Université du Québec Institut National de la Recherche Scientifique Centre Eau Terre Environnement

## CARACTÉRISATION HYDROGÉOLOGIQUE ET MODÉLISATION DU SYSTÈME D'ÉCOULEMENT AU-DESSUS DE CHAMPS GAZIERS, SOUS-BASSIN DE MONCTON, SUD DU NOUVEAU-BRUNSWICK

Par

François Huchet

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.) en sciences de la terre

#### Jury d'évaluation

Président du jury et examinateur interne

Daniel Paradis CGC, Québec

Examinatrice externe

Directeur de recherche

Codirectrice de recherche

Marie Larocque UQAM, Montréal

René Lefebvre INRS – ETE, Québec

Christine Rivard CGC, Québec

© Droits réservés de François Huchet, 2018

L'énergie humaine se nourrit de changement. SYLVAIN TESSON, ÉLOGE DE L'ENERGIE VAGABONDE, 2007

### REMERCIEMENTS

Je souhaite tout d'abord remercier mon directeur de recherche, René Lefebvre, et ma codirectrice, Christine Rivard, de m'avoir offert l'opportunité de prendre part à ce projet et de m'avoir accordé leur confiance. Merci René pour tes remarques constructives et tes conseils judicieux qui ont rendu ce travail plus pertinent. Merci Christine pour ta disponibilité et ton encadrement tout au long de cette maîtrise. Votre passion communicative pour l'hydrogéologie et votre bonne humeur permettent à chaque étudiant de travailler dans un environnement motivant. Je ressors de cette expérience avec de nouvelles compétences et une vision plus claire de l'hydrogéologie.

Je tiens à remercier les évaluateurs de ce mémoire, Daniel Paradis et Marie Larocque, pour le temps alloué à la révision, leur sens critique et leurs commentaires avisés. Mention particulière également à John Molson pour son aide et sa disponibilité lors du développement du modèle numérique.

Mes remerciements vont également à toutes les personnes impliquées dans ce projet de la Commission Géologique du Canada : Xavier Malet, Heather Crow, Denis Lavoie, Nicolas Pinet, Virginia Brake, Geneviève Bordeleau et Gilles Cotteret. Mention spéciale à Xavier pour son expertise en bases de données, mais aussi pour tous les souvenirs ramenés des campagnes de terrain à Sussex et les bons moments passés à trier les carottes de forages à la rue Watt.

Je souhaite également citer les étudiants et professionnels qui ont participé, de près ou de loin, à ce projet de maîtrise : Jean-Sébastien Gosselin, Pierre Ladevèze, Marc Laurencelle, Mélanie Raynauld et Harold Vigneault. Je remercie particulièrement Jean-Sébastien pour son aide précieuse, ses explications claires et précises et pour avoir développé *GWHAT* !

Merci à ma conjointe, Clémence, de m'avoir toujours soutenu et supporté durant ces deux années, même lors des moments les plus stressants. Rejoindre ensemble le Canada et le découvrir à tes côtés est un vrai bonheur. Poursuivre cette aventure avec toi et partager ces nombreuses expériences et découvertes est toujours un réel plaisir.

Je remercie aussi mes parents pour leur soutien et leurs conseils à chaque étape de ma vie personnelle et professionnelle. Traverser l'Atlantique pour reprendre les études était une étape importante et je vous remercie de m'avoir toujours encouragé dans mes choix. Maintenant que nous sommes bien installés au Québec, j'espère que vous nous rendrez souvent visite ici et ce, à toutes les saisons (même pendant les hivers glacials... en dessous de -20°C).

Finalement, merci à tous mes amis pour les nombreux moments partagés depuis notre arrivée à Québec à l'hiver 2016 et nous avoir donné l'envie de rester dans ce beau pays qu'est le Canada !

## **AVANT-PROPOS**

Ce mémoire est subdivisé en trois sections. La première comprend une synthèse des travaux et documente les principaux résultats obtenus dans le cadre de cette maîtrise. La seconde contient des livrables sous forme de cartes de la région d'étude au format A3. Enfin, la troisième et dernière section rassemble des annexes détaillant les principaux résultats du projet et fournissant les statistiques relatives aux cartes. On y trouve également les informations extraites du logiciel GWHAT (Gosselin *et al.*, 2017) et les descriptions des puits d'observation de la Commission géologique du Canada (CGC) forés sur le territoire d'étude.

Un article de conférence (en anglais) est joint au présent document :

Huchet F, Rivard C et Lefebvre R (2017) Hydrogeological characterization above two gas fields, Moncton sub-basin, southern New Brunswick. *GeoOttawa 2017, Joint CGS/AIH-CNC Groundwater Conference,* Ontario, Canada, 1-4 October 2017, pages 1-8.

Une annexe dématérialisée intègre l'ensemble des données, des fichiers de travail et des résultats ainsi que les fichiers utilisés dans le Système d'Information Géographique (SIG).

Dans le corps du texte, l'ensemble des figures et des tableaux est numéroté en chiffres arabes (ex. : Figure 1.1 ou Tableau 1.1) tandis que les figures et les tableaux faisant référence aux annexes sont précédés d'un chiffre romain majuscule (ex. : une référence à la figure I.1 renvoie à la première figure de l'annexe I).

## RÉSUMÉ

Les récentes avancées techniques développées par l'industrie gazière ont rendu accessible la production de gaz naturel à partir de réservoirs non conventionnels. Au sud du Nouveau-Brunswick, du gaz est extrait depuis 2003 dans le champ McCully à partir d'unités sédimentaires peu perméables du sous-bassin de Moncton. Face aux risques environnementaux générés par ces activités, les inquiétudes de la population ont entraîné l'application d'un moratoire interdisant la fracturation hydraulique dans la province depuis juin 2015.

Les travaux documentés dans ce mémoire de maîtrise ont été réalisés dans le cadre d'un projet mené par la Commission géologique du Canada (CGC) visant à évaluer la vulnérabilité de l'aquifère superficiel face aux opérations gazières profondes dans le sous-bassin de Moncton. Afin de déterminer les conditions hydrogéologiques de ce territoire de 1 417 km<sup>2</sup>, l'étude a nécessité l'acquisition de données de terrain entre 2016 et 2018. Les travaux de caractérisation spécifiquement réalisés dans le cadre du présent mémoire avaient pour but d'interpréter les conditions hydrogéologiques de la région d'étude en fonction des données existantes et des nouvelles données acquises dans le cadre du projet de la CGC. Pour ce faire, les données disponibles ont été interprétées, des cartes hydrogéologiques ont été produites et un modèle numérique d'écoulement de l'eau souterraine a été développé. La compréhension du système d'écoulement avait notamment pour but de contribuer à l'évaluation de la vulnérabilité de l'aquifère superficiel par rapport aux activités pétrolières profondes.

Les travaux réalisés dans le cadre de cette maîtrise montrent que les deux bassins de la région d'étude sont caractérisés par 1) une piézométrie contrôlée par la topographie, 2) des dépôts superficiels généralement peu épais et perméables favorisant la recharge de la nappe, 3) un aquifère rocheux à nappe libre, très fracturé en sous-surface et relativement vulnérable à une contamination provenant de la surface, et 4) une recharge moyenne de 300 mm/an. Les données existantes et acquises, ainsi que le modèle numérique 2D, indiquent que la zone active d'écoulement de l'eau souterraine est peu profonde et essentiellement concentrée dans les 50 à 100 premiers mètres sous la surface. Aucune évidence de lien hydraulique entre les formations géologiques profondes où se fait la production d'hydrocarbures et l'aquifère de surface n'a été trouvée. Toutefois, la région modélisée n'inclut aucune zone de failles.

<u>Mots-clefs :</u> gaz de shale ; conductivité hydraulique ; aquifère ; piézométrie ; confinement ; recharge ; vulnérabilité ; modélisation ; temps de résidence, Nouveau-Brunswick.

### ABSTRACT

Recent technological developments made by the oil and gas industry have allowed natural gas extraction from unconventional reservoirs. Natural gas has been extracted in southern New Brunswick in the McCully gas field since 2003 from low permeability sedimentary units of the Moncton sub-basin. In view of the environmental risks related to these activities, concerns voiced by the local population led to a moratorium banning hydraulic fracturing in the province in June 2015.

The work documented in the present M.Sc. thesis was carried out as part of a larger project led by Geological Survey of Canada (GSC) aiming to assess the shallow aquifer vulnerability to deep gas extraction in the Moncton sub-basin. Fieldwork was conducted between 2016 and 2018 to collect data in order to define hydrogeological conditions of this 1 417 km<sup>2</sup> area. The characterization work carried out as part of this M.Sc. research aimed to interpret hydrogeological conditions in the study area based on existing data, as well as the new data acquired through the GSC project. To this end, available data were interpreted, hydrogeological maps were produced and a numerical groundwater flow model was developed. The understanding of the flow system aimed to contribute to the assessment of the aquifer vulnerability to deep hydrocarbon operations.

The work carried out as part of this M.Sc. research shows that the two watersheds in the study area are characterized by 1) a topography-driven groundwater flow system, 2) thin, permeable surficial deposits favoring aquifer recharge, 3) an unconfined rock aquifer, which is highly fractured in its upper part, and is therefore relatively vulnerable to surface contamination that would potentially be released at the surface and 4) an average recharge of 300 mm/year. Existing and acquired data, as well as the 2D numerical model, indicate that the active groundwater flow zone is relatively shallow, being essentially concentrated in the upper 50 to 100 meters below the ground surface. No evidence of hydraulic link between deep geological formations where hydrocarbons are extracted and shallow groundwater was found. However, the selected modeled region does not include any fault zone.

<u>Keywords:</u> shale gas; hydraulic conductivity; aquifer; piezometric surface; confining conditions; recharge; vulnerability; numerical modeling; residence time; New Brunswick.

# TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
1.1	Contexte de réalisation du projet et études similaires	1
1.2	Problématiques liées à l'exploitation gazière	2
1.3	Objectifs du mémoire	4
2	DONNEES EXISTANTES	7
2.1	Données locales extraites de documents existants	7
2.1.1	Caractérisation hydrogéologique du sud-est du Nouveau-Brunswick	8
2.1.2	Géochimie des eaux souterraines sur les sites de McCully et Elgin	10
2.1.3	Suivi de microséismes lors d'opérations de fracturation hydraulique	12
2.1.4	Influence des réseaux de fractures sur l'écoulement	13
2.2	Données géospatiales locales gouvernementales	13
2.3	Données extraites des cartes et de rapports géologiques	14
2.4	Données compilées par la CGC dans le cadre du projet	16
2.4.1	Étude des hydrocarbures du groupe de Mabou et origine de la matière organique	16
2.4.2	Structures et géologie du bassin	17
2.4.3	Propriétés géomécaniques du roc profond et intermédiaire	18
2.4.4	Fracturation du roc superficiel	21
2.4.5	Caractéristiques de la fracturation de l'aquifère rocheux	22
2.4.6	Géochimie des eaux souterraines	25
3	DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE	27
3.1	Localisation et physiographie	27
3.2	Démographie, occupation des sols et cultures	28
3.2.1	Statistiques démographiques locales	28
3.2.2	Couverture spatiale des sols et cultures	28
3.3	Climat	31
3.4	Ressources non conventionnelles d'hydrocarbures dans le sud du Nouveau-Bruns	wick
35	Géologie	
0.0		
3.5.1 3.5.2	Leités d'intérêt pour l'industrie	
3.5.2	Géologie des sédiments meubles	
354	Linités pédologiques	<del>4</del> 0
3.6. 3.6		
0.04		44
3.0.1 262	Caracteristiques de l'aquifere utilise pour l'approvisionnement en eau potable	44
3.0.Z	Capacite specifique des puits domestiques	40
J.U.J		49

4	ACQUISITION DES DONNEES	51
4.1	Installation de puits d'observation	51
4.2	Suivi piézométrique	53
4.3	Caractérisation des propriétés hydrauliques et de la granulométrie	56
4.3.1	Essais à choc hydraulique ( <i>slug tests</i> )	56
4.3.2	Essais au perméamètre de Guelph	59
4.3.3	Granulométrie des dépôts meubles	61
4.3.4	Essais de porosité et de perméabilité sur les carottes de forages	65
4.4	Échantillonnages et analyses d'eau souterraine	66
5	CONDITIONS HYDROGEOLOGIQUES	69
5.1	Propriétés hydrauliques des dépôts meubles	69
5.1.1	Distribution granulométrique des dépôts superficiels	69
5.1.2	Classification des dépôts meubles en hydrofaciès	75
5.1.3	Conductivités hydrauliques des dépôts superficiels	77
5.1.4	Synthèse sur les hydrofaciès et les propriétés des dépôts meubles	78
5.2	Épaisseur des dépôts meubles	79
5.2.1	Source des données d'entrée	79
5.2.2	Tri des données d'entrée	81
5.2.3	Traitement statistique des données retenues	
5.2.4	Procedure d'interpolation des donnees conservees	
5.2.5 5.2.6	Synthèse	ວວ ຊາ
5.2.0	Propriétés hydrauliques et suivi piézométrique de l'aquifère respouy	
5.5	Frosturation du rea	00
5.3.1	Conductivités bydrauliques du rec	CØ
533	Porosité et perméabilité	87
5.3.4	Variations du niveau de nappe	
5.3.5	Synthèse sur les propriétés hydrauliques de l'aquifère rocheux	90
5.4	Conditions de confinement de l'aquifère rocheux	91
5.4.1	Analyse basée sur les hydrofaciès	92
5.4.2	Analyse basée sur les fluctuations piézométriques	94
5.4.3	Analyse basée sur la réponse barométrique cumulative	97
5.4.4	Synthèse sur les conditions de confinement	101
5.5	Piézométrie	104
5.5.1	Collecte des données d'entrée	106
5.5.2	Tri et traitement des données initiales	106
5.5.3	Hypothèses impliquées dans l'approche d'interpolation	108
5.5.4	Interpolation de la surface piézométrique par diverses méthodes	110

5.5.5	Analyse comparative des procédures d'interpolation	111
5.5.6	Incertitudes recensées	115
5.5.7	Synthèse et résultats	116
5.6	Évaluation de la recharge de l'aquifère rocheux	117
5.6.1	Définition des termes intégrés dans le bilan hydrologique	119
5.6.2	Procédure de traitement des données météorologiques	121
5.6.3	Estimation du débit de base par séparation des hydrogrammes de rivières	122
5.6.4	Distribution spatiale de la recharge avec le modele quasi-2D HELP	130
5.0.5 5.6.6	Blian en eau de sunace et calage d'hydrogrammes de puits (modele GWHAT)	140
5.0.0	Vulpárabilitá de l'aquifàre recheux rágional	155
5.7	Application de la méthode DDASTIC	155
5.7.1 5.7.2	Application de la methode DRASTIC	162
5.7.3	Synthèse et validation avec la géochimie des eaux souterraines	164
5.8	Synthèse et développement du modèle conceptuel	166
6	MODELISATION NUMERIQUE DU SYSTEME AQUIFERE	171
6.1	Objectifs et défis de la simulation	171
6.2	Localisation et conceptualisation de la coupe 2D modélisée	172
6.3	Développement du modèle numérique	174
6.3.1	Hypothèses et limitations du modèle	174
6.3.2	Maillage et conditions limites	175
6.3.3	Propriétés hydrauliques	177
6.3.4	Calage du modèle	180
6.4	Simulation de l'âge moyen des eaux souterraines	183
6.4.1	Paramètres et conditions limites	183
6.4.2	Vérification de la discrétisation	184
6.5	Résultats des simulations	186
6.5.1	Système d'écoulement de l'eau souterraine	186
6.5.2	Temps de résidence	188
6.6	Pistes d'amélioration du modèle d'écoulement et de transport	189
7	CONCLUSIONS	191
7.1	Éléments clefs	191
7.2	Apports scientifiques et pratiques	194
7.3	Recommandations et perspectives	196
8	REFERENCES	199
9	CARTES DE LA RÉGION D'ÉTUDE	215
10	ANNEXES	295

