'élévation de niveau d'eau mesurées par les sondes à pression en profondeur par rapport à l'altitude de référence de la station de suivi. De plus, c'est grâce à ces informations que SARDES est en mesure d'associer automatiquement les mesures des fichiers bruts de données produits par les sondes à pression aux stations de suivi qui sont cataloguées dans la table « `sampling_feature` » de la base de données. Pour le moment, seuls les procédés d'installation des sondes sont catalogués dans la base de données. Dans une version future de la base de données, on retrouvera également le procédé d'échantillonnage de l'eau souterraine pour les analyses géochimiques et l'acquisition de profils verticaux dans les puits.

Au niveau des observations, deux types sont actuellement catalogués dans la base de données : les mesures manuelles de niveaux d'eau et les enregistrements de séries chronologiques. Dans une version future de la base de données, on retrouvera également les rapports d'analyses géochimiques des échantillons d'eau souterraine, les mesures physico-chimiques *in situ* et les profils verticaux mesurés aux stations de suivi. Chaque observation doit contenir une date et doit être associée à une station de suivi de la table « `sampling_feature` ». Optionnellement, les observations peuvent être associées à un procédé de la table « `process` ».

Les mesures manuelles de niveau d'eau correspondent aux mesures ponctuelles de niveau d'eau prises par les opérateurs du réseau à l'aide d'une sonde à niveau d'eau lors des visites aux stations de suivi. Les mesures manuelles ne sont associées à aucun procédé puisque seulement la valeur numérique et la date de mesure sont actuellement stockées dans la base de données pour ce type d'observation. Les valeurs numériques des mesures manuelles de niveau d'eau sont stockées dans la table « `generic_numerical_data` » alors que la date de mesure est stockée directement dans la table « `observation` ».

En ce qui concerne les enregistrements de séries chronologiques, ce type d'observation doit être associé à un procédé de la table « process » lorsque l'information en lien avec l'installation de la sonde ayant servi à l'acquisition des données est disponible. De façon générale, un enregistrement de séries chronologiques correspond à une ou plusieurs séries de données chronologiques acquises en simultané au moyen d'un procédé unique (une installation de sonde). Les séries de données chronologiques de chaque enregistrement sont cataloguées dans la table « timeseries_channel ». Chaque série temporelle est associée à un enregistrement et contient des données chronologiques continues d'une même propriété, comme le niveau, la température ou la conductivité électrique de l'eau souterraine. Les valeurs numériques de chacune des séries chronologiques sont stockées dans la table « timeseries_data » où chaque donnée est associée à une date et à une série chronologique. La date indiquée dans la table « observation » pour les enregistrements de séries chronologiques devrait correspondre à la date et l'heure de la donnée temporelle la plus récente de l'enregistrement.

Tableau 12.1 – Description des champs de la table « sampling_feature »

Champ	Type	Description
sampling_feature_name	VARCHAR	Identifiant de la station de suivi dans le réseau de suivi. À ne pas confondre avec l'identifiant utilisé pour identifier la station dans la base de données.
sampling_feature_notes	VARCHAR	Notes en lien avec la station de suivi.
loc_id	INTEGER	Identifiant permettant de faire un lien avec la clé primaire de la table « location ».
sampling_feature_type_id	INTEGER	Identifiant permettant de faire un lien avec la clé primaire de la table « sampling_feature_type ».

Tableau 12.2 – Description des champs de la table « sampling_feature_type »

Champ	Type	Description
sampling_feature_type_desc	VARCHAR	Description du type de station de suivi.
sampling_feature_type_abb	VARCHAR	Code alphanumérique du type de station de suivi.

Tableau 12.3 – Description des champs de la table « sampling_feature_metadata »

Champ	Type	Description
in_recharge_zone	VARCHAR	Indique si la station est située dans une zone de recharge de la nappe d'eau souterraine.
aquifer_type	VARCHAR	Indique si le puits est ouvert ou crépiné dans les dépôts meubles ou dans l'aquifère rocheux.
confinement	VARCHAR	Indique le niveau de confinement de la nappe à la station.
common_name	VARCHAR	Correspond au nom commun de la station de suivi.
aquifer_code	INTEGER	Code numérique permettant de classifier le type d'aquifère à la station
is_station_active	BOOLEAN	Indique si la station est active ou non.
is_influenced	VARCHAR	Indique si les niveaux d'eau mesurés à la station sont influencés ou non par des facteurs anthropiques.

Tableau 12.4 – Description des champs de la table « repere »

Champ	Type	Description
top_casing_alt	FLOAT	Corresponds à l'altitude de référence, en m par rapport au niveau moyen de la mer, par rapport à laquelle les niveaux d'eau souterraine sont stockés dans la base de données. En fonction des projets, cette valeur correspond généralement au haut du tubage de PVC ou au haut du tubage de protection des puits.
casing_length	FLOAT	Longueur permettant de référencer le niveau du sol à chacune des stations de suivi par rapport à l'altitude de référence. Cette valeur correspond généralement à la longueur hors sol du tubage de PVC ou du tubage de protection des puits. Une valeur négative pour ce champ indique une altitude de référence sous le niveau de la surface du sol, comme c'est le cas par exemple pour les puits d'observation avec une tête de puits encastrée au niveau du sol.
start_date	DATETIME	Date de début de la période de validité des valeurs de références « reference_altitude » et « length_above_ground ».
end_date	DATETIME	Date de fin de la période de validité des valeurs de références « reference_altitude » et « length_above_ground ».
is_alt_geodesic	BOOLEAN	Indique si l'altitude de référence a été déterminée précisément ou a été approximée.
repere_note	VARCHAR	Note en lien avec les valeurs de repère de la station.
sampling_feature_uuid	CHAR	Relation avec la clé primaire de la table « sampling_feature ».

Tableau 12.5 – Description des champs de la table « location»

Champ	Type	Description
latitude	FLOAT	Coordonnée géographique de latitude en degrés décimaux.
longitude	FLOAT	Coordonnée géographique de longitude en degrés décimaux.
municipality	CHAR	Municipalité correspondante aux coordonnées géographiques.

Tableau 12.6 – Description des champs de la table « process»

Champ	Type	Description
process_type	CHAR	Type du procédé réalisé à la station de suivi.
sampling_feature_uuid	UUID	L'identifiant de la station de suivi où le procédé a été réalisé. Permet de faire un lien avec la clé primaire de la table « sampling_feature ».

Tableau 12.7 – Description des champs de la table « sonde_installation»

Champ	Type	Description
sonde_uuid	FLOAT	Identifiant de la sonde installée à la station de suivi et faisant le lien avec la clé primaire de la table « sonde_feature ».
start_date	DATETIME	Date correspondant à l'installation de la sonde à la station de suivi.
end_date	DATETIME	Date correspondant au retrait de la sonde à la station de suivi.

install_depth	FLOAT	Profondeur d'installation de la sonde par rapport à l'altitude de référence définie à la station de suivi (valeur correspondante du champ « top_casing_alt » de la table « repere »)
operator	VARCHAR	Nom de l'opérateur ayant installé la sonde à la station de suivi.
install_notes	VARCHAR	Notes en lien avec l'installation de la sonde à la station de suivi.
process_id	INTEGER	Permet de faire un lien avec la table « process ».

Tableau 12.8 – Description des champs de la table « sonde_feature »

Champ	Type	Description
sonde_serial_no	CHAR	Numéro de série de la sonde.
date_reception	DATETIME	Date et heure correspondantes à l'incorporation de la sonde dans le réseau de suivi.
date_withdrawal	DATETIME	Date et heure correspondantes au retrait de la sonde du réseau de suivi
in_repair	BOOLEAN	Champ indiquant si la sonde est en cours de réparation.
out_of_order	BOOLEAN	Champ indiquant si la sonde est hors d'usage.
lost	BOOLEAN	Champ indiquant si la sonde est perdue.
off_network	BOOLEAN	Champ indiquant si la sonde est hors réseau.
sonde_notes	VARCHAR	Notes en lien avec la sonde.
sonde_model_id	INTEGER	Permet de faire un lien avec la clé primaire de la table « sonde_model ».

Tableau 12.9 – Description des champs de la table « sonde_model »

Champ	Type	Description
sonde_brand	VARCHAR	Marque de sonde.
sonde_model	VARCHAR	Modèle de sonde.

Tableau 12.10 – Description des champs de la table « observation »

Champ	Type	Description
obs_datetime	DATETIME	Date et heure correspondantes à l'observation. Pour les observations correspondantes à des enregistrements de données chronologiques, la date et l'heure de la donnée la plus récente devraient être utilisées.
sampling_feature_uuid	UUID	L'identifiant de la station de suivi où l'observation a été acquise. Permet de faire un lien avec la clé primaire de la table « sampling_feature ».
process_id	UUID	L'identifiant du procédé par lequel l'observation a été acquise. Permet de faire le lien avec la clé primaire de la table « process ».
obs_type_id	INTEGER	Lien avec la clé primaire de la table « observation_type »

Tableau 12.11 – Description des champs de la table « observation_type »

Champ	Type	Description
obs_type_abb	VARCHAR	Abréviation du type d'observation.
obs_type_desc	VARCHAR	Description du type d'observation.

Tableau 12.12 – Description des champs de la table « generic_numerical_data »

Champ	Type	Description
gen_num_value	FLOAT	Valeur numérique de l'observation
observation_id	INTEGER	Lien avec la clé primaire de la table « observation »
obs_property_id	INTEGER	Lien avec la clé primaire de la table « observed_property »
gen_num_value_notes	VARCHAR	Notes en lien avec l'observation.

Tableau 12.13 – Description des champs de la table « timeseries_channel »

Champ	Type	Description
observation_id	INTEGER	Lien avec la clé primaire de la table « observation ».
obs_property_id	INTEGER	Lien avec la clé primaire de la table « observed_property ».

Tableau 12.14 – Description des champs de la table « timeseries_data »

Champ	Type	Description
datetime	DATETIME	Date et heure de la donnée temporelle.
channel_id	INTEGER	Lien avec la clé primaire de la table « timeseries_channel ».
value	BOOL	Valeur numérique de la donnée temporelle.

Tableau 12.15 – Description des champs de la table « observed_property »

Champ	Type	Description
observed_property	VARCHAR	Nom de la propriété observée (ex. : niveau d'eau, température de l'eau, etc.).
observed_property_description	VARCHAR	Description de la propriété observée.
unit	VARCHAR	Unités utilisées pour stocker les valeurs numériques de la propriété observée.

12.2 Gestionnaire de connexion à la base de données

Le gestionnaire de connexion à la base de données est une composante de SARDES qui s'occupe de gérer la connexion et l'ensemble des communications entre SARDES et les bases de données. Présentement, SARDES ne peut se connecter qu'aux bases de données de type SQLite qui ont un schéma de données respectant les spécifications qui sont décrites à la section 12.1. Toutefois, le gestionnaire de connexion a été conçu pour qu'il soit facile de l'adapter dans le futur afin de pouvoir connecter SARDES à d'autres types de bases de données utilisant une technologie et un schéma de stockage des données différents de ceux décrits à la section 12.1.

Dans l'interface graphique de SARDES, l'utilisateur peut créer une nouvelle base de données ou se connecter à une base de données existante de type « SARDES SQLite » à partir du dialogue de connexion à la base de données. L'utilisateur peut accéder à ce dialogue en cliquant sur le bouton « Se connecter à la base de données » qui est situé dans la barre d'outils principale de SARDES.

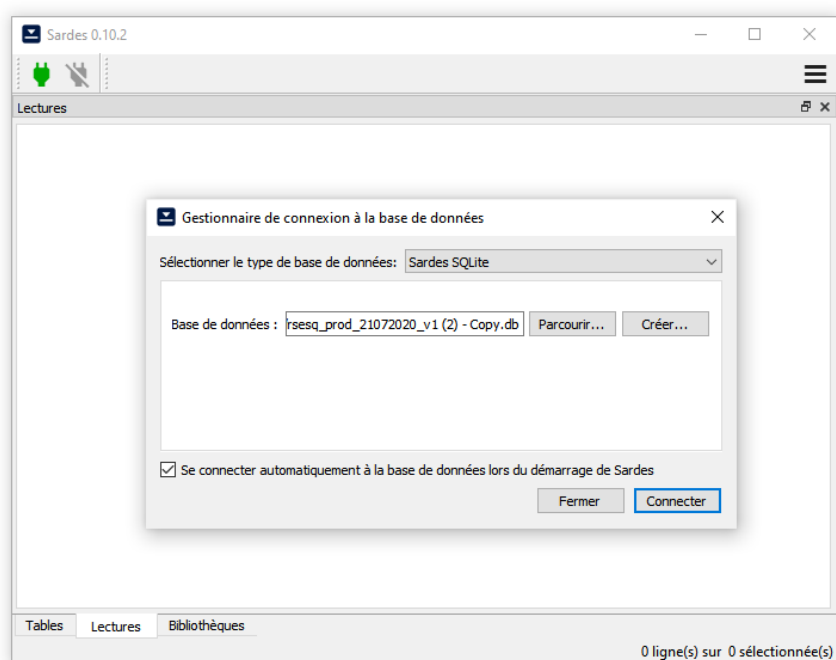


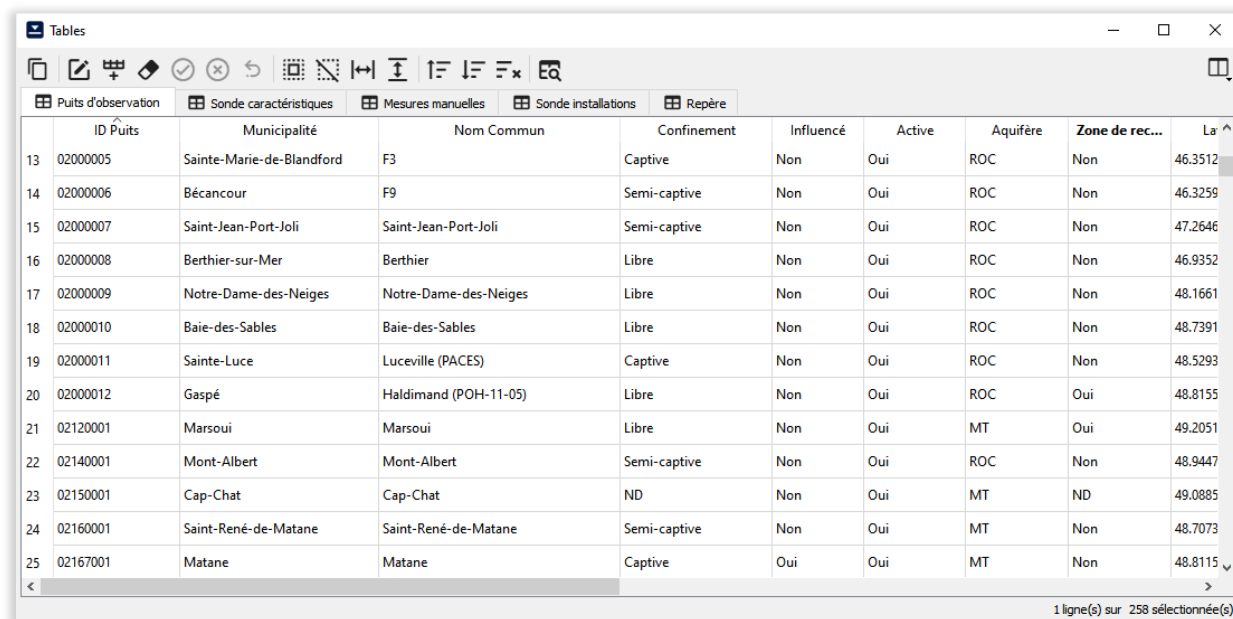
Figure 12.2 – Gestionnaire permettant de connecter SARDES à une base de données.

12.3 Présentation de l'outil « Tables »

L'outil « Tables » est l'élément central de SARDES et contient un ensemble de tables qui sont nécessaires à la gestion du réseau de suivi des niveaux d'eau. Un aperçu de cet outil est présenté à la figure 12.3. L'organisation des données dans ces tables est basée sur la structure de la base de données Microsoft Access qui a été développée par le ministère pour la gestion des données de son réseau de suivi.

La table « Puits d'observation » présente l'ensemble des informations liées aux stations de suivi. La table « Sonde caractéristiques » contient la liste des caractéristiques des sondes barométriques et piézométriques qui sont utilisées pour acquérir les données du réseau de suivi. La table « Mesures manuelles » contient les mesures manuelles de niveaux d'eau acquises par les opérateurs du réseau lors des visites aux stations de suivi. Pour cette table en particulier, un outil a été développé afin de faciliter le chargement de nouvelles

données dans la base de données à l'aide du presse-papier. La table « Sonde installations » contient l'ensemble des informations en lien avec l'installation des sondes aux stations du réseau. Enfin, la table « Repère » contient les informations permettant de référencer à chacune des stations de suivi les mesures de niveau d'eau et le niveau de la surface du sol par rapport au niveau moyen de la mer.



	ID Puits	Municipalité	Nom Commun	Confinement	Influencé	Active	Aquifère	Zone de rec...	La ^
13	02000005	Sainte-Marie-de-Blandford	F3	Captive	Non	Oui	ROC	Non	46.3512
14	02000006	Bécancour	F9	Semi-captive	Non	Oui	ROC	Non	46.3259
15	02000007	Saint-Jean-Port-Joli	Saint-Jean-Port-Joli	Semi-captive	Non	Oui	ROC	Non	47.2646
16	02000008	Berthier-sur-Mer	Berthier	Libre	Non	Oui	ROC	Non	46.9352
17	02000009	Notre-Dame-des-Neiges	Notre-Dame-des-Neiges	Libre	Non	Oui	ROC	Non	48.1661
18	02000010	Baie-des-Sables	Baie-des-Sables	Libre	Non	Oui	ROC	Non	48.7391
19	02000011	Sainte-Luce	Luceville (PACES)	Captive	Non	Oui	ROC	Non	48.5293
20	02000012	Gaspé	Haldimand (POH-11-05)	Libre	Non	Oui	ROC	Oui	48.8155
21	02120001	Marsoui	Marsoui	Libre	Non	Oui	MT	Oui	49.2051
22	02140001	Mont-Albert	Mont-Albert	Semi-captive	Non	Oui	ROC	Non	48.9447
23	02150001	Cap-Chat	Cap-Chat	ND	Non	Oui	MT	ND	49.0885
24	02160001	Saint-René-de-Matane	Saint-René-de-Matane	Semi-captive	Non	Oui	MT	Non	48.7073
25	02167001	Matane	Matane	Captive	Oui	Oui	MT	Non	48.8115

Figure 12.3 - Outil « Tables » de SARDES permettant de visualiser les données servant à la gestion du réseau de suivi.

12.4 Présentation de l'outil « Lectures »

L'outil « Lectures » permet de visualiser sous la forme de tableaux les données de suivi des stations du réseau dans des tables individuelles. Par défaut, cet outil ne présente aucune donnée. Pour afficher les données d'une station de suivi en particulier, l'utilisateur doit sélectionner cette station dans la table « Puits d'observation » de l'outil « Tables » et doit ensuite cliquer sur le bouton « Afficher les données ». La figure 12.4 présente un exemple de l'outil « Lectures » où les données de suivi de trois puits d'observation sont présentement affichées.