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 – Propriétés des sédiments de surface au sud-est du Nouveau-Brunswick.Renseignements extraits de Rivard <i>et al.</i> (2008a) pour le sous-bassin de Moncton
Tableau 2.2 – Propriétés des formations rocheuses au sud-est du Nouveau-Brunswick, renseignements extraits de Rivard <i>et al.</i> (2008a) pour le sous-bassin de Moncton
Tableau 2.3 – Propriétés du système aquifère régional au sud-est du Nouveau-Brunswick, renseignements extraits de Rivard et al. (2008a) pour le sous-bassin de Moncton
Tableau 2.4 – Données utilisées dans le cadre du projet pour l'obtention des différents résultats
Tableau 2.5 – Synthèse des structures mesurées sur affleurements selon les unités géologiques,d'après Ladevèze (2017b).21
Tableau 2.6 – Diagraphies des puits d'observation de la CGC, adapté de Crow et al. (2017)22
Tableau 2.7 – Flux mesuré sans pompage sur les puits d'observation de la CGC sur le secteurde McCully, traduit et modifié de Crow <i>et al.</i> (2017)
Tableau 2.8 – Synthèse des résultats géochimiques préliminaires pour l'eau souterraine sur la datation et les solides totaux dissous (TDS)
Tableau 3.1 – Caractéristiques du bassin de la rivière Kennebecasis, données extraites du Kennebecasis Watershed Restoration Committee (2013).27
Tableau 3.2 – Caractéristiques du bassin de la rivière Pollett, données extraites des ressources géographiques de la province du Nouveau-Brunswick (GeoNB, 2002, GeoNB, 2014)27
Tableau 3.3 – Statistiques spatiales des comtés recoupés par le secteur d'étude, tiré deStatistique Canada (2016b)
Tableau 3.4 – Statistiques démographiques des comtés recoupés par le secteur d'étude, tiré deStatistique Canada (2016b)
Tableau 3.5 – Couverture du sol sur le territoire d'étude couvrant les deux bassins, données et nomenclature issues de la GéoBase (2009) avec une résolution de 30 m
Tableau 3.6 – Distribution des cultures sur le territoire d'étude couvrant les deux bassins, données et nomenclature issues d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (2010) avec une résolution de 30 m
Tableau 3.7 – Statistiques agricoles des comtés recoupés par le secteur d'étude, tiré deStatistique Canada (2016a)
Tableau 3.8 – Éléments caractéristiques d'un climat continental humide selon la classification de Köppen, tel que celui du sud du Nouveau-Brunswick, tiré de Hufty (2001)
Tableau 3.9 – Synthèse des normales climatiques à Sussex entre 1980 et 2017, données issuesdu Gouvernement du Canada (2018a)
Tableau 4.1 – Synthèse des travaux réalisés dans le cadre du projet entre 2015 et 201851
Tableau 4.2 – Caractéristiques des puits d'observation aménagés dans le cadre du projet entre2015 et 2017
Tableau 4.3 – Synthèse du suivi à long terme des puits d'observation entre décembre 2015 etoctobre 2017

Tableau 4.4 – Synthèse du suivi à long terme de la pression atmosphérique entre décembre 2015et octobre 2017
Tableau 4.5 – Synthèse des relevés manuels de niveau de nappe effectués dans le cadre du projet entre novembre 2015 et octobre 2017
Tableau 4.6 – Synthèse des essais au perméamètre de Guelph réalisés dans le cadre du projeten août 201661
Tableau 4.7 – Synthèse des échantillons prélevés sur le terrain dans le cadre du projet entrenovembre 2015 et août 2016.63
Tableau 4.8 – Synthèse des études sur le potentiel granulaire du territoire, données extraites de Brinsmead et Finamore (1977), Brinsmead et Seaman (1987), Seaman et Thibault (1986) et Seaman (1988)
Tableau 4.9 – Synthèse des sections de carottes sélectionnées pour analyser les propriétés du roc
Tableau 5.1 – Définition des hydrofaciès et des conductivités hydrauliques75
Tableau 5.2 – Définition des hydrofaciès des sédiments de la région d'étude selon la littérature et les travaux de terrain, données de la littérature issues de Pronk et al. (2005c), Rampton et al. (1984) et Seaman (1988)
Tableau 5.3 – Caractéristiques des hydrofaciès représentatifs du territoire
Tableau 5.4 – Source des données
Tableau 5.5 – Synthèse de la procédure de tri et de validation des données d'entrée81
Tableau 5.6 – Synthèse de la procédure de traitement statistique des données d'entrée82
Tableau 5.7 – Données utilisées pour l'interpolation.82
Tableau 5.8 – Statistiques issues du processus de validation croisée
Tableau 5.9 – Résultats des essais de perméabilité sur les puits d'observation
Tableau 5.10 – Synthèse des essais de porosité et de perméabilité sur les carottes de forages.
Tableau 5.11 – Compilation du suivi des variations du niveau de nappe à long terme
Tableau 5.12 – Principales caractéristiques du système aquifère rocheux
Tableau 5.13 – Critères de définition des conditions de confinement selon la méthode deshydrofaciès
Tableau 5.14 – Conditions de confinement des puits selon la méthode des hydrofaciès93
Tableau 5.15 – Critères de définition des conditions de confinement selon la méthode desfluctuations piézométriques
Tableau 5.16 – Conditions de confinement des puits selon la méthode des fluctuations piézométriques
Tableau 5.17 – Tests du délai de réponse et de la période d'extraction des données pour l'obtention d'une fonction de réponse barométrique représentative du système puits-aquifère. 98
Tableau 5.18 – Conditions de confinement des puits selon la fonction de réponse barométrique.

Tableau 5.19 – Conditions de confinement des puits selon les approches employées103
Tableau 5.20 – Source des données106
Tableau 5.21 – Traitement des doublons de la phase 1107
Tableau 5.22 – Traitement appliqué selon le type d'anomalie constatée
Tableau 5.23 – Synthèse de la procédure de tri et de validation des données d'entrée107
Tableau 5.24 – Nombre de données de niveau de nappe après traitement
Tableau 5.25 – Types de variables considérées selon le processus de krigeage mis en œuvre.
Tableau 5.26 – Données d'entrée primaires utilisées lors de l'interpolation de la surfacepiézométrique.111
Tableau 5.27 – Statistiques issues du processus de validation croisée selon le type de krigeage.
Tableau 5.28 – Caractéristiques des diverses techniques d'estimation du taux de recharge utilisées dans le cadre du projet, adapté de (Healy, 2010).         118
Tableau5.29– Caractéristiquesdesstationsmétéorologiques,donnéesissuesduGouvernement du Canada (2018a)
Tableau 5.30 – Caractéristiques des stations météorologiques voisines à la station « Sussex Bis » dans le bassin versant de la rivière Kennebecasis, données extraites de <i>GWHAT</i> (Gosselin <i>et al.</i> , 2017)
Tableau 5.31 – Caractéristiques des stations météorologiques voisines à la station de MechanicSettlement dans le bassin versant de la rivière Pollett, données extraites de <i>GWHAT</i> (Gosselin <i>et al.</i> , 2017)
Tableau 5.32 – Caractéristiques du bassin versant et débits enregistrés à la station hydrométrique d'Apohaqui, d'après les données du Gouvernement du Canada (2018b)
Tableau 5.33 – Résultats des estimations du débit de base ( $Q_B$ ) et de l'indice du débit de base (BFI) sur le bassin de la rivière Kennebecasis entre 1980 et 2016127
Tableau 5.34 – Composantes moyennes annuelles du bilan hydrologique obtenues avec le filtre de Chapman sur le bassin de la rivière Kennebecasis entre 1980 et 2016, leur contribution est fournie entre parenthèses
Tableau 5.35 – Définition des zones de recharge nulle.    132
Tableau 5.36 – Données utilisées pour le calcul du rayonnement solaire
Tableau 5.37 – Groupes hydrologiques des différents types de sols, d'après Monfet (1979)136
Tableau 5.38 – Détermination du numéro de courbe en fonction de l'utilisation du sol, de la pente et du groupe hydrologique, d'après la classification de Monfet (1979) adaptée par Croteau (2006). 
Tableau 5.39 – Attribution de la distance de drainage selon le type d'utilisation du sol, d'aprèsCroteau (2006)
Tableau 5.40 – Propriétés des dépôts meubles et du roc intégrées dans HELP140
Tableau 5.41 – Propriétés des unités pédologiques intégrées dans HELP140
Tableau 5.42 – Sensibilité à la recharge pour les paramètres testés141

Tableau 5.43 – Composantes moyennes annuelles du bilan hydrologique obtenues avec le modèle d'infiltration quasi-2D HELP sur le bassin de la rivière Kennebecasis entre 1980 et 2016.

Tableau 5.44 – Composantes moyennes annuelles du bilan hydrologique obtenues avec le modèle d'infiltration quasi-2D HELP sur le bassin de la rivière Pollett entre 1980 et 2016. .....145

Tableau 5.48 – Composantes moyennes annuelles du bilan hydrologique obtenues avec le modèle d'infiltration quasi-2D HELP sur le bassin de la rivière Pollett entre 1980 et 2016. .....154

 Tableau 5.49 – Cotes et poids attribués aux paramètres intégrés dans l'indice DRASTIC, traduit et modifié de Aller *et al.* (1987).

 157

Tableau 5.50 – Synthèse des conditions hydrogéologiques du territoire d'étude (1/2). ......167

Tableau 5.51 – Synthèse des conditions hydrogéologiques du territoire d'étude (2/2). ......168

Tableau 6.1 – Forages profonds utilisés dans la définition de la géologie du modèle 2D. ......172

Tableau 6.2 – Définition du maillage du modèle 2D.176Tableau 6.3 – Valeurs types de conductivité hydraulique recensées dans la littérature ou acquises

Tableau 6.5 – Valeurs de porosité totale utilisées dans le modèle numérique tirées de la littératureet des analyses des carottes de forages.179

# LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 – Mécanismes potentiels de contamination des aquifères superficiels dans les zones d'exploitation de gaz de shale utilisant la fracturation hydraulique, traduit et adapté de Howarth <i>et al.</i> (2011)
Figure 1.2 – Coupe de la zone d'étude du projet de caractérisation hydrogéologique recoupant le champ gazier de McCully (Gr. : Groupe ; Mb. : Membre), modifié de Hinds (2008)
Figure 2.1 – Localisation des zones d'étude des quatre documents consultés
Figure 2.2 – Localisation approximative des puits et forages échantillonnés, par Al <i>et al.</i> (2013). 10
Figure 2.3 – Localisation du réseau de stations sismiques autour des puits stimulés, d'après Lamontagne <i>et al.</i> (2015)12
Figure 2.4 – Signature sismique du remplissage sédimentaire carbonifère sur le secteur du champ gazier de McCully (les aplats de couleur représentent les séquences de remplissage du groupe de Horton, dans lequel se trouvent les deux unités ciblées par l'industrie), tiré de Rivard <i>et al.</i> (2017).
Figure 2.5 – Module de Young selon les unités du bassin, d'après les données de Séjourné (2017)
Figure 2.6 – Coefficient de Poisson selon les unités du bassin, d'après les données de Séjourné (2017)
Figure 2.7 – Indice de fragilité selon les unités du bassin, d'après les données de Séjourné (2017). 20
Figure 2.8 – Gradient de contrainte principale minimum horizontale selon les unités du bassin, d'après les données de Séjourné (2017)20
Figure 2.9 – Comparaison des propriétés géomécaniques du groupe de Mabou, données du roc superficiel issues de Crow <i>et al.</i> (2017) et celles du roc profond de Séjourné (2017)23
Figure 2.10 – Distribution des fractures ouvertes selon la profondeur des puits d'observation de la CGC sur le site de McCully obtenue par interprétation des diagraphies (televiewer et caméra vidéo) puis en normalisant en fonction du nombre de puits, traduit et modifié de Crow <i>et al.</i> (2017).
Figure 3.1 – Couverture du sol sur le territoire d'étude couvrant les deux bassins, données et nomenclature issues de la GéoBase (2009) avec une résolution de 30 m
Figure 3.2 – Distribution des cultures sur le territoire d'étude couvrant les deux bassins, données et nomenclature issues d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (2010) avec une résolution de 30 m
Figure 3.3 – Normales climatiques à Sussex entre 1980 et 2017. Données issues du Gouvernement du Canada (2018a), traitées et visualisées avec le logiciel GWHAT (Gosselin et al., 2017)
Figure 3.4 – Distribution des sous-bassins, des soulèvements du socle et des principales structures du bassin des Maritimes au sud-est du Nouveau-Brunswick, traduit et modifié de Lamontagne <i>et al.</i> (2015) selon la figure de Peter et Johnson (2009) ; la localisation des failles est extraite de Hinds et Peter (2006)

Figure 3.5 – Coupe géologique et structurale du sous-bassin de Moncton au droit des zones d'intérêt (champ gazier et gîtes de potasse, traduit et modifié de Hinds (2008) ; localisation de la coupe sur la figure 3.4
Figure 3.6 – Distribution spatiale des roches sous-affleurantes du socle cristallin et du bassin sédimentaire sur les bassins des rivières Kennebecasis et Pollett
Figure 3.7 – Distribution spatiale des principaux groupes d'unités sédimentaires sur les bassins des rivières Kennebecasis et Pollett
Figure 3.8 – Colonne stratigraphique de la région d'étude, traduit et modifié de Hinds et Peter (2006)
Figure 3.9 – Distribution spatiale des dépôts meubles sur les bassins des rivières Kennebecasis et Pollett41
Figure 3.10 – Distribution spatiale des principales unités de tills sur les bassins des rivières Kennebecasis et Pollett
Figure 3.11 – Profil de sol type du sud-est du Nouveau-Brunswick, traduit et adapté de Aalund et Wicklund (1950)42
Figure 3.12 – Distribution spatiale des classes pédologiques sur les bassins des rivières Kennebecasis et Pollett
Figure 3.13 – Puits résidentiel (R03), se référer à la carte des sites d'échantillonnage (Figure 4.11)45
Figure 3.14 – Statistiques sur la profondeur des puits résidentiels et de la nappe pour l'aquifère au roc, informations issues de la base de données provinciale des puits45
Figure 3.15 – Distributions statistiques de la profondeur de la nappe et des puits résidentiels captant l'aquifère au roc, informations issues de la base de données provinciale des puits45
Figure 3.16 – Profondeur totale des puits selon le type de roche
Figure 3.17 – Profondeur de l'interface entre les dépôts meubles et le roc dans les puits selon le type de roche
Figure 3.18 – Profondeur de la nappe selon dans les puits le type de roche
Figure 3.19 – Épaisseur totale saturée dans les puits selon le type de roche
Figure 3.20 – Épaisseur de roc saturé dans les puits selon le type de roche
Figure 3.21 – Capacité spécifique selon le type de roche (échelle semi-logarithmique)
Figure 3.22 – Relation entre la profondeur totale et la capacité spécifique dans les puits selon le type de roche
Figure 3.23 – Ancien puits jaillissant
Figure 3.24 – (a) Anciens bâtiments de la mine de Penobsquis et (b) récent développement de la mine de Picadilly, images extraites de CBC News (2015) et CBC News (2016b)50
Figure 3.25 – (a) Puits d'alimentation en eau 1 et station, (b) puits d'alimentation en eau 2 et (c) réservoir d'eau potable du réseau de Springdale, images extraites de Google Street View (2013). 50
Figure 3.26 – Aménagement du réseau d'eau potable de Springdale après l'assèchement de puits domestiques suite au dénovage de la mine de Penobsquis, données retranscrites à partir