12.4.1 Outil de visualisation des données de suivi

Pour chacune des tables ouvertes dans l'outil « Lectures », l'utilisateur peut afficher les données de suivi dans un visualiseur sous la forme d'un graphique interactif en cliquant sur le bouton « Tracer les données ». Un aperçu de cet outil est présenté à la figure 12.5. Des fonctionnalités de zoom avant et arrière ainsi que de translation horizontale et verticale des courbes sont disponibles dans le visualiseur pour l'exploration interactive des données. Différentes fonctions de sélection des données sont également disponibles dans la barre d'outils du visualiseur. Toutefois, la sélection des données n'est rattachée pour le moment à aucune fonctionnalité de SARDES. Dans une version future de SARDES, il est prévu que la sélection des données permettra, entre autres, d'effectuer des transformations sur les données directement à partir du visualiseur de données interactif.

Lectures

	Date heure	Numéro sonde	Niveau d'eau	Température	Profondeur	ID Observation
1	2009-07-21 19:00:00	1031988	2.851667	7.014	4.31	19
2	2009-07-22 01:00:00	1031988	2.85068	7.026	4.31	19
3	2009-07-22 07:00:00	1031988	2.851037	7.039	4.31	19
4	2009-07-22 13:00:00	1031988	2.841484	7.047	4.31	19
5	2009-07-22 19:00:00	1031988	2.815266	7.063	4.31	19
6	2009-07-23 01:00:00	1031988	2.813406	7.069	4.31	19
7	2009-07-23 07:00:00	1031988	2.814298	7.086	4.31	19
8	2009-07-23 13:00:00	1031988	2.819269	7.102	4.31	19
9	2009-07-23 19:00:00	1031988	2.818677	7.112	4.31	19
10	2009-07-24 01:00:00	1031988	2.820569	7.122	4.31	19
11	2009-07-24 07:00:00	1031988	2.821823	7.137	4.31	19
12	2009-07-24 13:00:00	1031988	2.835208	7.156	4.31	19
13	2009-07-24 19:00:00	1031988	2.845263	7.163	4.31	19
14	2009-07-25 01:00:00	1031988	2.846979	7.173	4.31	19
15	2009-07-25 07:00:00	1031988	2.846205	7.188	4.31	19

1 ligne(s) sur 41398 sélectionnée(s)

Figure 12.4 - Outil « Lectures » de SARDES permettant de visualiser les séries chronologiques de données acquises aux stations du réseau de suivi.

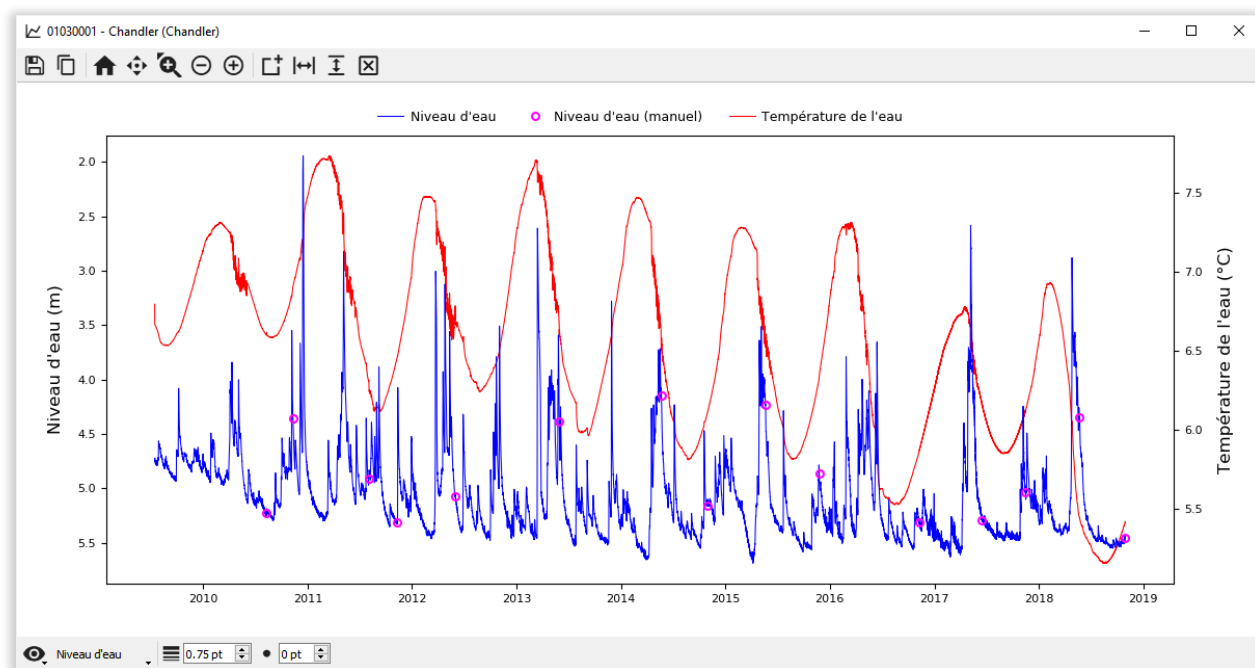


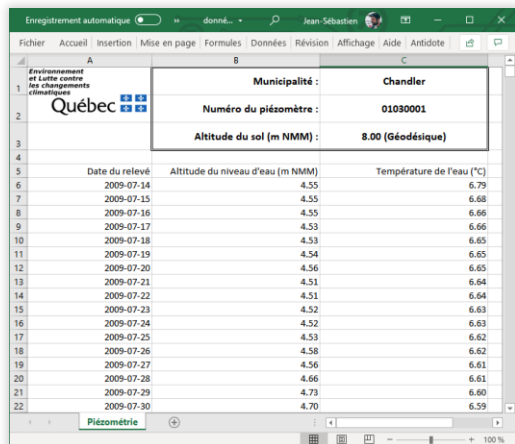
Figure 12.5 – Exemple de graphique interactif affichant des données temporelles de niveau et de température de l'eau dans le visualiseur de données.

L'utilisateur peut également sélectionner les courbes qu'il désire afficher sur le graphique interactif par le biais du bouton « Changer la visibilité des éléments du graphique » situé sur la barre d'outils inférieure du visualiseur de données. De plus, un menu déroulant, également situé sur la barre d'outils inférieure du visualiseur, permet de sélectionner l'élément du graphique ayant le focus (ex. : données de niveaux d'eau, données de températures de l'eau, etc.). L'ensemble des courbes associées avec l'élément du graphique ayant le focus sont mises en avant plan sur le graphique, peuvent être sélectionnées avec les différents outils de sélection des données et leur affichage peut être modifié grâce aux outils de navigation des données qui ont été décrits plus haut.

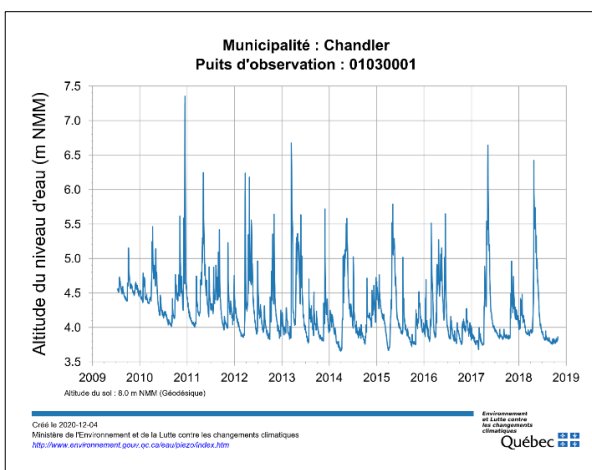
12.4.2 Outil d'export des données de suivi

Deux outils permettent d'exporter les données journalières de suivi sous la forme d'un chiffrier Excel ou d'un graphique d'un hydrogramme de puits en format PDF, PNG, SVG ou JPEG. Ces outils sont accessibles via les boutons « Créer un document XLSX » et « Créer un hydrogramme » qui sont situés sur la barre d'outils de l'outil « Lectures ». Un exemple d'un fichier XLSX et d'un graphique d'un hydrogramme de puits sont présentés dans la figure 12.6a et la figure 12.6b, respectivement.

Différentes options sont disponibles pour configurer le contenu des fichiers XLSX et des graphiques d'hydrogrammes de puits qui sont produits par SARDES, comme l'ajout d'un logo, du nom de l'auteur ou d'un hyperlien vers un site web. Ces options sont accessibles via le panneau de configuration « Paramètres des documents » qui est situé dans la fenêtre de « Préférences » de SARDES qui est accessible via le bouton « Outils et Options » situé en haut à droite dans la barre d'outils principale de SARDES.



(a)



(b)

Figure 12.6 – Exemple (a) de chiffrier Excel et (b) d'hydrogramme de puits produits avec les outils « Créer un document XLSX » et « Créer un hydrogramme » de l'outil « Lectures ».

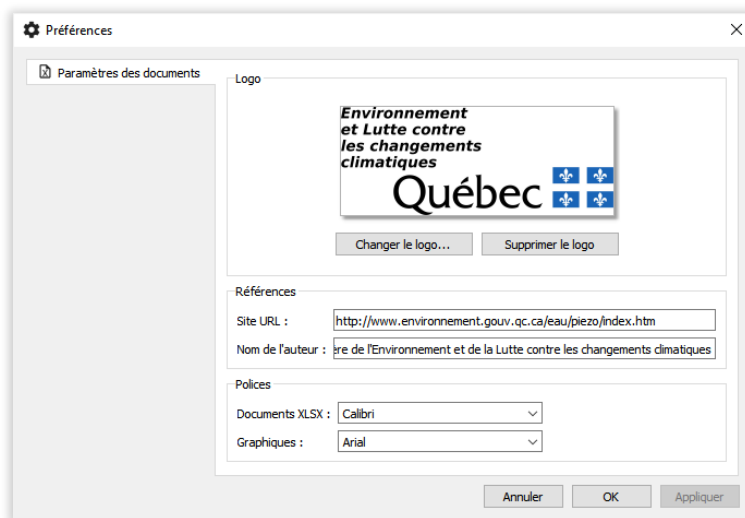


Figure 12.7 – Panneau de configuration permettant de modifier le contenu des fichiers XLSX et des graphiques d'hydrogrammes de puits qui sont produits par SARDES.

12.5 Présentation de l'outil « Bibliothèques »

L'outil « Bibliothèques » permet de visualiser l'ensemble des bibliothèques qui sont nécessaires pour le stockage des données dans la base de données (figure 12.8). Pour le moment, l'outil ne contient que la bibliothèque contenant la liste des modèles et des marques de sondes pouvant être utilisées pour l'acquisition des données de niveau d'eau. D'autres bibliothèques seront ajoutées à cet outil lors de l'ajout du volet géochimique dans une version ultérieure de SARDES.

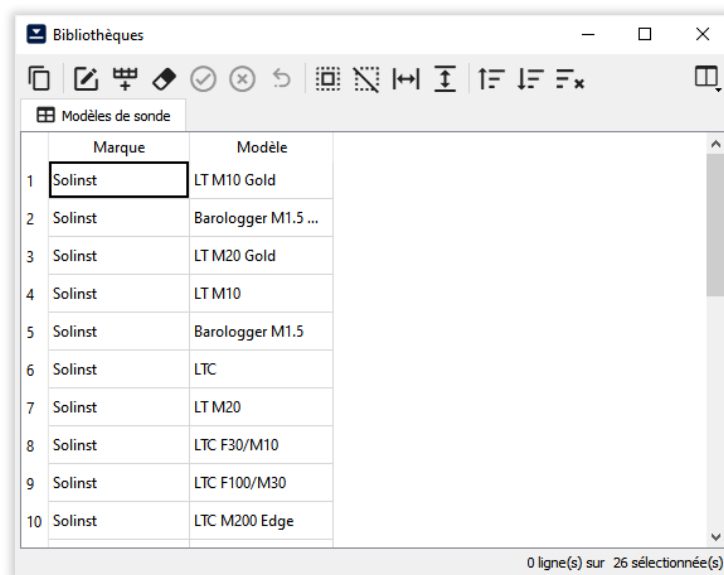


Figure 12.8 : Outil « Bibliothèque » de SARDES permettant de visualiser l'ensemble des bibliothèques qui sont nécessaires pour le stockage des données dans la base de données.

12.6 Présentation de l'outil de chargement des données de suivi

Un outil a été développé dans le but de faciliter le chargement des données de suivi dans la base de données à partir des fichiers de données brutes produites par les sondes barométriques et à pression. Un aperçu de cet outil est présenté à la figure 12.9.

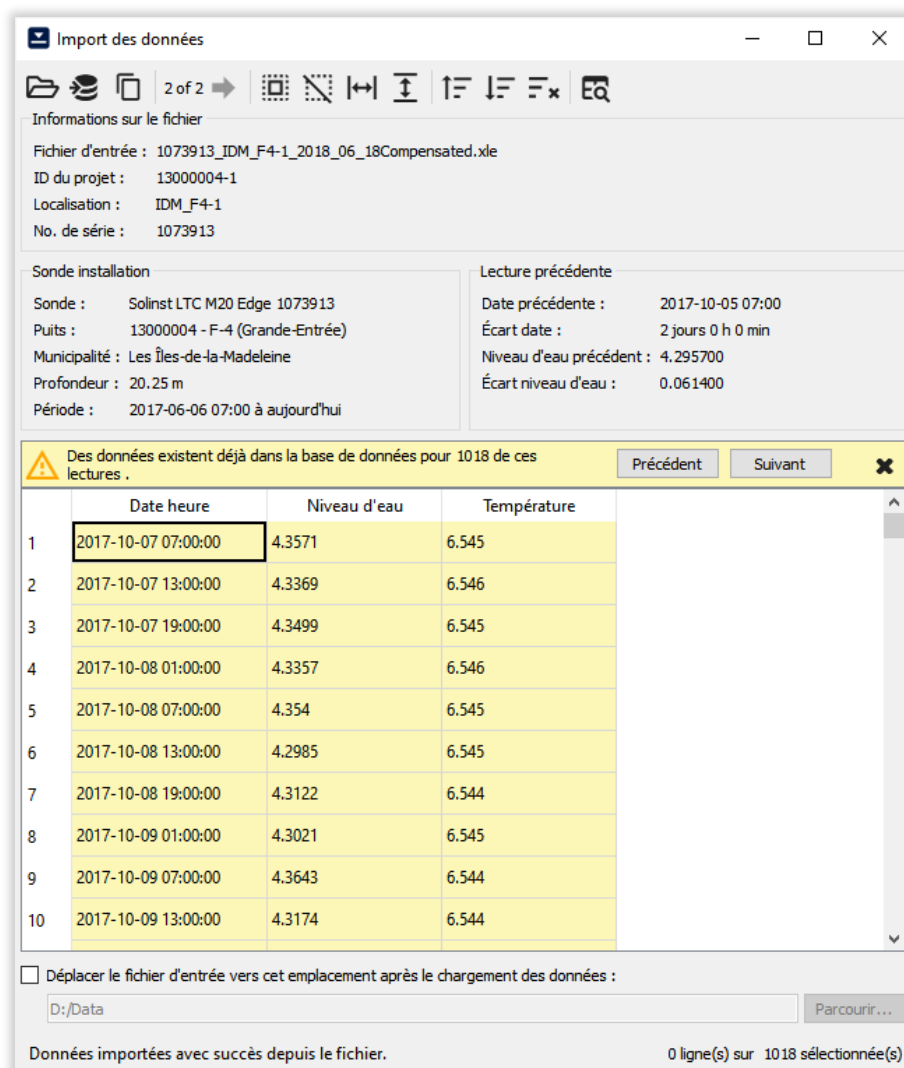


Figure 12.9 : Outil SARDES pour le chargement des données de suivi dans la base de données à partir des fichiers bruts de données produits par les sondes barométriques et à pression.

À partir de cet outil, l'utilisateur peut sélectionner un ou plusieurs fichiers de données de niveau d'eau compensées en cliquant sur le bouton « Ouvrir ». L'outil de chargement des données est basé sur la librairie Python « HydroSensorReader »²⁷ qui a été développée par la CGC conjointement avec l'INRS. Cette librairie permet de lire les fichiers bruts qui sont produits par les sondes barométriques et à pressions de diverses marques et modèles. Toutefois, seul le chargement de données à partir de fichiers produits par des

²⁷ <https://github.com/cgq-qgc/HydroSensorReader>

sondes de la compagnie Solinst a été testé dans SARDES. Il serait toutefois aisé de supporter le chargement pour d'autres types de sondes dans SARDES.

Lors du chargement des données des fichiers bruts, SARDES fait automatiquement le lien entre les nouvelles données et l'installation de la sonde et la station de suivi correspondante et affiche les informations dans l'encadré « Sonde installation ». Si, pour un fichier brut donné, SARDES ne réussit pas à trouver dans la base de données une installation de sonde correspondant à la sonde ayant produit le fichier, une erreur est alors affichée dans l'interface de l'outil. Un avertissement est également affiché dans l'interface lorsque SARDES détecte que des données existent déjà dans la base de données pour la sonde et la plage de temps correspondantes aux données brutes.

L'utilisateur peut également ouvrir dans l'outil « Lecture » de SARDES la table des données de suivi actuellement stockées dans la BD pour la station de suivi correspondante au fichier de données brut en cliquant sur le bouton « Afficher les données ». Les données brutes peuvent enfin être chargées dans la BD en cliquant sur le bouton « Enregistrer dans la base de données ». Une fois les données chargées dans la BD pour un fichier donné, l'utilisateur peut alors passer au chargement du fichier suivant en cliquant sur le bouton « Charger le fichier suivant ».

Une option permet également de déplacer automatiquement les fichiers bruts dans un emplacement spécifié par l'utilisateur après le chargement des données. Cette option peut être activée en cochant la case « Déplacer le fichier d'entrée vers cet emplacement après le chargement des données » et en spécifiant un emplacement valide en cliquant sur le bouton « Parcourir ».

12.7 Outil pour la publication des données

Cet outil est en cours de développement et permettra à terme de produire un fichier « KML » (*Keyhole Markup Language*) pouvant être utilisé pour l'affichage des stations de suivi et la publication des données dans Google Maps ou tout autre logiciel géospatial implémentant l'encodage KML.

L'outil permettra de produire de façon automatisée les hydrogrammes de puits de même que les fichiers Excel contenant les données de suivi et les résultats des analyses géochimiques de l'ensemble des stations de réseau. Des hyperliens vers les fichiers seront ajoutés aux infobulles des stations de suivi correspondantes dans le fichier « KML » afin de permettre aux utilisateurs du réseau de télécharger les données à partir du logiciel GIS utilisé pour publier le fichier « KML ». Un outil devra également être développé pour lier les stations aux fichiers PDF contenant les logs de forage.