Figure 4.1 – (a) Puits PO-05, (b) plateforme des puits PO-04 et PO-07 et (c) puits PO-0953
Figure 4.2 – Configuration type de suivi piézométrique dans un puits
Figure 4.3 – Principe d'un essai pneumatique avec pour exemple le puits PO-0457
Figure 4.4 – Installation pour effectuer des essais pneumatiques ( <i>slug tests</i> ) sur les puits (a) PO- 01, (b) PO-05 et (c) sur le puits d'alimentation en eau de Corridor Resources Inc. (ID-39528) situé à proximité du puits PO-03
Figure 4.5 – Exemple de résultat pour le puits PO-04 : (a) analyse avec le modèle de Bouwer et Rice et (b) analyse avec le modèle KGS
Figure 4.6 – Analyse de sensibilité du puits PO-01 sur (a) l'anisotropie (b = 100 m, soit la hauteur d'aquifère interceptée dans le puits ouvert au roc) et (b) l'épaisseur de l'aquifère ( $K_v/K_h$ = 1 soit un milieu isotrope)
Figure 4.7 – Principe d'un essai au perméamètre de Guelph60
Figure 4.8 – Réalisation des essais au perméamètre de Guelph : (a) PG-12 : trou effectué à l'aide d'une tarière, (b) PG-19 : prise de mesure de niveau d'eau sur le cylindre gradué et (c) PG-20 : déploiement typique sur chaque site de la carte 460
Figure 4.9 – Prélèvements d'échantillons de dépôts meubles sur le terrain (a) à partir d'une carotte réalisée avec une tarière manuelle sur le site PG-01 (tills de Broad River) et par l'intermédiaire de prélèvements de sol pour les dépôts les plus grossiers tels que sur les sites (b) PR-13 (dépôts fluvio-glaciaires) et (c) PR-23 (dépôts de contact glaciaire)
Figure 4.10 – Localisation des sites d'échantillonnages des dépôts granulaires extraits des publications de Brinsmead et Finamore (1977), Brinsmead et Seaman (1987), Seaman et Thibault (1986) et Seaman (1988)
Figure 4.11 – Sites d'échantillonnages et types d'eau souterraine
Figure 4.12 – Échantillonnage des eaux souterraines par pompe submersible sur les sites des puits d'observation (a) PO-04 et PO-07 et (b) PO-06 et PO-0967
Figure 5.1 – Distribution des textures des dépôts superficiels sur les bassins, d'après les données de Brinsmead et Finamore (1977), Brinsmead et Seaman (1987), Seaman et Thibault (1986) et Seaman (1988)
Figure 5.2 – Coefficient d'uniformité des dépôts granulaires regroupant les dépôts fluvio-glaciaires et les dépôts de contact glaciaire, d'après les données de Brinsmead et Finamore (1977), Brinsmead et Seaman (1987), Seaman et Thibault (1986) et Seaman (1988)70
Figure 5.3 – Textures des dépôts granulaires, d'après les données de Brinsmead et Finamore (1977), Brinsmead et Seaman (1987), Seaman et Thibault (1986) et Seaman (1988) ayant étudié le potentiel en granulats
Figure 5.4 – Distribution granulométrique des sables au sein des dépôts granulaires, d'après les données de Brinsmead et Finamore (1977), Brinsmead et Seaman (1987), Seaman et Thibault (1986) et Seaman (1988) ayant étudié le potentiel en granulats
Figure 5.5 – Textures de tills représentatifs des bassins, d'après les échantillonnages de terrain.
Figure 5.6 – Distribution des textures des dépôts superficiels sur les bassins, d'après les échantillonnages de terrain et les déblais de forages

Figure 5.7 – Coefficient d'uniformité des unités de tills, des dépôts de contact glaciaire et des Figure 5.8 – Textures des unités de tills, des dépôts de contact glaciaire et des alluvions, d'après les échantillonnages de terrain et les déblais de forages. .....74 Figure 5.9 – Distribution granulométrique des sables au sein des unités de tills, des dépôts de contact glaciaire et des alluvions, d'après les échantillonnages de terrain et les déblais de forages. Figure 5.10 – Distribution des valeurs de conductivité hydraulique des six unités de tills étudiées. Figure 5.11 – Diagramme décisionnel du processus d'interpolation de l'épaisseur des dépôts Figure 5.12 – Statistiques sur l'épaisseur des dépôts meubles d'après les informations des puits. Figure 5.13 – Hydrogrammes de neuf des puits d'observation construits dans le cadre du projet de la CGC, les données climatiques sont issues de Gouvernement du Canada (2018a). .......89 Figure 5.14 – Présentation des résultats des essais de perméabilité et du débitmètre dans le roc selon quatre classes, les données d'écoulement vertical ont été retranscrites à partir Figure 5.15 – Définition des conditions de confinement sur les puits selon la méthode des Figure 5.16 – Définition des conditions de confinement sur les puits selon la méthode des fluctuations piézométriques, pour une meilleure visualisation des hydrogrammes, une translation a été effectuée pour certains puits : les puits PO-06 et PO-09 sont à -14 m, PO-03 à +2 m et PO-05 à +3 m p/r au niveau de nappe réel.....95 Figure 5.17 - Courbes théoriques de réponse barométrique selon le type d'aquifère et l'effet d'emmagasinement, adapté de Rasmussen et Crawford (1997) et Spane (2002)......97 Figure 5.18 - Réponse barométrique cumulative typique d'un puits en condition libre : cas du Figure 5.19 - Réponse barométrique cumulative typique d'un puits en condition captive : cas du Figure 5.20 - (a) Puits jaillissant PO-02 et (b) schéma d'un puits jaillissant contrôlé Figure 5.21 – Diagramme décisionnel du processus d'interpolation de la piézométrie de la nappe. Figure 5.22 – Corrélation entre l'élévation du niveau piézométrique et l'altitude du lit des rivières Figure 5.23 – Corrélation entre l'élévation du niveau piézométrique et la topographie. ..........109 Figure 5.24 – Coupe AA' de la surface piézométrique interpolée selon les trois différentes Figure 5.25 – Statistiques de profondeur de la nappe sur chaque maille de la grille d'interpolation selon la méthode d'interpolation utilisée......114

Figure 5.26 – Composantes du bilan hydrologique utilisées dans les diverses approches d'estimation de la recharge : adapté de Rivard *et al.* (2014b) et de Gosselin (2016)......120

Figure 5.29 – Bilan hydrologique annuel avec le filtre de Chapman entre 1980 et 2016......129

Figure 5.30 – Débit de base mensuel estimé avec le filtre de Chapman entre 1980 et 2016...129

Figure 5.35 – Comparaison entre les débits de base et les débits totaux estimés avec HELP et ceux mesurés à la station hydrométrique d'Apohaqui entre 1980 et 2009 sur la rivière Kennebecasis ; le débit de base étant calculé avec le filtre de Chapman (Section 5.6.3).......144

Figure 5.37 – Recharge annuelle estimée avec le modèle GWHAT pour le puits PO-01 selon les années hydrologiques, la courbe enveloppe rouge représente l'intervalle de confiance GLUE entre 25 et 75 % tandis que les moustaches correspondent aux limites d'incertitude pour l'intervalle de confiance GLUE entre 5 et 95 %.

Figure 5.43 – Détermination de l'impact de la zone vadose a) dans un système monocouche avec une cote unique et b) dans un système multicouche avec le calcul d'un indice équivalent.....159

Figure 5.45 – Indice DRASTIC au droit des sites des forages gaziers situés sur les bassins versants......161 Figure 5.46 – Distribution du temps de transfert advectif vertical en fonction de l'indice DRASTIC Figure 5.47 – Comparaison du temps de transfert advectif vertical (DAT) extrait dans une zone de 1 km<sup>2</sup> autour des puits avec les données géochimiques d'unité tritium (TU) issues des Figure 5.48 – Modèles conceptuels (a) géologique et (b) hydrogéologique selon la coupe BB', Figure 6.1 - Modèle conceptuel de la coupe BB' définissant les conditions géologiques Figure 6.2 – Conditions limites et maillage du modèle d'écoulement de la coupe BB'......177 Figure 6.3 – Distribution des conductivités hydrauliques et de l'anisotropie sur le domaine Figure 6.4 – Charges hydrauliques simulées après calage et comparées aux charges observées extraites de la carte piézométrique le long du profil BB'......181 Figure 6.5 – Comparaison entre les charges observées et simulées le long de la coupe BB'..181 Figure 6.6 – Visualisation des flux entrants et sortants du domaine après calage des charges hydrauliques le long du profil BB' : les flux positifs correspondent à la recharge tandis que les flux Figure 6.7 – Profil 1D vertical des vitesses des eaux souterraines extrait de la figure 6.8. .....184 Figure 6.8 – Modèle numérique 2D présentant les vitesses des eaux souterraines et les lignes d'écoulement en régime permanent sur la coupe BB' : le flux n'est pas uniforme entre chaque ligne de courant et le profil 1D de vitesses situé à +200 m par rapport à l'origine du modèle (ligne blanche) correspond à la figure 6.7......185 Figure 6.9 - Modèle numérique 2D présentant les charges hydrauliques et les lignes d'écoulement en régime permanent sur la coupe BB' : le flux n'est pas uniforme entre chaque Figure 6.10 – Modèle numérique 2D simulant l'âge advectif-dispersif des eaux souterraines et les lignes d'écoulement sur la coupe BB' : le flux n'est pas uniforme entre chaque ligne d'écoulement. 189

# LISTE DES ÉQUATIONS

Équation 1 – Débit spécifique	
Équation 2 – Compensation du niveau de nappe	55
Équation 3 – Coefficient d'uniformité	
Équation 4 – Conductivité hydraulique	65
Équation 5 – Bilan hydrologique	
Équation 6 – Recharge potentielle	119
Équation 7 – Recharge nette	119
Équation 8 – Durée du ruissellement de surface	123
Équation 9 – Réserve en eau utile maximale dans le sol	
Équation 10 – Indice de vulnérabilité DRASTIC	155
Équation 11 – Indice équivalent de l'impact de la zone vadose	159
Équation 12 – Temps de transfert advectif vertical vers la nappe	162
Équation 13 – Dispersivité longitudinale	

# LISTE DES CARTES

Carte 1 – Localisation et description du territoire d'étude	223
Carte 2 – Topographie et coupes	225
Carte 3 – Géologie et structures du roc	227
Carte 4 – Distribution des dépôts superficiels	229
Carte 5 – Unités pédologiques	231
Carte 6 – Hydrofaciès des dépôts superficiels	233
Carte 7 – Épaisseur des dépôts superficiels	235
Carte 8 – Élévation de la surface du roc	237
Carte 9 – Élévation de la surface piézométrique de l'aquifère au roc	239
Carte 10 – Pente de la surface du sol	241
Carte 11 – Couverture du sol	243
Carte 12 – Utilisation du sol	245
Carte 13 – Groupes hydrologiques	247
Carte 14 – Coefficient de ruissellement représenté par le numéro de courbe	249
Carte 15 – Distance de drainage	251
Carte 16 – Cultures	253
Carte 17 – Indice de surface foliaire	255
Carte 18 – Profondeur d'évaporation	257
Carte 19 – Distribution spatiale de la recharge	259
Carte 20 – Distribution spatiale de l'évapotranspiration	261
Carte 21 – Distribution spatiale du ruissellement de surface	263
Carte 22 – Distribution spatiale du ruissellement hypodermique	265
Carte 23 – Distribution spatiale de la recharge sur le bassin de la rivière Pollett	267
Carte 24 – Distribution spatiale de l'évapotranspiration sur le bassin de la rivière Pollett	269

Carte 25 – Distribution spatiale du ruissellement de surface sur le bassin de la rivière Pollett
Carte 26 – Distribution spatiale du ruissellement hypodermique sur le bassin de la rivière Pollett
Carte 27 – Réserve en eau maximale facilement accessible dans le sol
Carte 28 – Indice DRASTIC : Profondeur de la nappe 277
Carte 29 – Indice DRASTIC : Recharge de l'aquifère au roc 279
Carte 30 – Indice DRASTIC : Types d'aquifère
Carte 31 – Indice DRASTIC : Types de sol
Carte 32 – Indice DRASTIC : Topographie (pentes)
Carte 33 – Indice DRASTIC : Zone vadose
Carte 34 – Indice DRASTIC : Conductivité hydraulique
Carte 35 – Indice DRASTIC de vulnérabilité de l'aquifère au roc
Carte 36 – Temps de transfert advectif vertical vers la nappe

# LISTE DES ANNEXES

Annexe I - Travaux réalisés avec GWHAT 2	97
Annexe II - Granulométrie des dépôts meubles 3	57
Annexe III - Interpolation de l'épaisseur des dépôts	75
Annexe IV - Essais de porosité et de perméabilité	79
Annexe V - Interpolation de la piézométrie	83
Annexe VI - Estimation du débit de base	95
Annexe VII - Évaluation de la recharge avec HELP 40	05
Annexe VIII - Évaluation de la vulnérabilité 4	43
Annexe IX - Descriptions des puits d'observation 4	55
Annexe X - Article de conférence : AIH GÉOOTTAWA 2017 4	69
Annexe XI - Fichiers de travail (SIG) 4	79
Annexe XII - Fichiers de travail (annexe électronique)4	89