12.8 Outil de gestion des données géochimiques

Cet outil est en cours de développement et devrait ressembler à l'outil « Tables » qui a été présenté à la section 12.3. Cet outil contiendra toutes les tables permettant la gestion des données géochimiques acquises aux stations de suivi du réseau, incluant les tables « Purge », « Résultats », « Mesures in situ » et « Échantillonnage ». Un outil sera également développé pour faciliter le chargement des résultats provenant des rapports d'analyses géochimiques des laboratoires.

13 SYNTHÈSE DES PROJETS PACC ET DÉVELOPPEMENT DU RSESQ

Mandat : *Produire une synthèse de l'ensemble des informations et des idées qui auront été produites tout au long des projets PACC, donc faire un recensement de tout ce qui devrait être fait et de tout ce qu'il serait possible de faire à court et moyen terme pour améliorer la gestion, l'exploitation et la publication des données du RSESQ.*

13.1 Apports des projets PACC

La finalisation des projets PACC est prévue pour la fin de 2020 ou au début de 2021, mais une réunion des équipes des projets a été tenue le 1^{er} décembre 2020 afin de partager les résultats obtenus. Une discussion a notamment porté sur le développement du RSESQ et la section 13.2 considère ces discussions ainsi que la réflexion de l'INRS à ce sujet. La présente section met l'accent sur le travail réalisé à ce jour par l'équipe de l'INRS qui a permis de produire des idées et des méthodes particulièrement prometteuses pour la gestion et l'analyse des séries temporelles de données de niveaux d'eau. Quelques éléments tirés des travaux de l'UQAM sont aussi mentionnés à la fin de la présente section.

L'objectif de cette section est donc principalement de faire un recensement des idées documentées jusqu'à maintenant dans les rapports intermédiaires 1 et 2 du projet PACC de l'INRS. À noter que dans le cadre du présent projet, plusieurs de ces idées ont été reprises du projet PACC de l'INRS et ont été développées davantage dans le but principalement de formuler au Ministre des recommandations spécifiques relatives aux approches à privilégier pour en incorporer l'application aux opérations de gestion, d'exploitation et de diffusion des données du RSESQ.

Le premier point abordé concerne le téléchargement des données de suivi à partir du site internet du RSESQ qui est actuellement une tâche laborieuse. Ceci est particulièrement le cas lorsqu'il est nécessaire de télécharger les données de plusieurs puits à la fois. Pour cette raison, un outil a été développé dans le cadre du projet PACC de l'INRS pour télécharger, valider et formater automatiquement les données piézométriques qui sont rendues publiques par le Ministère sur le site web du RSESQ. Cet outil de recherche est actuellement documenté et rendu disponible sur GitHub²⁸. À court terme, il serait possible avec quelques efforts de rendre cet outil disponible pour les usagers du RSESQ. À moyen terme, le Ministère pourrait également considérer le développement de capacités permettant la recherche des données du RSESQ en fonction de différents critères et non seulement de leur localisation sur une carte géographique. Il serait notamment intéressant de permettre la recherche de données à l'intérieur d'un secteur géographique, en fonction de la période ou de la durée d'acquisition des données ou encore par rapport à la disponibilité de données météorologiques ou hydrométriques à proximité (voir section 6). De telles capacités de recherche des données faciliteraient ainsi leur utilisation pour diverses applications et pourraient aussi être couplées à des capacités de téléchargement d'un ensemble de puits possédant les attributs recherchés (section 8).

Des outils ont également été produits afin d'analyser l'état du RSESQ et de présenter les résultats sous forme de graphiques, tels que le nombre de stations en fonction du nombre d'années de suivi et le nombre de stations actives en fonction de l'année. Des exemples de ces graphiques sont présentés à la figure 13.1. Les outils développés utilisent présentement les données rendues publiques sur le site Internet du RSESQ, mais pourraient être adaptés pour utiliser directement les données de la base de données du RSESQ. Des graphiques pourraient être produits après chaque campagne de collecte des données de suivi et pourraient

²⁸ <https://github.com/cgq-qgc/inrs-rsesq>

être diffusés sur le site Internet du Ministère. Il serait également très utile pour les utilisateurs des données du RSESQ de disposer d'un tableau sommaire qui permettrait de donner une vue d'ensemble des données acquises dans les puits du RSESQ. Ce tableau pourrait être produit en format HTML (par exemple) et pourrait être rendu accessible via un lien qui serait ajouté sur le site Internet.

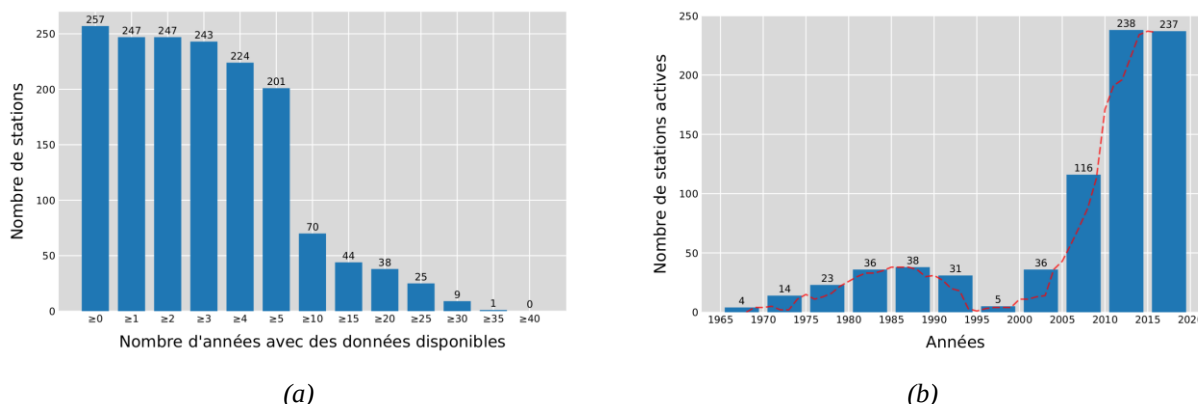


Figure 13.1 - Histogrammes présentant l'état du RSESQ. Le diagramme (a) montre le nombre de stations piézométriques en fonction du nombre d'années avec des données disponibles alors que le diagramme (b) montre le nombre de stations piézométriques actives en fonction du temps.

Il serait aussi avantageux de mieux définir les conditions des puits du RSESQ ainsi que les conditions entourant ces puits afin de mieux interpréter les variations de niveau d'eau. Ainsi, un travail important est actuellement en cours de réalisation par l'équipe du projet PACC de l'INRS pour caractériser les conditions hydrogéologiques aux puits et autour des puits du RSESQ situés dans la région d'étude du projet. Les informations dérivées des PACES et les évaluations du niveau de confinement des puits devraient permettre de mieux comprendre le comportement des niveaux d'eau mesurés dans les puits de suivi, d'apporter des informations sur le contexte local des puits afin de statuer sur l'utilisation qui pourrait être faite des niveaux d'eau et de produire des données pouvant être utiles pour l'estimation de la recharge et du degré de confinement de la nappe. Un format de présentation des résultats a également été développé pour représenter les conditions entourant les puits, dont un exemple est présenté à la figure 4.1. L'UQAM a aussi utilisé les conditions des puits du RSESQ pour identifier des facteurs explicatifs pour les comportements des niveaux d'eau des puits du RSESQ, ce qui montre l'intérêt de diffuser les caractéristiques des puits.

De plus, au terme du projet PACC de l'INRS, le niveau de confinement des puits situés dans la région d'étude du projet aura été évalué à l'aide de quatre méthodes différentes. Ces méthodes fournissent des informations sur le niveau de confinement de la nappe à différentes échelles spatiales et sont donc complémentaires. Pour ce faire, des outils ont dû être développés afin de produire les résultats d'analyses nécessaires à l'application de ces méthodes. Plus spécifiquement, des outils ont été développés pour évaluer la fonction de réponse barométrique des puits (section 9), produire des analyses fréquentielles des séries temporelles de niveaux piézométriques (Gosselin et al. 2019a) et classer les descriptions stratigraphiques des puits en hydrofaciès (Gosselin et al. 2019a). En plus de permettre d'évaluer le niveau de confinement des puits, ces résultats d'analyses peuvent également être utilisés pour identifier les puits dont le niveau d'eau est affecté par du pompage. À noter que ces outils n'ont pas été développés spécifiquement pour le RSESQ et que des efforts supplémentaires seraient nécessaires pour incorporer leur usage aux opérations de gestion du réseau.

Toujours dans le cadre du projet PACC de l'INRS, des efforts importants ont été investis afin de terminer le développement d'outils pour l'application d'une méthode d'estimation de la recharge qui a été développée par Jean-Sébastien Gosselin dans le cadre de ses travaux de doctorat (Gosselin 2016). De plus, les outils et la méthode seront appliqués et devraient permettre de produire des estimations de la recharge pour plusieurs des puits du RSESQ situés dans la région d'étude du projet PACC. Ceci est discuté en détails à la section 10, où des recommandations sont formulées par rapport à l'approche qui pourrait être utilisée pour incorporer l'application de la méthode aux opérations de gestion du RSESQ et faciliter la diffusion des résultats sur le site Internet du MELCC.

Un outil a également été développé pour produire des graphiques mettant en relation les données de niveau d'eau et les données météorologiques. Tel que discuté à la section 8 du présent rapport, ces travaux pourraient être adaptés aux besoins de gestion et de diffusion des données du RSESQ afin d'améliorer le format d'affichage des hydrogrammes de puits présentement publiés sur le site internet du RSESQ. De plus, à la section 6 de ce rapport, des recommandations sont émises par rapport aux approches à privilégier pour incorporer les données climatiques aux opérations de gestion et de diffusion des données du RSESQ.

Le projet PACC de l'INRS a également permis de développer la capacité de corriger les mesures piézométriques pour l'effet des variations barométriques grâce à une méthode basée sur l'utilisation des fonctions de réponse barométrique (BRF) des puits. Sur la base de ces travaux réalisés dans le cadre du projet PACC, la section 9 du présent rapport présente une méthodologie qui pourrait permettre au Ministère d'évaluer la BRF et de faire la correction barométrique des niveaux d'eau mesurés dans l'ensemble des puits du RSESQ de 1980 à aujourd'hui. Ces outils ont d'ailleurs déjà permis de corriger les données des stations de la région d'étude des projets PACC, car le bruit causé dans les données par les effets de variations barométriques étaient indésirables pour les analyses statistiques que l'UQAM voulait réalisées dans le cadre de leur projet PACC. Basé sur les travaux réalisés par l'*United States Geological Survey* (USGS), un outil a aussi été développé pour produire des hydrogrammes statistiques permettant de comparer facilement les données récentes de niveaux aux conditions historiques des nappes phréatiques au cours d'un mois donné. À la section 7 du présent rapport, nous formulons des recommandations relatives aux approches à privilégier pour incorporer l'application de cette méthode et adapter les outils qui ont été développés dans le cadre du projet PACC aux opérations de gestion, d'exploitation et de diffusion des données du RSESQ.

Enfin, à la section 4 du présent rapport, il est proposé de rassembler l'ensemble des informations et résultats d'analyse produits pour chacun des puits du RSESQ dans des fiches signalétiques qui seraient publiées sur le site Internet du Ministère via un lien téléchargeable qui pourrait être ajouté aux infobulles de la carte interactive Google. Cela permettrait de valoriser grandement les données de suivi et le contenu actuel du site Internet du RSESQ.

Le projet PACC de l'UQAM a mis l'emphasis sur l'exploitation des données du RSESQ, alors que le projet de l'INRS ainsi que le présent mandat ont plutôt portés sur le développement des outils de gestion et de présentation des données du RSESQ. L'UQAM a aussi exploité les caractéristiques des puits du RSESQ pour expliquer les variations des chroniques de niveau d'eau. Ces caractéristiques ainsi que le classement des réponses des puits du RSESQ devraient être considérés pour évaluer « l'état » du RSESQ et planifier son développement. L'UQAM a aussi développé des méthodes permettant de définir les tendances des niveaux d'eau et pour évaluer la corrélation entre les niveaux d'eau et les conditions climatiques. Cette corrélation a aussi été évaluée entre les débits de cours d'eau et les conditions météorologiques. L'UQAM a montré que les nappes réagissent relativement lentement et qu'il y a un effet « mémoire » des conditions météorologiques des années antérieures alors que les débits de cours d'eau ne reflètent que les conditions climatiques récentes. Ces méthodes pourraient faire l'objet d'outils intégrés à SARDES (section 12).

13.2 Perspectives de développement du RSESQ

Les perspectives de développements du RSESQ décrites dans la présente section sont basées sur les échanges entre les équipes des projets PACC qui ont eu lieu lors d'une réunion tenue le 1^{er} décembre 2020 ainsi que sur nos propres réflexions suite à la réalisation du projet PACC ainsi que du présent mandat. Avant de décrire certaines perspectives de développement, des constats sur le RSESQ seront formulés. Des travaux envisageables sur le RSESQ seront par la suite mentionnés brièvement. La prochaine section 13.3 va décrire un peu plus en détail des travaux qui pourraient faire suite au présent mandat et qui vont dans le sens des perspectives de développement du RSESQ décrites dans la présente section.

Depuis 2009, le RSESQ a été mis en place dans le but de suivre les effets des changements climatiques sur les nappes. Les sites des stations ont été choisis de façon à couvrir l'étendue du territoire municipalisé du sud du Québec et à éviter autant que possible les influences anthropiques. Un certain nombre de stations existantes antérieurement et certaines implantées plus récemment pour d'autres besoins ont également été récupérées par le MELCC de façon à augmenter le nombre de stations et améliorer la couverture du RSESQ. De plus, la plupart des stations ont été implantées avant que les travaux de cartographie du quaternaire et les Projets d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines soient complétés sur leur territoire.

L'ensemble du réseau est ainsi relativement jeune alors que seulement 70 des 257 puits du RSESQ possèdent des chroniques de mesures de plus de 10 années (figure 13.1). Les puits n'ont pas non plus été installés en considérant les types d'aquifères (roc ou granulaire) ou les conditions à représenter (libre vs confiné; position relative dans le bassin; influencé ou non; qualité d'eau; etc.) qui permettent de faire le meilleur usage des niveaux d'eau. La réalisation des projets PACC a permis de constater que les données du RSESQ peuvent aussi permettre d'estimer la recharge ou de faire la prévision des débits des cours d'eau lorsque les conditions sont favorables. Les projets ont aussi montré que l'effet climatique sur les niveaux d'eau est important et qu'il est envisageable de faire la projection de ces niveaux en climat futur.

Bien que la couverture spatiale des puits du RSESQ soit relativement bonne en général, les puits ne sont pas nécessairement implantés en considérant les limites des grands bassins versants. Nos travaux réalisés dans le cadre du PACC ont montré que des secteurs hydroclimatiques qui respectent les limites des bassins versants pourraient constituer un cadre pour l'exploitation des données du RSESQ. Toutefois, il faudra évaluer si tous les secteurs hydroclimatiques et tous les grands bassins versants sont bien représentés par des puits du RSESQ qui sont des « témoins » représentatifs de l'évolution des conditions dans les bassins, notamment par rapport aux variations météorologiques. Les conditions des puits du RSESQ sont en voie d'être bien caractérisées pour la région PACC mais une telle caractérisation devra aussi être faite au nord du fleuve Saint-Laurent et dans les grandes régions du Québec. Cette caractérisation des conditions des puits ainsi qu'autour des puits devrait permettre de bien définir ce qui « constitue » le RSESQ et ensuite d'évaluer si cette constitution permet de remplir différents rôles ou fonctions que devraient jouer le réseau, à part sa fonction centrale du suivi de l'effet du climat sur les niveaux d'eau.

Le tableau 13.1 résume les fonctions envisageables pour le RSESQ ou, en d'autres termes, les applications qui pourraient être faites avec les données acquises par le réseau. Les applications ont été classées selon qu'elles sont déjà faites par le réseau, qu'elles ont été rendues possibles par les projets PACC ou qu'elles pourraient être envisagées à l'avenir. Le tableau indique aussi la nécessité ou non d'adapter le réseau pour permettre les applications. La synthèse des applications envisageables pour le RSESQ a pour but de supporter une réflexion sur le développement du réseau, notamment par rapport aux types de puits qui permettraient les différentes applications. À noter que le choix d'une application pour le réseau exigerait qu'un nombre suffisant de puits soit disponibles dans le réseau pour que l'application soit possible sur la majeure partie du territoire couvert par le RSESQ.

Tableau 13.1 – Fonctions ou applications actuelles et futures du RSESQ.

État des applications	Applications	Adaptation du réseau
Application actuelle	• Suivi de la variation des niveaux d'eau souterraine sous l'effet des conditions climatiques	• Réseau actuel adapté à cette application
Nouvelles applications (projets PACC)	• Conditions de confinement du puits de suivi (BRF) • Identification des puits influencés par des activités anthropiques (BRF) • Estimation de la recharge pour les puits en condition libre (GWHAT) • Tendances des niveaux d'eau et réactivité des aquifères (UQAM)	• Mesures à haute fréquence (déjà faites sur les puits) • Exige l'évaluation de la BRF sur tous les nouveaux puits ajoutés au réseau • Privilégier les puits en condition libre pour évaluer la recharge • Couverture spatiale complète du territoire (c'est déjà le cas)
Applications futures potentielles	• Suivi de nappe dans les secteurs soumis à des prélèvements importants • Prédiction des étiages des cours d'eau • Relations entre nappes et cours d'eau ou milieux humides et apport d'eau souterraine • Évolution de la qualité de l'eau souterraine de secteurs sous fortes pressions anthropiques • Support au développement, au calage et à la validation de modèles numériques	• Implantation de puits dans des secteurs à fort pompage ou intégrer des puits de suivi au réseau • Il faut déterminer les conditions les mieux reliées aux étiages • Il faut des nids de puits pour estimer la variation des gradients hydrauliques et des flux • Puits en aval de secteurs avec des activités affectant la qualité de l'eau souterraine • Conditions représentatives à plus grande échelle (pas uniquement locales)

Le tableau 13.1 permet de constater que le RSESQ est bien adapté à sa mission actuelle et qu'il a aussi permis de faire les autres applications réalisées dans le cadre des projets PACC. Toutefois, il sera nécessaire d'évaluer plus en détail les résultats des travaux du projet PACC de l'INRS pour déterminer si le nombre de puits permettant l'estimation de la recharge (conditions libres) est suffisant pour couvrir tous les secteurs hydroclimatiques de la région d'étude PACC ainsi que des secteurs analogues en dehors de la région PACC. De plus, pour l'application des puits du réseau à l'estimation de la recharge, il faudra couvrir les aquifères en exploitation les plus importants. Pour la région PACC, cela implique l'aquifère rocheux fracturé régional, mais aussi localement des aquifères granulaires d'étendue plus locale. Sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent, il faudra s'assurer que des puits du RSESQ sont disponibles pour estimer la recharge dans les grands aquifères deltaïques qui permettent l'approvisionnement de nombreux puits municipaux.