# LISTE DES TABLEAUX DANS LES ANNEXES

### Annexe I

Tableau I.1 – Normales de la station de Sussex Bis entre 1980 et 2017 après le processus decomblement des données manquantes.306
Tableau I.2 – Normales de la station de Mechanic Settlement entre 1980 et 2017 après leprocessus de comblement des données manquantes.314
Tableau I.3 – Définition de la courbe maîtresse de récession (CMR) et valeurs plausibles des paramètres hydrologiques principaux utilisés dans le processus de calage des hydrogrammes synthétiques avec GWHAT pour chaque puits analysé
Tableau I.4 – Taux de recharge estimé avec la méthode du bilan combiné à partir des données de la station météorologique de Sussex Bis entre 1680 et 2017 et présenté à l'aide de la méthode d'optimisation GLUE
Annexe II
Tableau II.1 – Coordonnées des échantillons de dépôts meubles prélevés pour l'analysegranulométrique sur les secteurs de Sussex et Hampstead : d'après des données extraites deBrinsmead et Finamore (1977).359
Tableau II.2 – Coordonnées des échantillons de dépôts meubles prélevés pour l'analysegranulométrique sur les secteurs de Central Lowland : d'après des données extraites de Seamanet Thibault (1986).359
Tableau II.3 – Coordonnées des échantillons de dépôts meubles prélevés pour l'analysegranulométrique sur le secteur de Petitcodiac : d'après des données extraites de Brinsmead etSeaman (1987).360
Tableau II.4 – Coordonnées des échantillons de dépôts meubles prélevés pour l'analysegranulométrique sur les secteurs de Waterford et de Salmon River : d'après des donnéesextraites de (Seaman, 1988).361
Tableau II.5 – Résultats des analyses granulométriques sur les secteurs de Sussex et Hampstead : d'après des données extraites de Brinsmead et al. (1977) (1/2)
Tableau II.6 – Résultats des analyses granulométriques sur les secteurs de Sussex et Hampstead : d'après des données extraites de Brinsmead et al. (1977) (2/2)

Tableau II.7 – Résultats des analyses granulométriques sur le secteur de Central Lowland :d'après des données extraites de Seaman et al. (1986).363
Tableau II.8 – Résultats des analyses granulométriques sur le secteur de Petitcodiac : d'aprèsdes données extraites de Brinsmead et al. (1987) (1/3).364
Tableau II.9 – Résultats des analyses granulométriques sur le secteur de Petitcodiac : d'aprèsdes données extraites de Brinsmead et al. (1987) (2/3).365
Tableau II.10 – Résultats des analyses granulométriques sur le secteur de Petitcodiac : d'aprèsdes données extraites de Brinsmead et al. (1987) (3/3).366
Tableau II.11 – Résultats des analyses granulométriques sur les secteurs de Waterford et deSalmon River : d'après des données extraites de (Seaman, 1988) (1/2).366
Tableau II.12 – Résultats des analyses granulométriques sur les secteurs de Waterford et deSalmon River : d'après des données extraites de (Seaman, 1988) (2/2).367
Tableau II.13 – Coordonnées des échantillons de dépôts meubles prélevés pour l'analysegranulométrique lors des travaux de forage.368
Tableau II.14 – Coordonnées des échantillons de dépôts meubles prélevés pour l'analysegranulométrique lors des campagnes de terrain.368
Tableau II.15 – Résultats des analyses granulométriques sur les échantillons prélevés lors destravaux de forage.369
Tableau II.16 – Résultats des analyses granulométriques sur les échantillons prélevés lors descampagnes de terrain (1/2).370
Tableau II.17 – Résultats des analyses granulométriques sur les échantillons prélevés lors descampagnes de terrain (2/2).371
Tableau II.18 – Définition des hydrofaciès pour les dépôts meubles selon la littérature existante : description issue de Pronk et al. (2005), Rampton et al. (1984) et Seaman (1988)
Tableau II.19 – Définition des hydrofaciès pour les tills selon la littérature existante : descriptionissue de Pronk et al. (2005).373
Tableau II.20 – Définition des hydrofaciès selon la description visuelle des dépôts et les résultatsdes analyses granulométriques.374

### Annexe III

Tableau III.1 – Distribution spatiale des données d'entrée et paramètres de la grille d'interpola	ition
pour le krigeage ordinaire (KO).	377
Tableau III.2 – Paramètres du semi-variogramme et de l'ellipsoïde de recherche pour le krige	age
ordinaire (KO).	377

#### Annexe IV

Tableau IV.1 – Résultats des essais de routine réalisés sur les carottes de forages en juin 2017.
Tableau IV.2 – Résultats des essais de routine réalisés sur les carottes de forages en février
2018

### Annexe V

Tableau V.1 – Distribution spatiale des données d'entrée et paramètres de la grille d'interpolation pour le krigeage ordinaire (KO <sub>po</sub> )
Tableau V.2 – Paramètres du semi-variogramme et de l'ellipsoïde de recherche pour le krigeage ordinaire (KO <sub>po</sub> )
Tableau V.3 – Distribution spatiale des données d'entrée et paramètres de la grille d'interpolationpour le krigeage ordinaire (KOpopips).387
Tableau V.4 – Paramètres du semi-variogramme et de l'ellipsoïde de recherche pour le krigeage ordinaire (KO <sub>popips</sub> )
Tableau V.5 – Distribution spatiale des données d'entrée et paramètres de la grille d'interpolationpour le krigeage avec dérive externe (KDE389
Tableau V.6 – Paramètres du semi-variogramme et de l'ellipsoïde de recherche pour le krigeage avec dérive externe (KDE <sub>popips</sub> )

### Annexe VI

Tableau VI.1 – Estimation du débit de base de la rivière entre 1980 et 2016 (1/2).	403
Tableau VI.2 – Estimation du débit de base de la rivière entre 1980 et 2016 (1/2)	404

### Annexe VII

Tableau VII.1 – Séquences stratigraphiques rencontrées sur le territoire et intégrées dans HELP.
Tableau VII.2 – Unités pédologiques rencontrées sur le territoire et intégrées dans HELP.
Tableau VII.3 – Vitesse horaire moyenne du vent à la station de Moncton A selon les mois : d'après les normales climatiques entre 1981 et 2010 du Gouvernement du Canada (2018). 
Tableau VII.4 – Humidité relative moyenne à la station de Moncton A selon les trimestres : d'après les normales climatiques entre 1981 et 2010 du Gouvernement du Canada (2018)
Tableau VII.5 – Période sans gel à la station de Moncton A : d'après les normales climatiquesentre 1981 et 2010 du Gouvernement du Canada (2018).412
Tableau VII.6 – Distribution des pentes sur les bassins
Tableau VII.7 – Regroupements des attributs par type d'utilisation du sol : d'après les donnéesde la couverture du sol de la GéoBase (2009).415
Tablacu V/II.9 Distribution du tune d'utilization du cal aur les bassins (116
Tableau VII.o – Distribution du type d'utilisation du soi sur les bassins.
Tableau VII.9 – Distribution du type d'utilisation du sol sul les bassins.       416         Tableau VII.9 – Regroupements des unités pédologiques par classes de sol et en groupes hydrologiques : unités de sol extraites des cartes pédologiques du Provincial Department of Agriculture (1948a), du Provincial Department of Agriculture (1948b) et du Provincial Department of Agriculture (1949).
Tableau VII.9 – Distribution du type d'utilisation du soi sur les bassins.       416         Tableau VII.9 – Regroupements des unités pédologiques par classes de sol et en groupes hydrologiques : unités de sol extraites des cartes pédologiques du Provincial Department of Agriculture (1948a), du Provincial Department of Agriculture (1948b) et du Provincial Department of Agriculture (1949).         417         Tableau VII.10 – Distribution des groupes hydrologiques sur les bassins.
Tableau VII.9 – Distribution du type d'utilisation du sor sur les bassins.       416         Tableau VII.9 – Regroupements des unités pédologiques par classes de sol et en groupes hydrologiques : unités de sol extraites des cartes pédologiques du Provincial Department of Agriculture (1948a), du Provincial Department of Agriculture (1948b) et du Provincial Department of Agriculture (1949).       417         Tableau VII.10 – Distribution des groupes hydrologiques sur les bassins.       418         Tableau VII.11 – Distribution du numéro de courbe sur les bassins.       419
Tableau VII.9 – Regroupements des unités pédologiques par classes de sol et en groupes         hydrologiques : unités de sol extraites des cartes pédologiques du Provincial Department of         Agriculture (1948a), du Provincial Department of Agriculture (1948b) et du Provincial Department         of Agriculture (1949).         Tableau VII.10 – Distribution des groupes hydrologiques sur les bassins.         418         Tableau VII.11 – Distribution du numéro de courbe sur les bassins.         419         Tableau VII.12 – Distribution de la pente du drain sur les bassins.
Tableau VII.8 – Distribution du type d'utilisation du sol sul les bassins.       416         Tableau VII.9 – Regroupements des unités pédologiques par classes de sol et en groupes hydrologiques : unités de sol extraites des cartes pédologiques du Provincial Department of Agriculture (1948a), du Provincial Department of Agriculture (1948b) et du Provincial Department of Agriculture (1949).       417         Tableau VII.10 – Distribution des groupes hydrologiques sur les bassins.       418         Tableau VII.11 – Distribution du numéro de courbe sur les bassins.       419         Tableau VII.12 – Distribution de la pente du drain sur les bassins.       421         Tableau VII.13 – Distribution de la distance de drainage sur les bassins.       422
Tableau VII.9 – Regroupements des unités pédologiques par classes de sol et en groupes         hydrologiques : unités de sol extraites des cartes pédologiques du Provincial Department of         Agriculture (1948a), du Provincial Department of Agriculture (1948b) et du Provincial Department         of Agriculture (1949).         417         Tableau VII.10 – Distribution des groupes hydrologiques sur les bassins.         418         Tableau VII.11 – Distribution du numéro de courbe sur les bassins.         419         Tableau VII.12 – Distribution de la pente du drain sur les bassins.         421         Tableau VII.13 – Distribution de la distance de drainage sur les bassins.         422         Tableau VII.14 – Distribution du type de couverture du sol sur les bassins.
Tableau VII.9 – Regroupements des unités pédologiques par classes de sol et en groupes         hydrologiques : unités de sol extraites des cartes pédologiques du Provincial Department of         Agriculture (1948a), du Provincial Department of Agriculture (1948b) et du Provincial Department         of Agriculture (1949).         417         Tableau VII.10 – Distribution des groupes hydrologiques sur les bassins.         418         Tableau VII.11 – Distribution du numéro de courbe sur les bassins.         419         Tableau VII.12 – Distribution de la pente du drain sur les bassins.         421         Tableau VII.13 – Distribution du type de couverture du sol sur les bassins.         422         Tableau VII.14 – Distribution du type de couverture du sol sur les bassins.         423         Tableau VII.15 – Définition de l'indice de surface foliaire (LAI).
Tableau VII.9 – Regroupements des unités pédologiques par classes de sol et en groupes         hydrologiques : unités de sol extraites des cartes pédologiques du Provincial Department of         Agriculture (1948a), du Provincial Department of Agriculture (1948b) et du Provincial Department         of Agriculture (1949).         417         Tableau VII.10 – Distribution des groupes hydrologiques sur les bassins.         418         Tableau VII.11 – Distribution du numéro de courbe sur les bassins.         419         Tableau VII.12 – Distribution de la pente du drain sur les bassins.         421         Tableau VII.13 – Distribution de la distance de drainage sur les bassins.         422         Tableau VII.14 – Distribution du type de couverture du sol sur les bassins.         423         Tableau VII.15 – Définition de l'indice de surface foliaire (LAI).         425         Tableau VII.16 – Distribution l'indice de surface foliaire (LAI) sur les bassins.
Tableau VII.18 – Définition de la profondeur d'évapotranspiration.
---
Tableau VII.19 – Distribution de la profondeur d'évapotranspiration sur les bassins
Tableau VII.20 – Définition des propriétés des dépôts meubles et du roc.
Tableau VII.21 – Définition des propriétés des unités pédologiques.

# Annexe VIII

Tableau VIII.1 – Attribution des cotes de la profondeur de la nappe (paramètre D) et distributionde cet indice sur les bassins.445
Tableau VIII.2 – Attribution des cotes de la recharge (paramètre R) et distribution de cet indicesur les bassins.446
Tableau VIII.3 – Attribution des cotes du type d'aquifère (paramètre A) et distribution de cet indicesur les bassins.447
Tableau VIII.4 – Attribution des cotes du type de sol (paramètre S) et distribution de cet indicesur les bassins.448
Tableau VIII.5 – Attribution des cotes de la topographie (paramètre T) et distribution de cet indicesur les bassins.449
Tableau VIII.6 – Attribution des cotes de l'impact de la zone vadose (paramètre I) et distributionde cet indice sur les bassins.450
Tableau VIII.7 – Attribution des cotes de la conductivité hydraulique de l'aquifère (paramètre C)et distribution de cet indice sur les bassins.451
Tableau VIII.8 – Attribution des cotes de l'indice DRASTIC de l'aquifère rocheux et distribution decet indice sur les bassins.452
Tableau VIII.9 – Attribution des cotes du temps de transfert advectif vertical (DAT) vers la nappe et distribution de ce temps de transfert advectif vertical sur les bassins

# LISTE DES FIGURES DANS LES ANNEXES

## Annexe I

Figure I.13 – Hydrogramme du puits PO-01 avec les données météorologiques de la station de Sussex Bis
Figure I.14 – Hydrogramme du puits PO-02 avec les données météorologiques de la station de Sussex Bis
Figure I.15 – Hydrogramme du puits PO-03 avec les données météorologiques de la station de Sussex Bis
Figure I.16 – Hydrogramme du puits PO-04 avec les données météorologiques de la station de Sussex Bis
Figure I.17 – Hydrogramme du puits PO-05 avec les données météorologiques de la station de Sussex Bis
Figure I.18 – Hydrogramme du puits PO-06 avec les données météorologiques de la station de Sussex Bis
Figure I.19 – Hydrogramme du puits PO-07 avec les données météorologiques de la station de Sussex Bis
Figure I.20 – Hydrogramme du puits PO-09 avec les données météorologiques de la station de Sussex Bis
Figure I.20 – Hydrogramme du puits PO-09 avec les données météorologiques de la station de Sussex Bis
Figure I.20 – Hydrogramme du puits PO-09 avec les données météorologiques de la station de   Sussex Bis. 322   Figure I.21 – Hydrogramme du puits PO-10 avec les données météorologiques de la station de   Mechanic Settlement. 323   Figure I.22 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-01. 325
Figure I.20 – Hydrogramme du puits PO-09 avec les données météorologiques de la station de   Sussex Bis. 322   Figure I.21 – Hydrogramme du puits PO-10 avec les données météorologiques de la station de   Mechanic Settlement. 323   Figure I.22 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-01. 325   Figure I.23 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-02. 325
Figure I.20 – Hydrogramme du puits PO-09 avec les données météorologiques de la station de   Sussex Bis. 322   Figure I.21 – Hydrogramme du puits PO-10 avec les données météorologiques de la station de   Mechanic Settlement. 323   Figure I.22 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-01. 325   Figure I.23 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-02. 325   Figure I.24 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-03. 326
Figure I.20 – Hydrogramme du puits PO-09 avec les données météorologiques de la station de   Sussex Bis. 322   Figure I.21 – Hydrogramme du puits PO-10 avec les données météorologiques de la station de   Mechanic Settlement. 323   Figure I.22 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-01. 325   Figure I.23 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-02. 325   Figure I.24 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-03. 326   Figure I.25 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-04. 326
Figure I.20 – Hydrogramme du puits PO-09 avec les données météorologiques de la station de   Sussex Bis. 322   Figure I.21 – Hydrogramme du puits PO-10 avec les données météorologiques de la station de   Mechanic Settlement. 323   Figure I.22 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-01. 325   Figure I.23 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-02. 325   Figure I.24 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-03. 326   Figure I.25 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-04. 326   Figure I.26 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-05. 327
Figure 1.20 – Hydrogramme du puits PO-09 avec les données météorologiques de la station de   Sussex Bis. 322   Figure 1.21 – Hydrogramme du puits PO-10 avec les données météorologiques de la station de   Mechanic Settlement. 323   Figure 1.22 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-01. 325   Figure 1.23 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-02. 325   Figure 1.24 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-03. 326   Figure 1.25 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-04. 326   Figure 1.26 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-05. 327   Figure 1.27 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-05. 327   Figure 1.27 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-06. 327
Figure I.20 – Hydrogramme du puits PO-09 avec les données météorologiques de la station de   Sussex Bis. 322   Figure I.21 – Hydrogramme du puits PO-10 avec les données météorologiques de la station de   Mechanic Settlement. 323   Figure I.22 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-01. 325   Figure I.23 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-02. 325   Figure I.24 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-03. 326   Figure I.25 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-04. 326   Figure I.26 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-05. 327   Figure I.27 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-04. 326   Figure I.26 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-04. 326   Figure I.26 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-05. 327   Figure I.27 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-06. 327   Figure I.28 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-07. 328
Figure 1.20 – Hydrogramme du puits PO-09 avec les données météorologiques de la station de   Sussex Bis. 322   Figure 1.21 – Hydrogramme du puits PO-10 avec les données météorologiques de la station de   Mechanic Settlement. 323   Figure 1.22 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-01. 325   Figure 1.23 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-02. 325   Figure 1.24 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-03. 326   Figure 1.25 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-04. 326   Figure 1.26 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-05. 327   Figure 1.27 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-04. 326   Figure 1.26 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-05. 327   Figure 1.27 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-05. 327   Figure 1.28 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-06. 327   Figure 1.29 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-06. 328   Figure 1.29 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-07. 328   Figure 1.29 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-09. 228