Une réflexion plus approfondie est requise pour déterminer si les autres applications futures potentielles du RSESQ doivent être envisagées et pour définir quelles adaptations du réseau seraient requises pour assumer ces fonctions. Présentement, plusieurs puits du RSESQ sont identifiés comme étant « influencés » par les prélèvements d'eau souterraine à proximité. Cet « avertissement » permet d'éviter l'utilisation des données de ces puits pour des applications comme l'estimation de la recharge qui serait faussée par l'effet des prélèvements environnants. Toutefois, le réseau n'assume pas de façon explicite la fonction « d'alerte » dans les secteurs sous de forts stress hydriques afin d'assurer une exploitation durable ou d'éviter des conflits

d'usage de l'eau souterraine. Pour assumer une telle fonction, au moins dans les secteurs sous fort stress hydrique, il faudrait que des études spécifiques définissent la relation entre les puits du RSESQ influencés par les prélèvements et le niveau acceptable de ces prélèvements. Ainsi, considérant le niveau d'effort requis, une telle fonction d'alerte dans les secteurs sous fort stress hydrique ne pourrait être envisagée que pour un nombre limité de secteurs au Québec. Pour assurer cette fonction, il pourrait être envisagé d'intégrer au RSESQ certains puits qui servent au suivi de nappe en relation avec d'importants captages municipaux ou d'autres captages majeurs, notamment certains puits de pompage et traitement de panaches émis par des sites contaminés.

L'utilisation des puits du RSESQ pour prédire les étiages a été abordée par le projet PACC de l'UQAM qui indique qu'une telle application est relativement complexe, même si certains puits du réseau semblent être des indicateurs de l'apport des nappes aux cours d'eau. Des travaux additionnels sont donc requis pour définir comment exploiter efficacement les mesures de niveau d'eau souterraine pour la prédiction des étiages. Conceptuellement, l'apport d'eau souterraine aux cours d'eau mais aussi aux milieux humides devrait être relié plus facilement aux gradients hydrauliques (verticaux ou horizontaux) en direction de ces zones d'émergences car la magnitude des gradients indiquerait la magnitude des flux d'eau souterraine. Ainsi, pour assumer la fonction de suivi des apports d'eau souterraine aux eaux de surface ou aux milieux humides, il serait nécessaire de mettre en place de nouvelles infrastructures dédiées à la mesure des gradients hydrauliques. Il faudrait aussi que des études spécifiques permettent de définir les seuils de gradients hydrauliques qui indiqueraient une baisse significative des flux. Il est ainsi envisageable que la fonction de suivi des flux d'eau souterraine vers les eaux de surface ou les milieux humides ne soit assurée que pour un nombre restreint de secteurs d'intérêt particulier.

Une partie importante des puits du RSESQ ont déjà fait l'objet d'échantillonnage et d'analyses chimiques et parfois d'analyses isotopiques. Toutefois, les puits du RSESQ n'ont généralement pas été positionnés pour faire le suivi de la qualité des eaux souterraines dans un secteur où la qualité de l'eau souterraine est en voie de dégradation par les activités anthropiques. Dans le cadre du PACES Estrie, certains des nouveaux puits du RSESQ implantés dans cette région d'étude ont tout de même été localisés dans des secteurs où la qualité de l'eau souterraine était susceptible d'être affectée par des activités anthropiques, particulièrement la fertilisation agricole. Une telle dégradation a effectivement été constatée, sans qu'elle soit à un niveau menant à la non potabilité de l'eau souterraine. Dans de telles conditions, il serait grandement souhaitable que le suivi de la qualité de l'eau souterraine soit assuré à moyen ou long terme pour vérifier s'il n'y a pas de dégradation additionnelle importante. L'intérêt d'un suivi de qualité de l'eau souterraine à moyen ou long terme n'est pas unique à la région du PACES Estrie. Ainsi, même si cette fonction n'impliquerait qu'un nombre restreint de puits du RSESQ, un tel suivi de qualité pourrait s'avérer important dans plusieurs secteurs où une dégradation de qualité a déjà été reconnue. La caractérisation de la qualité de l'eau souterraine réalisée dans le cadre des projets PACES pourrait servir de base pour identifier les secteurs où un suivi de qualité serait pertinent.

Enfin, les travaux réalisés dans le cadre des projets PACC de l'UQAM et de l'Université Laval ont montré qu'il pouvait être difficile d'exploiter les valeurs locales de niveau de l'eau souterraine pour le calage ou la vérification des modèles numériques de l'écoulement régional de l'eau souterraine. Les mesures locales de niveau d'eau représentent souvent un effet local qui ne peut pas être reproduit par des modèles régionaux. Pour l'exploitation des mesures de niveau d'eau souterraine par les modèles, mais aussi d'autres applications, il semble nécessaire de donner un « sens » aux mesures, à tout le moins pour une partie des mesures. Pour ce faire, la caractérisation des conditions des puits du RSESQ ainsi que des conditions autour des puits du RSESQ pourrait être utilisée pour identifier des puits pouvant représenter des conditions régionales et ainsi être utilisés par les modèles. La génération d'indicateurs climatiques et piézométriques représentant

les changements régionaux causés par les variations météorologiques saisonnière à l'intérieur de secteurs hydroclimatiques pourrait aussi être d'intérêt pour la modélisation numérique. Ces indicateurs pourraient aussi être reliés au « volume stocké » d'eau souterraine dans les aquifères, ce qui pourrait être plus facilement relié aux conditions climatiques ainsi qu'à l'exploitation de l'eau souterraine.

Afin d'aider au choix des applications du RSESQ et guider sa gestion (ajout ou retrait de puits), les actions suivantes pourraient être envisagées par le Ministère :

- Consulter les utilisateurs du RSESQ pour avoir leur avis sur l'utilisation ou le développement du RSESQ et les outils disponibles pour exploiter les données;
- Définir les conditions de chaque puits et les conditions entourant les puits (déterminer s'il est souhaitable de mieux caractériser certains puits, notamment par la réalisation d'essais hydraulique ou de diagraphies);
- Identifier les applications envisageables pour chacun des puits en fonction de ses conditions;
- Vérifier si les fonctions prioritaires du RSESQ peuvent être assumées dans chaque secteur hydroclimatique pour la région des projets PACC ou sur la majorité du territoire en dehors de la région PACC;
- Identifier des puits qui n'ont pas de fonction ou des secteurs où plusieurs puits ont la même fonction afin de les retirer du réseau;
- Identifier des secteurs où des puits supplémentaires doivent être implantés ou alternativement identifier des puits de suivi de captages municipaux qui pourraient être intégrés au RSESQ.

13.3 Suite des travaux

Dans le cadre d'un prochain mandat, il serait envisageable de faire une démonstration de l'application de l'ensemble des outils développés dans le cadre du projet PACC et du présent projet à l'intérieur d'une région d'étude ayant été couverte par les projets PACC. Les applications comprendraient notamment la production de fiches signalétiques complètes des puits du RSESQ à l'intérieur de la région d'étude et le développement et l'application d'une approche pour caractériser l'état des nappes au Québec.

L'approche envisageable pour caractériser l'état des nappes impliquerait d'abord la définition de zones hydroclimatiques qui seraient basées à la fois sur les contextes géologiques et hydrogéologiques régionaux, tel que la division entre la Plate-forme du Saint-Laurent et les Appalaches, ainsi que les conditions météorologiques. À l'intérieur de ces grands ensembles géologiques, des secteurs aux conditions météorologiques distinctes pourraient être définis en tenant compte aussi des limites des grands bassins versants. Un inventaire des puits du RSESQ serait fait à l'intérieur des zones hydroclimatiques afin d'identifier les puits qui ont un comportement typique de chaque zone et qui sont en condition libre et préférablement sur des hauts topographiques ou des têtes de bassins versants où les niveaux d'eau souterraine sont plus sensibles aux variations de la recharge. Les variations de niveaux d'eau des puits caractéristiques des zones hydroclimatiques par rapport aux niveaux moyens seraient définies de façon à produire un indice du niveau actuel par rapport à la normale. Ces travaux permettraient aussi de fournir des paramètres hydrologiques typiques de chaque zone hydroclimatique.

Par la suite, tel que mentionné à la section 10.2, il serait nécessaire de développer les outils et un cadre méthodologique qui permettraient de produire de façon systématique et périodique des évaluations à jour de la recharge spatialement distribuée dans la zone d'étude. Les évaluations de recharge ainsi calculées,

conjointement avec les données météorologiques historiques, devraient ensuite être interprétées dans le but d'expliquer l'état actuel, de même que les tendances saisonnières observées du niveau des nappes d'eau souterraine dans la zone d'étude par rapport aux normales saisonnières. L'approche définie à la section 11.6 pourrait être ensuite utilisée pour produire des prévisions de l'évolution des niveaux de nappe dans les mois à venir. L'évolution du niveau des nappes serait aussi mise en relation avec les conditions météorologiques historiques (indicateur climatique) ainsi qu'avec les prévisions météorologiques pour les mois à venir. Il pourrait être envisageable de mettre à jour la définition de l'état des nappes et les projections deux fois par année suite aux levés des données de niveau d'eau des puits du RSESQ. L'état des nappes pourrait aussi être mis en relation avec le rapport du MELCC sur les conditions météorologiques ainsi que les débits des cours d'eau, notamment les étiages.

Enfin, pour chaque zone hydroclimatique, une projection pourrait être faite de l'évolution de la recharge en climat futur. Cette prévision pourrait être faite pour les puits du RSESQ typiques de chaque zone en utilisant GWHAT mais aussi à l'échelle plus régionale de la zone ou de bassins versants à l'aide de PyHELP.