Figure I.31 – Niveaux d'eau estimés avec le modèle GWHAT selon l'intervalle de confiance GLUE de 5 à 95 % représenté en gris par rapport aux niveaux d'eau mesurés en bleu pour le puits PO-01
Figure I.32 – Niveaux d'eau estimés avec le modèle GWHAT selon l'intervalle de confiance GLUE de 5 à 95 % représenté en gris par rapport aux niveaux d'eau mesurés en bleu pour le puits PO-03
Figure I.33 – Niveaux d'eau estimés avec le modèle GWHAT selon l'intervalle de confiance GLUE de 5 à 95 % représenté en gris par rapport aux niveaux d'eau mesurés en bleu pour le puits PO-04
Figure I.34 – Niveaux d'eau estimés avec le modèle GWHAT selon l'intervalle de confiance GLUE de 5 à 95 % représenté en gris par rapport aux niveaux d'eau mesurés en bleu pour le puits PO-05
Figure I.35 – Niveaux d'eau estimés avec le modèle GWHAT selon l'intervalle de confiance GLUE de 5 à 95 % représenté en gris par rapport aux niveaux d'eau mesurés en bleu pour le puits PO- 06
Figure I.36 – Niveaux d'eau estimés avec le modèle GWHAT selon l'intervalle de confiance GLUE de 5 à 95 % représenté en gris par rapport aux niveaux d'eau mesurés en bleu pour le puits PO-07
Figure I.37 – Niveaux d'eau estimés avec le modèle GWHAT selon l'intervalle de confiance GLUE de 5 à 95 % représenté en gris par rapport aux niveaux d'eau mesurés en bleu pour le puits PO-09
Figure I.38 – Niveaux d'eau estimés avec le modèle GWHAT selon l'intervalle de confiance GLUE de 5 à 95 % représenté en gris par rapport aux niveaux d'eau mesurés en bleu pour le puits PO- 10
Figure I.39 – Recharge annuelle estimée avec le modèle GWHAT pour le puits PO-01 selon les années hydrologiques, la courbe enveloppe rouge représente l'intervalle de confiance GLUE entre 25 et 75 % tandis que les moustaches correspondent aux limites d'incertitude pour l'intervalle de confiance GLUE entre 5 et 95 %

Figure I.45 – Recharge annuelle estimée avec le modèle GWHAT pour le puits PO-09 selon les années hydrologiques, la courbe enveloppe rouge représente l'intervalle de confiance GLUE entre 25 et 75 % tandis que les moustaches correspondent aux limites d'incertitude pour l'intervalle de confiance GLUE entre 5 et 95 %.

Figure I.48 – Composantes du bilan hydrologique estimées avec le modèle GWHAT pour le puitsPO-03.342
Figure I.49 – Composantes du bilan hydrologique estimées avec le modèle GWHAT pour le puits PO-04
Figure I.50 – Composantes du bilan hydrologique estimées avec le modèle GWHAT pour le puits PO-05
Figure I.51 – Composantes du bilan hydrologique estimées avec le modèle GWHAT pour le puits PO-06
Figure I.52 – Composantes du bilan hydrologique estimées avec le modèle GWHAT pour le puits PO-07
Figure I.53 – Composantes du bilan hydrologique estimées avec le modèle GWHAT pour le puits PO-09
Figure I.54 – Composantes du bilan hydrologique estimées avec le modèle GWHAT pour le puits PO-10
Figure I.55 – Bilan en eau annuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-01
Figure I.56 – Bilan en eau annuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-03
Figure I.57 – Bilan en eau annuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-04
Figure I.58 – Bilan en eau annuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-05
Figure I.59 – Bilan en eau annuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-06
Figure I.60 – Bilan en eau annuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-07
Figure I.61 – Bilan en eau annuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-09
Figure I.62 – Bilan en eau annuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-10

Figure I.63 – Bilan en eau mensuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-01
Figure I.64 – Bilan en eau mensuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-03
Figure I.65 – Bilan en eau mensuel moyen entre 1980 et 2017 estimés avec le modèle GWHAT pour le puits PO-04
Figure I.66 – Bilan en eau mensuel moyen entre 1980 et 2017 estimés avec le modèle GWHAT pour le puits PO-05
Figure I.67 – Bilan en eau mensuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-06
Figure I.68 – Bilan en eau mensuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-07
Figure I.69 – Bilan en eau mensuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-09
Figure I.70 – Bilan en eau mensuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-10

## Annexe III

Figure III.1 – Semi-variogramme omnidirectionnel avec le modèle sphérique ajusté pour le
krigeage ordinaire (KO)
Figure III.2 – Résultats de la validation croisée après krigeage ordinaire (KO) sur l'épaisseur des
dépôts meubles

## Annexe V

Figure V.1 – Semi-variogramme omnidirectionnel avec le modèle sphérique ajusté pour	le
krigeage ordinaire (KO <sub>po</sub> )	35
Figure V.2 – Résultats de la validation croisée après krigeage ordinaire (KO <sub>po</sub> ) sur la piézométri 38	е. 36
Figure V.3 – Semi-variogramme omnidirectionnel avec le modèle sphérique ajusté pour	le
krigeage ordinaire (KO <sub>popips</sub> )	37

Figure V.4 – Résultats de la validation croisée après krigeage ordinaire (KO <sub>popips</sub> ) sur la piézométrie
Figure V.5 – Semi-variogramme omnidirectionnel avec le modèle sphérique ajusté pour le krigeage avec dérive externe (KDE <sub>popips</sub> )
Figure V.6 – Résultats de la validation croisée après krigeage avec dérive externe (KDE <sub>popips</sub> ) sur la piézométrie
Figure V.7 – Coupe AA' de la surface piézométrique interpolée avec le krigeage ordinaire (KO <sub>po</sub> ) : exagération verticale x25
Figure V.8 – Coupe AA' de la surface piézométrique interpolée avec le krigeage ordinaire (KO <sub>popips</sub> ) : exagération verticale x25
Figure V.9 – Coupe AA' de la surface piézométrique interpolée avec le krigeage avec dérive externe (KDE <sub>popips</sub> ) : exagération verticale x25

# Annexe VI

Figure VI.1 – Bilan hydrique estimé à l'aide du filtre de Chapman entre 1980 et 2016
Figure VI.2 – Bilan hydrique estimé à l'aide du filtre de Furey et Gupta entre 1980 et 2016. 
Figure VI.3 – Estimation du débit de base selon les filtres entre 1980 et 1999
Figure VI.4 – Estimation du débit de base selon les filtres entre 2000 et 2016
Figure VI.5 – Bilan hydrique estimé à l'aide du modèle PART entre 1980 et 2016 399
Figure VI.6 – Bilan hydrique estimé à l'aide du modèle HYSEP-Intervalle Fixe entre 1980 et 2016. 
Figure VI.7 – Bilan hydrique estimé à l'aide du modèle HYSEP-Minimum Local entre 1980 et 2016
Figure VI.8 – Bilan hydrique estimé à l'aide du modèle HYSEP-Intervalle Glissant entre 1980 et 2016
Figure VI.9 – Bilan hydrique estimé à l'aide du modèle BFI-Standard entre 1980 et 2016 401
Figure VI.10 – Bilan hydrique estimé à l'aide du modèle BFI-Modifié entre 1980 et 2016 401
Figure VI.11 – Estimation du débit de base selon les modèles entre 1980 et 1999 402

Figure VI.12 – Estimation du débit de base selon les modèles entre 2000 et 2016. ..... 402

## Annexe VII

Figure VII.1 – Données disponibles sur le rayonnement solaire à Moncton selon les outils utilisés. 
Figure VII.2 – Variations temporelles du rayonnement solaire : d'après les données de la station CWEEDS de Moncton A entre 1953 et 2005
Figure VII.3 – Variations temporelles du rayonnement solaire : d'après les données du satellite GOES intégrées au modèle SUNY selon la localisation de Moncton entre 2002 et 2008 409
Figure VII.4 – Variations temporelles du rayonnement solaire : d'après les données satellitaires du projet POWER de la NASA selon la localisation de Moncton entre 1983 et 2017
Figure VII.5 – Variations temporelles du rayonnement solaire : d'après les données synthétiques générées par HELP à Sussex entre 1980 et 2016
Figure VII.6 – Relation entre le rayonnement solaire et les précipitations selon les outils utilisés entre 2002 et 2005
Figure VII.7 – Variations temporelles du rayonnement solaire selon les outils utilisés entre 2002 et 2005
Figure VII.8 – Comparaison du rayonnement solaire selon les outils utilisés entre 2002 et 2005. 
Figure VII.9 – Distribution des pentes sur les bassins
Figure VII.10 – Distribution du type d'utilisation du sol sur les bassins
Figure VII.11 – Distribution des groupes hydrologiques sur les bassins
Figure VII.12 – Distribution du numéro de courbe sur les bassins
Figure VII.13 – Distribution de la pente du drain sur les bassins
Figure VII.14 – Distribution de la distance de drainage sur les bassins
Figure VII.15 – Distribution du type de couverture du sol sur les bassins
Figure VII.16 – Distribution l'indice de surface foliaire (LAI) sur les bassins
Figure VII.17 – Distribution du type de cultures sur les bassins

Figure VII.18 – Distribution de la profondeur d'évapotranspiration sur les bassins
Figure VII.19 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction du coefficient de ruissellement
Figure VII.20 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de la conductivité hydraulique de la couche n°1
Figure VII.21 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de la conductivité hydraulique de la couche n°2
Figure VII.22 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de la conductivité hydraulique de la couche n°3
Figure VII.23 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de la conductivité hydraulique de la couche n°5
Figure VII.24 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de la période de croissance végétale. 435
Figure VII.25 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de la distance au drain. 436
Figure VII.26 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de l'épaisseur de la couche n°1
Figure VII.27 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de l'épaisseur de la couche n°2
Figure VII.28 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de l'épaisseur de la couche n°3
Figure VII.29 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de l'épaisseur des couches de sol
Figure VII.30 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de l'épaisseur de la couche n°5
Figure VII.31 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de l'humidité relative. 439
Figure VII.32 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de l'indice de surface foliaire

Figure VII.33 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de la latitude de
la station météorologique
Figure VII.34 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de la pente du drain
Figure VII.35 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de la profondeur d'évaporation
Figure VII.36 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de la vitesse
moyenne annuelle du vent

## Annexe VIII

Figure VIII.1 – Distribution des cotes de la profondeur de la nappe (paramètre D) sur les bassins. 
Figure VIII.2 – Distribution des cotes de la recharge (paramètre R) sur les bassins 446
Figure VIII. 3 – Distribution des cotes du type d'aquifère (paramètre A) sur les bassins 447
Figure VIII.4 – Distribution des cotes du type de sol (paramètre S) sur les bassins 448
Figure VIII.5 – Distribution des cotes de la topographie (paramètre T) sur les bassins 449
Figure VIII.6 – Distribution des cotes de l'impact de la zone vadose (paramètre I) sur les bassins. 
Figure VIII.7 – Distribution des cotes de la conductivité hydraulique de l'aquifère (paramètre C) sur les bassins
Figure VIII.8 – Distribution de la vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère rocheux sur les bassins selon l'indice DRASTIC
Figure VIII.9 – Fréquence des temps de transfert advectif vertical (DAT) sur les bassins et vulnérabilité associée
Figure VIII.10 – Fréquence des temps de transfert advectif vertical (DAT) sur les bassins et vulnérabilité associée : zoom de la figure précédente
Figure VIII.11 – Distribution de la vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère rocheux sur les bassins selon le temps de transfert advectif vertical

# LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

А	:	Superficie (km <sup>2</sup> )
b <sub>i</sub>	:	Épaisseur de la couche i
AIH	:	Association Internationale des Hydrogéologues
AWB	:	Bilan en eau d'un aquifère libre (Aquifer Water Balance)
BTEX	:	Benzène, Toluène, Ethylbenzène, Xylènes (ortho, méta et para)
BV	:	Bassin versant
CGC	:	Commission géologique du Canada / Geological Survey of Canada (GSC)
CMA	:	Concentration maximum acceptable
CMR	:	Courbe maîtresse de récession / Master Recession Curve (MRC)
CR	:	Corridor Resources Inc.
C <sub>RO</sub>	:	Coefficient de ruissellement
CH₄	:	Méthane
См	:	Coefficient de fonte de la neige
Cs	:	Capacité spécifique d'un puits
Cu	:	Coefficient d'uniformité
DAT	:	Temps de transfert advectif vertical (Downward Advective Time)
D*	:	Coefficient de diffusion moléculaire
DRASTIC	:	Méthode d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque d'un aquifère
<b>d</b> <sub>10</sub>	:	Granulométrie correspondant à 10 % du passant cumulé (mm)
d <sub>60</sub>	:	Granulométrie correspondant à 60 % du passant cumulé (mm)
EB	:	Efficacité barométrique
EPA	:	Agence de Protection Environnementale des Etats-Unis (U.S. Environmental Protection Agency)
ET	:	Evapotranspiration
ETR	:	Évapotranspiration réelle

Fm	:	Formation
FRB	:	Fonction de réponse barométrique / Barometric Response Function (BRF)
Gr	:	Groupe
I	:	Infiltration
INRS	:	Institut national de la recherche scientifique
К	:	Conductivité hydraulique (m/s)
K <sub>h</sub>	:	Composante horizontale de la conductivité hydraulique (m/s)
K <sub>méd</sub>	:	Conductivité hydraulique médiane (m/s)
Ks	:	Conductivité hydraulique saturée (m/s)
Kv	:	Composante verticale de la conductivité hydraulique (m/s)
<b>KDE</b> <sub>popips</sub>	:	Krigeage avec dérive externe sur la topographie
KGS	:	Kansas Geological Survey
КО	:	Krigeage ordinaire
KO <sub>po</sub>	:	Krigeage ordinaire des points d'observation seuls
KO <sub>popips</sub>	:	Krigeage ordinaire des points d'observation, imposés et synthétiques
Ма	:	Millions d'années
mD	:	Millidarcy (1 mD = $9.87 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ )
Mb	;	Membre
МО	:	Matière organique
n	:	Porosité
Ν	:	Durée de ruissellement (jours)
NMM	:	Niveau moyen de la mer
PCS	:	Potash Corporation of Saskatchewan Inc.
PO	:	Puits d'observation
p/r	:	Par rapport
Р	:	Précipitations

Pr	:	Profondeur des racines
P <sub>tot</sub>	:	Précipitations totales
PACES	:	Programme d'acquisition des connaissances sur les eaux souterraines
PZ	:	Surface piézométrique
Q1	:	Premier quartile
Q3	:	Troisième quartile
Q <sub>B</sub>	:	Débit de base
Q <sub>E</sub>	:	Débit entrant dans l'aquifère
Q <sub>NET</sub>	:	Bilan en eau d'un aquifère
Qs	:	Débit sortant de l'aquifère
Q <sub>R</sub>	:	Débit total de la rivière
RAS <sub>max</sub>	:	Réserve en eau utile maximale d'un sol (Readily Available Supply)
R	:	Recharge
RH	:	Ruissellement hypodermique
RP	:	Recharge potentielle
RPEP	:	Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection
RS	:	Ruissellement de surface
SMB	:	Bilan hydrologique de surface (Soil Moisture Balance)
Sy	:	Porosité de drainage de l'aquifère (Specific yield)
S <sub>moy</sub>	:	Pente moyenne (%)
Tcf	:	Trillion cubic feet ( $1.0x10^{-9} m^3 = 0.0355 Tcf$ )
T <sub>moy</sub>	:	Température moyenne (°C)
T <sub>min</sub>	:	Température minimale (°C)
T <sub>max</sub>	:	Température maximale (°C)
Tcrit	:	Température critique pour la conversion neige-pluie (°C)
T <sub>melt</sub>	:	Température de référence pour la fonte de la neige (°C)

TN	:	Terrain naturel, soit la surface du sol
СОТ	:	Carbone organique total / Total Organic Carbon (TOC)
ТОТ	:	Temps de transfert vers l'aquifère (Time of Transfer)
WTF	:	Méthode des fluctuations de la nappe (Water Table Fluctuation)
W <sub>d</sub>	:	Niveau de nappe dynamique (m)
Ws	:	Niveau de nappe statique (m)
ZNS	:	Zone non saturée
ZS	:	Zone saturée
Δh	:	Variations de charge hydraulique (m)
ΔRAS	:	Variations de stockage (mm)
ΔΤ	:	Délai de réponse de la nappe (unité de temps)
$\theta_{FC}$	:	Capacité au champ (Field Capacity)
θί	:	Teneur en eau de la couche i
$\theta_{WP}$	:	Point de flétrissement (Wilting Point)

## **1** INTRODUCTION

Les récentes avancées techniques des forages directionnels et des stimulations par fracturation hydraulique à grand volume ont rendu accessible et économiguement viable la production de gaz naturel à partir de réservoirs non conventionnels ayant une très faible perméabilité. Bien que négligeable en l'an 2000, le gaz extrait de manière non conventionnelle devrait représenter près de 68 % de la production de gaz naturel aux États-Unis en 2040 avec environ 21 Tcf (5.9x10<sup>11</sup> m<sup>3</sup>) selon l'API (2016). Au Canada, la production de gaz naturel à partir des shales augmente de façon rapide depuis 2005. Les ressources de gaz naturel non conventionnelles sont estimées à 3 300 Tcf (9.3x10<sup>13</sup> m<sup>3</sup>) et se concentrent essentiellement en Colombie-Britannique et en Alberta (Rivard et al., 2014a). À l'est du pays, le Québec et le Nouveau-Brunswick présentent également un potentiel intéressant. Dans ces provinces, les inquiétudes de la population locale face aux risques reliés aux opérations de l'industrie gazière et pétrolière ont entraîné la mise en œuvre de lois limitant le développement des activités d'extraction non conventionnelles (Réseau Canadien de l'Eau, 2015). Au Nouveau-Brunswick, un moratoire interdisant la fracturation hydraulique est ainsi appliqué depuis juin 2015. Cette réglementation provinciale ne sera pas levée tant que les incertitudes sanitaires et environnementales liées à l'exploitation non conventionnelle des unités profondes de shale persistent. La Commission du Nouveau-Brunswick sur la fracturation hydraulique, mandatée par le ministère de l'Énergie et des Mines, a produit un rapport en février 2016 (Commission du Nouveau-Brunswick sur la fracturation hydraulique, 2016) à la suite duquel le moratoire a été maintenu jusqu'à ce que des informations scientifiques sur les risques environnementaux et la santé soient disponibles afin de pouvoir prendre des décisions éclairées.

#### 1.1 Contexte de réalisation du projet et études similaires

Depuis 2015, la Commission géologique du Canada (CGC) a entrepris un projet visant à évaluer, d'ici 2019, la vulnérabilité des aquifères superficiels par rapport aux activités gazières profondes. L'approche adoptée engage une équipe multidisciplinaire afin d'intégrer des données géologiques, géomécaniques, géophysiques, géochimiques et hydrogéologiques permettant, à terme, de répondre à la problématique (Rivard *et al.*, 2017).

Cette maîtrise traite du volet hydrogéologique du projet global en se basant sur des études similaires, menées par la CGC à Saint-Édouard-de-Lotbinière (Ladevèze, 2017a, Ladevèze *et al.*, 2016, Lavoie *et al.*, 2014) et par l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) à Gaspé (Raynauld, 2014, Raynauld *et al.*, 2014, Raynauld *et al.*, 2016).

Il bénéficie donc des connaissances des divers acteurs du projet (Section 2.4) et des données d'études locales antérieures (Section 2.1).

## 1.2 Problématiques liées à l'exploitation gazière

Au début des années 2000, le prix élevé du pétrole a orienté l'industrie pétrolière et gazière vers les ressources non conventionnelles. Afin d'extraire le gaz naturel des formations peu perméables telles que les shales ou les grès fins, il est toutefois nécessaire de fracturer hydrauliquement le réservoir en injectant sous haute pression un fluide généralement composé d'eau, de sable et d'additifs chimiques. L'objectif est d'augmenter la perméabilité de la formation autour du puits de production en générant des factures qu'on maintient ouvertes grâce au sable ou à des billes de céramique (Jackson *et al.*, 2013, Lefebvre, 2017, Zoback *et al.*, 2010).

Malgré la mise en place de normes et de guides de bonnes pratiques (Institut de l'Énergie du Nouveau-Brunswick, 2013, Schultz *et al.*, 2014, USDA, 2009), les populations concernées ont rapidement été préoccupées par cette exploitation dans les régions sans activité pétrolière conventionnelle. Plusieurs auteurs recensent les risques sanitaires et environnementaux potentiels liés à l'exploitation de ces ressources non conventionnelles (Jackson *et al.*, 2013, Kissinger *et al.*, 2013, Lefebvre, 2017, Tinnacher *et al.*, 2011, Zoback *et al.*, 2010).

La principale inquiétude concerne l'éventuelle contamination d'aquifères superficiels par les fluides de fracturation, les hydrocarbures ou les saumures issus des réservoirs profonds (Schultz *et al.*, 2014). Ces migrations pourraient être induites par la surpression des réservoirs, assurant un flux naturel ascendant (Rivard *et al.*, 2014a), combiné à la présence de cheminements préférentiels naturels ou artificiels (Schultz *et al.*, 2014). Ces voies de migration préférentielles pourraient être liées à 1) des fuites le long de forages actifs ou abandonnés mal scellés ou dégradés ou 2) des fuites via les fractures induites par la stimulation alors connectées à des failles ou à un réseau de fractures existants (Jackson *et al.*, 2013).

Quant aux éventuelles contaminations depuis la surface affectant les aquifères superficiels, elles sont généralement dues soit 1) à un traitement inadéquat des fluides de récupération, soit 2) à une fuite, à partir de réservoirs ou d'un défaut de membrane d'une lagune ou encore 3) à un déversement accidentel (Kissinger *et al.*, 2013, Lange *et al.*, 2013).

Howarth *et al.* (2011) dressent une liste des risques de l'exploitation non conventionnelle des hydrocarbures les plus courants (Figure 1.1), qu'il convient de compléter par 1) les communications inter-forages et 2) une potentielle combinaison de facteurs (Jackson *et al.*, 2013, Kissinger *et al.*, 2013, Lefebvre, 2017, Tinnacher *et al.*, 2011, Zoback *et al.*, 2010).

Ces mêmes auteurs précisent que les fuites de fluide de fracturation depuis les réservoirs profonds vers la surface sont peu probables puisqu'aucune preuve de contamination ne s'est formellement avérée quand le réservoir est localisé à plus de 1 000 m de profondeur (Lange *et al.*, 2013). En raison des conditions géologiques et hydrogéologiques très différentes dans les régions visées par l'exploitation non conventionnelle, il est nécessaire d'engager des travaux spécifiques sur chaque territoire (Jackson *et al.*, 2013, Kissinger *et al.*, 2013).



Figure 1.1 – Mécanismes potentiels de contamination des aquifères superficiels dans les zones d'exploitation de gaz de shale utilisant la fracturation hydraulique, traduit et adapté de Howarth *et al.* (2011).

#### 1.3 Objectifs du mémoire

Au sud du Nouveau-Brunswick, il n'existe aucun exemple de caractérisation d'aquifères en contexte d'exploitation gazière de réservoirs non conventionnels. Ce projet de maîtrise vise donc à caractériser les aquifères superficiels de la région de Sussex où deux secteurs sont ciblés par l'industrie pétrolière et gazière : 1) le champ de gaz naturel de McCully (Figure 1.2), non loin de Sussex, en production depuis 2003, et 2) le champ exploratoire de condensats d'Elgin, situé plus à l'est.

Sur la région d'étude, bien que les unités visées par l'industrie gazière soient localisées à plus de 2 km de profondeur (Figure 1.2), il est essentiel de bien comprendre, et de caractériser si possible, les différents intervalles du système géologique et l'écoulement qui s'y produit (Nicot, 2017). Ces composantes (ou zones) sont décrites par Dusseault et Jackson (2014) : 1) le réservoir profond d'hydrocarbures ciblé par l'industrie, 2) une zone intermédiaire contenant de l'eau saumâtre, puis salée, et 3) les aquifères superficiels renfermant l'eau douce (Figure 1.2).



Figure 1.2 – Coupe de la zone d'étude du projet de caractérisation hydrogéologique recoupant le champ gazier de McCully (Gr. : Groupe ; Mb. : Membre), modifié de Hinds (2008).

Les formations profondes ciblées par l'industrie disposent généralement de nombreuses données acquises par l'intermédiaire de carottages ou de diagraphies réalisées dans les puits d'exploration pour les hydrocarbures. Grâce aux projets de caractérisation hydrogéologiques (Section 2.1) ou aux bases de données des puits d'approvisionnement en eau (Section 2.2), des informations sur les unités aquifères de sous-surface sont également disponibles.

Toutefois, ce n'est pas le cas pour la zone intermédiaire, située au-dessus du ou des réservoirs ciblés par l'industrie et sous les aquifères de surface, qui est souvent simplement « traversée » par les forages de l'industrie pétrolière et gazière et donc peu documentée. La caractérisation de cet intervalle se révèle être pourtant indispensable dans le cadre d'une évaluation des risques liés à l'exploitation de ressources non conventionnelles puisque c'est cette zone qui contrôle la vulnérabilité des nappes superficielles face aux activités industrielles réalisées en profondeur.

Au regard des faits précédents, les objectifs de ce projet de recherche concernent (Figure 1.2) :

1) La caractérisation hydrogéologique des bassins versants où sont localisés les champs gaziers afin de définir les propriétés de l'aquifère et l'influence potentielle de ces activités pétrolières et gazières sur l'écoulement superficiel (Section 5) ;

2) Le développement d'un modèle d'écoulement 2D relativement profond (jusqu'à 1 500 m) permettant d'étudier l'écoulement dans la partie supérieure de la zone intermédiaire et dans les aquifères superficiels utilisés pour l'approvisionnement en eau et les liens potentiels entre ces deux intervalles (Section 0).

# 2 DONNÉES EXISTANTES

En début du projet, un état des lieux des connaissances du territoire visé a été réalisé. Dans ce cadre, les études offrant des informations pertinentes sur la région ou à proximité ont été recensées (Section 2.1). Dans un second temps, les données hydrogéologiques issues des bases de données provinciales et fédérales ont été intégrées, permettant de dresser un portrait préliminaire du territoire fédéral (Section 2.2). Tout au long du projet, ces données ont été vérifiées et contrôlées afin de s'assurer de leur bonne qualité et de leur mise à jour régulière. En complément, des données d'ordre géologique, incluant des cartes et des rapports, ont également été compilées (Section 2.3). De même, une brève synthèse des travaux menés en parallèle par la CGC est présentée à la section 2.4. Ces études conjointes ont permis d'apporter des informations qui ont été mises en lien avec l'étude hydrogéologique du présent document.

### 2.1 Données locales extraites de documents existants

Les données de quatre documents traitant du contexte géologique et hydrogéologique du secteur d'étude ont été utilisées. Ces projets recoupaient au moins en partie la zone d'étude (Figure 2.1).



Figure 2.1 – Localisation des zones d'étude des quatre documents consultés.

Rivard *et al.* (2008a) abordent l'aspect hydrogéologique du sud-est de la province. Al *et al.* (2013) apportent des informations sur la qualité des eaux souterraines sur des puits résidentiels sur les secteurs de McCully et d'Elgin. Lamontagne et Lavoie (2015) documentent le suivi de microséismes pendant des opérations de fracturation hydraulique sur le site de McCully. Par ailleurs, une étude locale (DesRoches *et al.*, 2012) s'est concentrée sur l'influence des propriétés mécaniques du roc fracturé sur l'aquifère non loin du champ de McCully. La présente section se veut une liste non exhaustive d'informations extraites des divers rapports ; le lecteur peut se référer aux documents cités pour plus de renseignements.

### 2.1.1 Caractérisation hydrogéologique du sud-est du Nouveau-Brunswick

L'Initiative sur les Eaux Souterraines dans les Maritimes (IESM), complétée en 2004, mais publiée quatre ans plus tard (Rivard *et al.*, 2008a), s'était appuyée sur une méthodologie similaire à celle utilisée dans la présente étude de caractérisation. Cette étude a permis de fournir les principaux éléments caractérisant les dépôts de surface (Tableau 2.1), principalement composés de tills, et les unités rocheuses (Tableau 2.2) dans le sous-bassin de Moncton au sud-est du Nouveau-Brunswick, ainsi que le comportement du système aquifère à différentes échelles (Tableau 2.3).

Tableau	2.1	-	Propriétés	des	sédiments	de	surface	au	sud-est	du	Nouveau-Brunswick.
Renseigr	neme	nts	extraits de	Rivar	d e <i>t al.</i> (2008	3a) p	our le so	us-b	assin de	Mon	cton.