14 RÉFÉRENCES

- Bergeron, Onil. 2017. « Grilles climatiques quotidiennes du Réseau de surveillance du climat du Québec, Version 2 - Guide d'utilisation ». ISBN 978-2-550-77885-1. Québec: Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction de l'information sur le milieu atmosphérique.
- Bohling, Geoffrey C., Wei Jin, et James J. Butler Jr. 2011. « Kansas Geological Survey Barometric Response Function Software User's Guide. » Open-file Report No. 2011-10. Kansas Geological Survey, Geohydrology Section. http://www.kgs.ku.edu/HighPlains/OHP/index_program/brf.html.
- Braun, M. 2017. « Sélection des scénarios climatiques ». Ouranos Inc., présentation à la rencontre des projets RSESQ (PACC), 17 janvier 2017, INRS, Centre Eau Terre Environnement, Québec, Canada.
- Butler Jr., J J, W Jin, G A Mohammed, et E C Reboulet. 2011. « New Insights from Well Responses to Fluctuations in Barometric Pressure. » *Ground Water* 49 (4): 525-33. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2010.00768.x>.
- Carrier, M A, René Lefebvre, Christine Rivard, M Parent, Jean-Marc Ballard, N Benoît, Harold Vigneault, et al. 2013. « Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES) en Montérégie Est - Portrait des ressources en eau souterraine en Montérégie Est, Québec, Canada. Projet réalisé conjointement par l'INRS, la CGC, l'OBV Yamaska et l'IRDA dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines. » Research Report R-1433. Quebec City, Quebec, Canada: Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau Terre Environnement. <http://espace.inrs.ca/1639/1/R001433.pdf>.
- Croteau, A, M Nastev, et R Lefebvre. 2010. « Groundwater recharge assessment in the Chateauguay river watershed. » *Canadian Water Resources Journal* 35: 451-68. <https://doi.org/10.4296/cwrj3504451>.
- DEH. 2018. « Document d'accompagnement de l'Atlas hydroclimatique ». Direction de l'expertise hydrique, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Québec. <https://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/doc-accompagnement.pdf>.
- Gosselin, Jean-Sébastien. 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. » Phd, Québec: Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique. <http://espace.inrs.ca/5122/>.
- Gosselin, Jean-Sébastien, François Huchet, et René Lefebvre. 2019a. « Indicateurs de l'état des ressources en eau souterraine sous l'effet du climat et de leur exploitation (Rapport intérimaire #2) ». Rapport de recherche R-1857, rapport intérimaire #2 soumis au Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) en décembre 2019.
- Gosselin, Jean-Sebastien, François Huchet, Christine Rivard, et René Lefebvre. 2018. « Développements méthodologiques et informatiques pour l'estimation de la recharge à partir de données climatiques journalières et de mesures de niveaux d'eau souterraine ». Dans . UQAC, Saguenay, 7-11 mai 2018.
- Gosselin, Jean-Sébastien, Mélanie Raynauld, François Huchet, et René Lefebvre. 2019b. « PyHELP: An open source Python library to estimate spatially distributed groundwater recharge with the HELP infiltration model. » Dans . Quebec city, Canada, 12-15 May 2019.
- Hayhoe, Henry N. 2000. « Improvements of Stochastic Weather Data Generators for Diverse Climates ». *Climate Research* 14 (2): 75-87. <https://doi.org/10.3354/cr014075>.

- Healy, R W. 2010. *Estimating Groundwater Recharge*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Healy, Richard W., et Peter G. Cook. 2002. « Using groundwater levels to estimate recharge ». *Hydrogeology Journal* 10 (1): 91-109. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0178-0>.
- Huchet, François. 2018. « Caractérisation hydrogéologique et modélisation du système d'écoulement au-dessus de champs gaziers, sous-bassin de Moncton, sud du Nouveau-Brunswick. » Masters, Québec: Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique. <http://espace.inrs.ca/7689/>.
- Jyrkama, Mikko I, Jon F Sykes, et Stefano D Normani. 2002. « Recharge Estimation for Transient Ground Water Modeling ». *Ground Water* 40 (6): 638-48.
- Larocque, Marie, Jana Levison, Alexandre Martin, et Diane Chaumont. 2019. « A review of simulated climate change impacts on groundwater resources in Eastern Canada ». *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques* 44 (1): 22-41. <https://doi.org/10.1080/07011784.2018.1503066>.
- Larose-Charette, D, René Lefebvre, N Fagnan, Yves Michaud, et René Therrien. 2000. « Groundwater flow dynamics in unconfined deltaic aquifers of the Portneuf area, Quebec, Canada ». Dans . Montréal, Qc, Canada; Oct. 15-18, 2000: 53rd Can. Geotech. Conf., proceedings of the 1st Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Speciality Conf.
- Lavigne, Marc-André, Miroslav Nastev, et René Lefebvre. 2010. « Regional Sustainability of the Chateauguay River Aquifers ». *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques* 35 (4): 487-502. <https://doi.org/10.4296/cwrj3504487>.
- Leduc, Dr Martin. 2019. « Documentation for the ClimEx CRCM5 Large Ensemble (v2.1) ». Ouranos.
- Leduc, Martin, Alain Mailhot, Anne Frigon, Jean-Luc Martel, Ralf Ludwig, Gilbert B. Brietzke, Michel Giguère, et al. 2019. « The ClimEx Project: A 50-Member Ensemble of Climate Change Projections at 12-Km Resolution over Europe and Northeastern North America with the Canadian Regional Climate Model (CRCM5) ». *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 58 (4): 663-93. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-18-0021.1>.
- Lefebvre, R, I Maltais, D Paradis, et Y Michaud. 2011. « Recharge assessment from daily soil moisture balance and well hydrographs for the Portneuf unconfined aquifers ». Dans . Quebec City, Qc, Canada; August 28-31, 2011: Geohydro 2011, proceedings of the joint meeting of the Canadian Quaternary Association and the Canadian Chapter of the International Association of Hydrogeologists.
- Lefebvre, René, Jean-Marc Ballard, Marc-André Carrier, Harold Vigneault, Châtelaine Beaudry, Laureline Berthot, Guillaume Légaré-Couture, et al. 2015. « Portrait des ressources en eau souterraine en Chaudière-Appalaches, Québec, Canada :Rapport final (version révisée). » Québec: INRS, Centre Eau Terre Environnement. <http://espace.inrs.ca/2658/>.
- Lepage, M P, et G Bourgeois. 2011. « Le réseau québécois de stations météorologiques. » Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), Commission agrométéorologie.
- Mearns, Linda, Seth McGinnis, Daniel Korytina, Raymond Arritt, Sébastien Biner, Melissa Bukovsky, Hsin-I Chang, et al. 2017. « The NA-CORDEX Dataset ». NetCDF. UCAR/NCAR. <https://doi.org/10.5065/D6SJ1JCH>.
- MELCC. 2018. « Atlas hydroclimatique du Québec méridional - Rapport technique ». Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre changements climatiques (MDDELCC), Québec.

- Olsson, Jonas, Berit Arheimer, Matthias Borris, Chantal Donnelly, Kean Foster, G. Nikulin, Magnus Persson, et al. 2016. « Hydrological Climate Change Impact Assessment at Small and Large Scales: Key Messages from Recent Progress in Sweden ». *Climate* 4 (3): 39. <https://doi.org/10.3390/cli4030039>.
- Paradis, Daniel, Harold Vigneault, René Lefebvre, Martine M. Savard, Jean-Marc Ballard, et Budong Qian. 2016. « Groundwater Nitrate Concentration Evolution under Climate Change and Agricultural Adaptation Scenarios: Prince Edward Island, Canada ». *Earth System Dynamics* 7 (1): 183-202. <https://doi.org/10.5194/esd-7-183-2016>.
- Rasmussen, Todd C, et Leslie A Crawford. 1997. « Identifying and removing barometric pressure effects in confined and unconfined aquifers ». *Ground Water* 35(3): 502-11. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1997.tb00111.x>.
- Raynauld, Mélanie, René Lefebvre, et Jean-Sébastien Gosselin. 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.
- Rivard, Christine, René Lefebvre, et Daniel Paradis. 2014. « Regional Recharge Estimation Using Multiple Methods: An Application in the Annapolis Valley, Nova Scotia (Canada) ». *Environmental Earth Sciences* 71 (3): 1389-1408. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2545-2>.
- Rushton, K R, V H M Eilers, et R C Carter. 2006. « Improved soil moisture balance methodology for recharge estimation. » *Journal of Hydrology* 318: 379-99. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.022>.
- Scanlon, B R, R W Healy, et P G Cook. 2002. « Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. » *Hydrogeology Journal* 10: 18-39. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0176-2>.
- Schroeder, Paul R., T.S. Dozier, Paul A. Zappi, B.M. McEnroe, J.W. Sjostrom, et R.L. Peyton. 1994. « The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: Engineering Documentation for Version 3 ». EPA/600/R-94/168b. Washington, DC, USA: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Risk Reduction Engineering Laboratory.
- Schroeder, Paul R., Cheryl M. Lloyd, Paul A. Zappi, et Nadim M. Aziz. 1994. « The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: User's Guide for Version 3 ». EPA/600/R-94/168a. Washington, DC, USA: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Risk Reduction Engineering Laboratory.
- Simolo, C, M Brunetti, M Maugeri, et T Nanni. 2010. « Improving estimation of missing values in daily precipitation series by a probability density function-preserving approach. » *International Journal of Climatology* 30: 1564-76. <https://doi.org/10.1002/joc.1992>.
- Tsvetkova, Olga, et Timothy O. Randhir. 2019. « Spatial and Temporal Uncertainty in Climatic Impacts on Watershed Systems ». *Science of The Total Environment* 687 (octobre): 618-33. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.141>.
- U.S. Geological Survey. 2007. « U.S. Geological Survey Ground-Water Climate Response Network ». USGS Numbered Series 2007-3003. Fact Sheet. Geological Survey (U.S.). <http://pubs.er.usgs.gov/publication/fs20073003>.