	Dépôts meubles (tills)				
Dâlo	Couche permettant le transfert des eaux de recharge à l'aquifère rocheux				
Rule	Recharge préférentielle via le till sableux				
Dropriátáo	Propriétés des tills dépendent de la nature du roc sous-jacent				
Proprietes	Épaisseur de 0 à 20 m (généralement inférieure à 10 m – 75 <sup>e</sup> percentile)				
Descrittée	Fm de Boss Point (Gr de Cumberland) : sableux perméables (K = 1.3x10 <sup>-6</sup> m/s)				
Proprietes	Gr de Pictou et Fm d'Hillsborough (Gr de Windsor) : moyennement perméables				
nyuraunques	Fm de Salisbury (Gr de Cumberland) : peu perméables (K = 6.5x10 <sup>-9</sup> m/s)				

Les éléments du tableau 2.1 mettent en évidence la forte variabilité des propriétés des tills dont la granulométrie et la conductivité hydraulique dépendent des unités du roc sous-jacentes. Ces tills, qui couvrent la grande majorité du secteur, influencent directement les taux de recharge de l'aquifère au roc et donc sa vulnérabilité.

Tableau 2.2 – Propriétés des formations rocheuses au sud-est du Nouveau-Brunswick, renseignements extraits de Rivard *et al.* (2008a) pour le sous-bassin de Moncton.

	Roc (roches sédimentaires du bassin carbonifère)			
Rôle Constitue l'aquifère régional				
Propriétés	Milieu poreux fracturé			
	Successions de grès, siltstones, shales et conglomérats			
generales	Présence de lits lenticulaires discontinus			
	Fractures concentrées dans les grès et les conglomérats			
Fracturation	Fractures principalement horizontales dans les plans de litage			
	Quelques fractures verticales connectées aux fractures horizontales			
Aquifères	Gr de Pictou, Fm de Boss Point (Gr de Cumberland) et d'Hillsborough (Gr de Windsor)			
Aquitards	Fm de Salisbury (Gr de Cumberland), Gr de Horton et de Mabou			
Propriétés	1.0x10 <sup>-8</sup> < K < 1.0x10 <sup>-3</sup> m/s pour l'ensemble des unités			
hydrauliques	$5.0 \times 10^{-6} < K_{moy} < 1.0 \times 10^{-4}$ m/s pour les unités aquifères			

Malgré d'importantes variations lithologiques, le milieu poreux fracturé du roc forme l'aquifère régional (Tableau 2.2). Le système d'écoulement (Tableau 2.3) est contrôlé par la topographie où les rivières constituent les principaux exutoires de l'eau souterraine. L'écoulement se concentre dans la partie supérieure du roc où le réseau de fractures est dense et bien connecté.

Tableau 2.3 – Propriétés du système aquifère régional au sud-est du Nouveau-Brunswick, renseignements extraits de Rivard et al. (2008a) pour le sous-bassin de Moncton.

	Système aquifère régional					
Propriétés générales	Écoulement contrôlé par la topographie					
	Profondeur de la nappe varie de 50 m p/r sol à artésienne					
Recharge	Preferenciellement via les tills sabieux					
i tooniai go	Varie de 22 à 271 mm/an selon le secteur					
Émergence	Cours d'eau principaux					
Confinement	Dépend de la nature des tills de couverture					
Erecturation	K décroît en profondeur					
Fracturation	Majorité de l'écoulement dans les 100 premiers mètres sous la surface					
	Milieu anisotrope relié à l'orientation des principales fractures					
Propriétés	K de la matrice poreuse faible : 10 <sup>-8</sup> < K < 10 <sup>-7</sup> m/s sans considérer les fractures					
hydrauliques	Porosité de la matrice comprise entre 5 et 10 % : emmagasinement significatif possible K des unités aquifères : $5.0 \times 10^{-6} < K_{mov} < 1.0 \times 10^{-4}$ m/s					

L'ensemble de ces propriétés définissant les unités géologiques et le système aquifère régional concordent avec les informations extraites de la présente étude (Section 5). A noter, le groupe de Mabou à l'échelle du sous-bassin de Moncton s'avère être une unité aquifère exploitée par la population locale (Section 3.6) alors que Rivard *et al.* (2008a) décrivaient ce groupe comme un « mauvais aquifère » à une échelle plus régionale.

#### 2.1.2 Géochimie des eaux souterraines sur les sites de McCully et Elgin

L'étude de la CGC réalisée par Al *et al.* (2013) compare les analyses de gaz et de saumures issues de puits gaziers profonds avec celles de l'eau souterraine récoltée à partir de 26 puits domestiques localisés sur les secteurs de McCully et d'Elgin (Figure 2.2). L'objectif de ces travaux était de constituer une base de référence qualitative essentielle à la compréhension de l'impact des gaz de shale sur les aquifères superficiels tel que ce qui a été recommandé par la suite par Jackson et Heagle (2016).

Toutefois, Al *et al.* (2013) précisent que l'échantillonnage d'eau souterraine à partir de puits résidentiels n'est pas idéal, car pouvant potentiellement ne pas être représentatif des conditions géochimiques au sein de l'aquifère. En effet, l'intégrité des puits domestiques peut être potentiellement défaillante (défaut ou absence de cimentation ou dégradation du tubage) ce qui les rend vulnérables face aux éventuelles contaminations depuis la surface comme les sels déglaçant, les effluents de fosses septiques (contamination bactérienne) ou encore les résidus agricoles (apports azotés) (Jackson et Heagle, 2016).





La géochimie générale de l'eau souterraine échantillonnée par Al *et al.* (2013) est similaire à celle généralement retrouvée au Nouveau-Brunswick selon la distribution des principaux ions sur le diagramme de Piper (Rivard *et al.*, 2008a). Quelques composés inorganiques dépassent la concentration maximum acceptable (CMA) établie par Santé Canada (2017) : 1) l'arsenic, attribuable à la géologie locale, 2) le plomb, à relier à la géologie ou à la dégradation des conduites au point d'échantillonnage et finalement, 3) les nitrates, dont le dépassement est à mettre en lien avec les pratiques agricoles, et donc les apports azotés en surface (Section 3.2.2) selon Al *et al.* (2013).

L'analyse des isotopes de l'eau ( $\delta^2$ H et  $\delta^{18}$ O) des puits résidentiels suggère que les eaux souterraines sont typiques d'eaux météoriques de recharge récentes (Al *et al.*, 2013).

Selon les analyses d'hydrocarbures dissous réalisées sur les échantillons des puits domestiques, seuls trois puits contiennent des concentrations de méthane dépassant le seuil de détection de 0.01 mg/L : deux dans la région d'Elgin et un seul dans le champ de McCully (Figure 2.2). Ces informations concordent relativement bien avec les échantillons collectés lors la présente étude où les concentrations de méthane sont généralement faibles, mais légèrement plus élevées dans la région d'Elgin que dans le champ de McCully (Section 2.4.6).

D'après les auteurs de cette étude, il ne semble pas y avoir de lien direct entre les différents sites de forages gaziers en production et les puits résidentiels sur le secteur de McCully. Sur le secteur d'Elgin, qui compte seulement quelques puits exploratoires, et aucun de production, le méthane dissous détecté aurait une origine thermogénique, laissant supposer une origine naturelle du gaz puisque celle-ci ne peut pas être reliée à des activités gazières. Ceci démontre bien l'importance de réaliser une étude sur la présence potentielle de voies de migration entre les unités ciblées par l'industrie gazière et les aquifères peu profonds en amont de l'exploitation de champs gaziers afin de définir les conditions géochimiques initiales du territoire d'étude.

Les analyses de saumure profonde effectuées sur des puits gaziers du site de McCully (Figure 2.2) suggèrent une origine marine et n'indiquent pas de mélange avec les eaux de l'aquifère superficiel (Al *et al.*, 2013).

#### 2.1.3 Suivi de microséismes lors d'opérations de fracturation hydraulique

Entre août et septembre 2014, un programme de stimulation réalisé pour Corridor Resources Inc. avait pour but 1) d'augmenter la production de gaz à partir des unités d'Hiram Brook et de Frederick Brook du champ de McCully et notamment 2) d'évaluer le potentiel de production en gaz du shale du membre de Frederick Brook sur le site d'Elgin (Corridor Resources, 2014).

Les travaux de la CGC devaient alors établir si ces périodes de fracturation hydraulique réalisées sur cinq puits gaziers profonds (verticaux ou inclinés) induisaient des séismes détectables en surface à l'aide de sept sismographes localisés au cœur du sous-bassin de Moncton, dont certains étaient situés très près des puits fracturés (Lamontagne et Lavoie, 2015). Le cas échéant, il s'agissait de les différencier des tremblements de terre naturels (Figure 2.3).

Finalement, entre septembre 2012 et janvier 2015, seuls cinq séismes naturels de faible magnitude ont été recensés sur l'ensemble du sous-bassin de Moncton, traduisant le faible nombre d'évènements détectés dans la province (Lamontagne *et al.*, 2015). Selon la limite de détection du réseau de suivi, aucun microséisme de magnitude supérieure à 0.5 sur l'échelle de Richter n'a été décelé suite aux périodes de simulation sur les différents forages gaziers.



Figure 2.3 – Localisation du réseau de stations sismiques autour des puits stimulés, d'après Lamontagne *et al.* (2015).

#### 2.1.4 Influence des réseaux de fractures sur l'écoulement

Suite à la construction du réseau local d'approvisionnement en eau potable de Springdale (Section 3.6.3), l'étude menée par DesRoches *et al.* (2012) avait pour but de caractériser les hétérogénéités de l'aquifère et le réseau de fractures à une échelle locale. Cette étude incluait des investigations par diagraphies et des essais de pompage afin de définir les conditions d'écoulement au sein de l'aquifère superficiel de la formation de Boss Point du groupe de Cumberland.

Au sein de l'aquifère rocheux, les fractures localisées dans les lits gréseux apparaissent plus transmissives que celles situées dans les lits de shale selon DesRoches *et al.* (2012). DesRoches (2017) indique également que les plans de litage situés aux interfaces entre les différentes lithologies participent dans une moindre mesure à l'écoulement. Cet auteur avait conclu que les fractures d'orientation nord-ouest dont l'angle est le plus prononcé induisent l'écoulement dominant dans cette région, ce qui diffère des conclusions de Rivard *et al.* (2008a). Toutefois, les diagraphies réalisées dans le cadre de cette étude régionale n'incluaient pas de puits localisé dans la région de Sussex. Cette observation diverge également quelque peu des renseignements collectés par Ladevèze (2017b) et Crow *et al.* (2017) dans le cadre du présent projet, où les fractures développées dans les plans de litage sont nombreuses et contribuent majoritairement à l'écoulement au sein de l'aquifère superficiel (Sections 2.4.4 et 2.4.5).

Selon la réponse des essais de pompage, l'aquifère local étudié présenterait un caractère captif contrairement au caractère libre de la nappe à l'échelle des sous-bassins versants étudiés ici (Section 5.4). Ceci démontre bien que des études spécifiques, telles que celle menée par DesRoches *et al.* (2012) sont nécessaires afin de caractériser l'aquifère à l'échelle locale pour des besoins d'approvisionnement municipal.

#### 2.2 Données géospatiales locales gouvernementales

Afin de compléter les informations recensées dans les études réalisées sur le territoire (Section 3.6.3), des données brutes ont également été collectées auprès de la province du Nouveau-Brunswick et du gouvernement du Canada au début du projet (Tableau 2.4). Bien qu'il soit nécessaire d'être vigilant sur la qualité de ces dernières données, ce socle de données primaires a été utilisé, après un contrôle rigoureux, de façon conjointe avec les données acquises sur le terrain dans le cadre de cette étude (Section 4) et celles des études décrites précédemment. Ces données de puits résidentiels ou de forages profonds étaient pour la plupart non traitées et ont alors nécessité plusieurs phases de tri et de traitement afin de produire les livrables suivants : une carte de l'épaisseur des dépôts meubles (Section 5.2), une carte de la piézométrie de l'aquifère rocheux (Section 5.5) et un modèle numérique 2D du système aquifère (Section 0).

D'autres données ont été recueillies auprès de la province, telles que celles sur la pédologie et la topographie. Celles-ci ont permis d'évaluer la recharge de l'aquifère rocheux (Section 5.6) et de cartographier la vulnérabilité de la nappe face aux potentielles contaminations depuis la surface (Section 5.7). Les données hydrométriques et climatiques, la distribution des cultures et la couverture du sol ont été obtenues du gouvernement du Canada.

### 2.3 Données extraites des cartes et de rapports géologiques

Les renseignements sur la géologie du territoire (Section 3.5.1 et Carte 3) proviennent de la carte géologique au 1/500 000 du substrat rocheux de la province (GeoNB, 2015) et de quatre cartes détaillant la géologie du roc à l'échelle 1/50 000 (Barr et al., 2005a, Barr et al., 2005b, Johnson et Peter, 2005, Peter et al., 2005). Les descriptions stratigraphiques des diverses unités ainsi que l'histoire géologique de la région sont issues des rapports de Hinds et Peter (2006) et Peter et Johnson (2009). Les travaux de conceptualisation du système (Section 5.8) et de modélisation (Section 0) sont basés sur un profil extrait des coupes régionales établies par Hinds (2008).

Les informations relatives à la distribution spatiale des dépôts meubles (Section 3.5.3 et Carte 4) ont été compilées à partir de quatre cartes à l'échelle 1/50 000 (Pronk *et al.*, 2005a, Pronk *et al.*, 2005b, Pronk *et al.*, 2005c, Pronk *et al.*, 2005d) dont les contours de chaque unité ont été tracés manuellement dans ArcGIS. Rampton *et al.* (1984) fournissent également des précisions sur les dépôts meubles et l'histoire géologique récente de la région. Quatre études sur le potentiel en granulats de la région (Brinsmead et Finamore, 1977, Brinsmead et Seaman, 1987, Seaman, 1988, Seaman et Thibault, 1986) offrent des détails intéressants sur les dépôts grossiers du territoire et une large base de données d'analyses granulométriques (Section 4.3.3).

Quant aux contours des unités pédologiques (Section 3.5.4 et Carte 5), ils ont été tracés à la main sur ArcGIS à partir de trois cartes pédologiques au 1/125 000 (Provincial Department of Agriculture, 1948a, Provincial Department of Agriculture, 1948b, Provincial Department of Agriculture, 1949). Les données du rapport de Aalund et Wicklund (1950) viennent compléter les informations de ces cartes.

Le tableau 2.4 recense, entre autres, les diverses sources associées à la géologie de la région.

Livrable		Paramètre		Donnée	Source
Ι	Épaisseur des dépôts meubles	1 Épaisseur des dépôts meubles		Puits résidentiels	Departement of Environment (2016)
	Piézométrie	2	Niveau de nappe	Puits résidentiels	Departement of Environment (2016)
	de l'aquifère	3	Altitude du lit des rivières	Cours d'eau	GeoNB (2014)
		4	Débit de base <sup>1</sup>	Hydrométrie	Gouvernement du Canada (2018b)
		5	Précipitations totales <sup>2, 3</sup>	Données climatiques	Gouvernement du Canada (2018a)
		6	RAS <sub>max</sub> <sup>2</sup>	Type de cultures	Agriculture et Agroalimentaire Canada (2010)
		7	Températures <sup>3</sup>	Données climatiques	Gouvernement du Canada (2018a)
		8	Vent <sup>3</sup>	Données climatiques	Gouvernement du Canada (2018a)
		9	Humidité relative <sup>3</sup>	Données climatiques	Gouvernement du Canada (2018a)
		10	Période de croissance <sup>3</sup>	Données climatiques	Gouvernement du Canada (2018a)
ш	Recharge	11	Types de sol <sup>3</sup>	Pédologie	Provincial Department of Agriculture (1948a, 1948b, 1949)
•••	de l'aquifère	12	Pente du sol <sup>3</sup>	MNT	GeoNB (2002)
		13	Utilisation du sol <sup>3</sup>	Couverture du sol	GéoBase (2009)
		14	Indice de surface foliaire <sup>3</sup>	Couverture du sol	GéoBase (2009)
		15	Profondeur des racines <sup>3</sup>	Type de cultures	Agriculture et Agroalimentaire Canada (2010)
		16	Distance de drainage <sup>3</sup>	Couverture du sol	GéoBase (2009)
		17	Type de dépôts meubles <sup>3</sup>	Dépôts meubles	Pronk <i>et al.</i> (2005a, b, c, d)
		18	Unités géologiques <sup>3</sup>	Géologie	Barr <i>et al.</i> (2005a, b), Johnson et Peter (2005), Peter <i>et al.</i> (2005)
	Vulnérabilité de l'aquifère	19	Type d'aquifère <sup>4</sup>	Géologie	Barr <i>et al.</i> (2005a, b), Johnson et Peter (2005), Peter <i>et al.</i> (2005)
IV		11	Types de sol⁴	Pédologie	Provincial Department of Agriculture (1948a, 1948b, 1949)
		12	Pente du sol <sup>4</sup>	MNT	GeoNB (2002)
V	Modèle 2D	20	Interfaces lithologiques	Forages profonds	Energy and Resource Development (2016)

#### Tableau 2.4 – Données utilisées dans le cadre du projet pour l'obtention des différents résultats.

<sup>1</sup> Paramètres utilisés pour calculer le débit de base de la rivière.

<sup>2</sup> Paramètres utilisés pour évaluer la recharge par bilan combiné avec GWHAT (Gosselin et al., 2017).

<sup>3</sup> Paramètres utilisés pour estimer la recharge distribuée avec HELP (Schroeder et al., 1994).

<sup>4</sup> Paramètres utilisés pour cartographier la vulnérabilité avec l'indice DRASTIC (Aller et al., 1987).

### 2.4 Données compilées par la CGC dans le cadre du projet

La présente étude s'inscrit dans un projet global de la CGC impliquant divers acteurs depuis son lancement en 2015 jusqu'à son terme prévu en 2019. Les études complémentaires portent sur la présence d'hydrocarbures dans le groupe de Mabou (Section 2.4.1), les structures et la géologie du bassin (Section 2.4.2), l'intégrité des unités de couverture au-dessus des réservoirs gaziers (Section 2.4.3), la fracturation (Section 2.4.4) et les propriétés (Section 2.4.5) du roc superficiel sur la région d'étude et finalement la géochimie des eaux souterraines (Section 2.4.6) du territoire.

#### 2.4.1 Étude des hydrocarbures du groupe de Mabou et origine de la matière organique

L'étude de Jiang *et al.* (2016) présente les résultats de géochimie organique d'échantillons de roche prélevés dans les six premiers puits forés sur le site de McCully lors du projet de la CGC. Un seul montrait la présence d'hydrocarbures, même si le groupe de Mabou est intercepté par les six puits. Sur chaque puits, trois échantillons avaient été prélevés pour de futures analyses : 1) juste en dessous de l'interface dépôts meubles/roc, 2) à une profondeur intermédiaire de 30 à 35 m et 3) à 1 m au-dessus du fond du forage situé à 50 m. L'analyse par pyrolyse Rock-Eval des déblais de forage (*cuttings*) a permis d'évaluer la quantité de matière organique (MO), le potentiel pétrolier et la maturité de la partie superficielle des roches du groupe de Mabou.

Selon l'analyse Rock-Eval, le puits PO-06 est celui présentant le plus de matière organique avec un carbone organique total (COT) allant de 0.19 à 0.40 % selon l'échantillon. La matière organique des autres puits (PO-01 à PO-05) est peu préservée. Ces différences peuvent s'expliquer par les lithologies en présence : les puits PO-01 à PO-05 traversent des grès rouges et des mudstones issus d'un environnement de dépôt oxydant tandis que le puits PO-06 recoupe des grès, des siltstones et des mudstones gris à noirs traduisant un environnement de dépôt réducteur plus propice à la conservation de la matière organique (Jiang *et al.,* 2016).

Selon Jiang *et al.* (2016), la faible valeur de TOC et la faible maturité du groupe de Mabou ne permet pas de le considérer comme une unité réservoir ou une roche-mère potentielle. Le mélange d'hydrocarbures à longues chaines ( $C_{19+}$ ) identifié dans le puits PO-06 pourrait avoir été généré par des mudstones riches en matière organique du groupe de Mabou et/ou résulter d'une migration à partir d'horizons de shales plus profonds de la formation d'Albert suivi d'une biodégradation suite à l'accumulation des grès du groupe de Mabou (Jiang *et al.,* 2016). Des travaux sont en cours pour déterminer leur provenance.

## 2.4.2 Structures et géologie du bassin

Afin de produire un modèle géologique 3D du site de McCully de 8 x 13 km, 227 km de lignes sismiques 2D acquises entre 2000 et 2008 et des données 3D couvrant une surface de 150 km<sup>2</sup> ont été traitées (Rivard *et al.*, 2017).

L'interprétation géologique basée sur le retraitement des données sismiques 3D (Figure 2.4) a permis de conclure que l'unité évaporitique du groupe de Windsor est présente partout dans le champ de McCully, mais varie en épaisseur. En dessous du groupe de Windsor, dont la base correspond à la faille de Penobsquis, le groupe de Sussex a une architecture sédimentaire simple contrairement au groupe sous-jacent de Horton. Ce dernier est constitué de plusieurs séquences de dépôts et recoupé par de nombreuses failles qui affectent parfois la base du groupe de Sussex. Selon Rivard *et al.* (2017), une connexion entre les unités réservoirs du groupe de Horton et la surface est peu probable en raison 1) de la protection efficace offerte par l'unité d'évaporites puisque celles-ci sont des roches ductiles et très peu perméables et 2) du fait que les failles subverticales sont pratiquement limitées au groupe de Horton.



Figure 2.4 – Signature sismique du remplissage sédimentaire carbonifère sur le secteur du champ gazier de McCully (les aplats de couleur représentent les séquences de remplissage du groupe de Horton, dans lequel se trouvent les deux unités ciblées par l'industrie), tiré de Rivard *et al.* (2017).

#### 2.4.3 Propriétés géomécaniques du roc profond et intermédiaire

Les travaux de Séjourné (2017) ont permis d'évaluer les propriétés géomécaniques des rochesréservoirs du membre du Frederick Brook et l'intégrité des unités de couverture. Quatre paramètres ont été déterminés par Séjourné (2017) à partir des données de diagraphies pétrophysiques de 26 forages gaziers profonds localisés dans le champ de McCully et dans la région d'Elgin : 1) le module de Young (Figure 2.5), traduisant la rigidité d'un matériau, 2) le coefficient de Poisson (Figure 2.6), caractérisant l'aptitude d'un matériau à se comprimer, 3) l'indice de fragilité (Figure 2.7), obtenu après normalisation et combinaison des deux premiers et 4) le gradient de contrainte principale minimum horizontale (Figure 2.8), déterminé à partir du coefficient de Poisson, de la pression lithostatique et de la pression interstitielle.

Ces deux derniers paramètres sont importants pour l'industrie pétrolière et gazière. En effet, l'indice de fragilité retranscrit le caractère ductile ou cassant d'un matériau et donc sa capacité à propager des fractures (Zoback, 2010). Le gradient de contrainte principal est primordial pour la fracturation hydraulique puisqu'il permet d'estimer la pression nécessaire pour induire et étendre une fracture dans une formation géologique telle qu'un réservoir peu perméable (Eaton, 1969).

D'après Séjourné (2017), la présence de forts contrastes géomécaniques au sein de la zone intermédiaire devrait limiter, voire empêcher, la propagation de fractures induites par la fracturation hydraulique au-delà des membres ciblés par l'industrie gazière. Le groupe de Sussex, très homogène, a un comportement légèrement plus ductile et plus résistant que le groupe de Horton sous-jacent avec la présence d'un intervalle conglomératique à sa base induisant une forte disparité des propriétés géomécaniques. Le contraste est marqué avec le groupe de Windsor sus-jacent dont la base est fragile et résistante. Le reste de l'unité, composé d'une halite homogène, est plus ductile et moins résistant que la base du groupe de Windsor.

Ces observations sont à mettre en lien avec les données sismiques (Section 2.4.2) où les unités des groupes de Sussex et de Windsor apparaissent relativement homogènes et peu propices à la propagation des failles. Selon Séjourné (2017), cette couverture sédimentaire au-dessus du groupe de Horton agit alors comme une « barrière naturelle » à la propagation des fractures vers la surface du fait 1) de la présence de l'unité d'évaporites du groupe de Windsor, 2) de l'épaisseur importante du groupe de Sussex et 3) de forts contrastes géomécaniques au sein même du membre d'Hiram Brook (groupe de Horton). De plus, ces caractéristiques géomécaniques présentent peu de variations entre les régions de McCully et d'Elgin, reflétant une certaine homogénéité et une continuité régionale.



Figure 2.5 – Module de Young selon les unités du bassin, d'après les données de Séjourné (2017).



Figure 2.6 – Coefficient de Poisson selon les unités du bassin, d'après les données de Séjourné (2017).



Figure 2.7 – Indice de fragilité selon les unités du bassin, d'après les données de Séjourné (2017).



Figure 2.8 – Gradient de contrainte principale minimum horizontale selon les unités du bassin, d'après les données de Séjourné (2017).
## 2.4.4 Fracturation du roc superficiel

Ces travaux, menés entre 2016 et 2017, consistaient 1) à décrire le réseau de fractures naturelles affectant les unités du roc affleurant par la visite de 19 sites (Tableau 2.5) et 2) à évaluer leur contrôle sur la circulation de fluides au sein des aquifères superficiels (Ladevèze, 2017b).

Croupo	Nombro d'offlouromonto	Nombre de structures mesurées			
Groupe	Nombre d'ameurements	Fractures	Litages		
Cumberland	3 + lit de rivière	70	4		
Mabou	4	101	13		
Windsor	4	33	7		
Sussex	3	59	10		
Horton	4	274	27		
Total	18 hors lit de rivière	537	61		

Tableau 2.5 – Synthèse des structures mesurées sur affleurements selon les unités géologiques, d'après Ladevèze (2017b).

Il s'avère que la majorité des fractures se concentrent dans les lithologies les plus compétentes, telles que les grès. C'est notamment le cas des groupes de Cumberland et de Mabou au sein desquels les plans de litage favorisent le développement de fractures ; ces dernières sont interconnectées avec de nombreuses fractures verticales. Ces observations suggèrent que l'écoulement à l'intérieur de ces deux groupes se fait principalement via le réseau de fractures au sein des deux bassins versants étudiés. Sur les premiers mètres de ces unités, une décroissance de la densité de fractures avec la profondeur est également constatée. Selon Ladevèze (2017b), ceci s'explique potentiellement par deux phénomènes : 1) une décompression de la roche suite à son exhumation en surface et 2) une ouverture des fractures en lien avec les épisodes successifs de glaciations/déglaciations. Ainsi, les groupes de Cumberland et de Mabou offriraient un bon potentiel aquifère dans lesquelles la zone active d'écoulement serait concentrée en soussurface dans les horizons gréseux très fracturés.

Dans les lits conglomératiques des groupes de Mabou, de Windsor et de Sussex, le réseau de fractures est très peu développé. Ces conglomérats massifs et peu poreux constitueraient alors des horizons peu perméables et donc des « barrières » à l'écoulement (Ladevèze, 2017b).

Quant aux grès du groupe de Horton, la densité de fractures y est très importante. Ces fractures sont toutefois limitées par l'épaisseur des bancs, traduisant alors un potentiel aquifère moindre pour cette unité par rapport aux groupes de Cumberland et de Mabou.

## 2.4.5 Caractéristiques de la fracturation de l'aquifère rocheux

Les diagraphies effectuées dans les 6 premiers puits d'observation forés sont documentées dans Crow *et al.* (2017) (Tableau 2.6). Les objectifs étaient 1) de caractériser les lithologies et le réseau de fractures au sein du roc superficiel et 2) d'estimer de manière quantitative les propriétés géomécaniques des roches de sous-surface.

	Levés lithologiques		Levés mécaniques/structuraux			Levés hydrauliques		
Puits	Gamma naturel	Televiewer optique	Televiewer acoustique Diamétreur	Densité gamma- gamma	Sonique	Flux	Température conductivité du fluide	Vidéo
PO-01	✓	✓	✓		$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	✓
PO-02	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$		$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$
PO-03	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$		$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$
PO-04	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$		$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$
PO-05 <sup>1</sup>							$\checkmark$	$\checkmark$
PO-06	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$		$\checkmark$		$\checkmark$	$\checkmark$
PO-07	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$
PO-08 <sup>2</sup>								$\checkmark$
PO-09	$\checkmark$	0-40m	0-40m	0-40m	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$
PO-10 <sup>3</sup>	0-15m						$\checkmark$	$\checkmark$

Tableau 2.6 – Diagraphies des puits d'observation de la CGC, adapté de Crow et al. (2017).

<sup>1</sup> Puits effondré après les travaux de forage à 16.5 m p/r au sol.

<sup>2</sup> Puits contaminé avec de l'huile hydraulique lors des travaux de forage.

<sup>3</sup> Puits effondré pendant les travaux de diagraphie à 16.0 m p/r au sol.

Crow *et al.* (2017) décrivent brièvement les applications de chaque diagraphie : 1) les levés lithologiques assurent la caractérisation des roches traversées en se basant sur les variations de leurs propriétés physiques et chimiques ; 2) les levés géomécaniques permettent l'analyse des structures interceptées par les puits, d'estimer la densité globale des formations et de calculer leur module d'élasticité et leur coefficient de Poisson et, 3) les levés hydrauliques permettent de mieux comprendre le rôle des fractures sur la circulation des fluides dans l'aquifère.

Les diagraphies se sont concentrées sur les puits localisés dans la région du champ de McCully en raison de problèmes inopinés sur les deux puits (PO-08 et PO-10) situés dans la région d'Elgin pour lesquels seuls des levés hydrauliques ont pu être menés et interprétés (Tableau 2.6).

L'aquifère est représenté en majorité par le groupe de Mabou composé de mudstones, de grès, siltstones et de conglomérats. Les propriétés géomécaniques des roches sont variables d'un puits à l'autre sans qu'aucun horizon marqueur n'ait pu être identifié latéralement entre les puits.

Les propriétés géomécaniques du roc superficiel (10 à 77 m p/r au sol) ont alors été comparées à celles issues des puits gaziers (260 à 770 m p/r au sol) pour les intervalles profonds du groupe de Mabou (Figure 2.9). Bien que le module de Young soit inférieur pour le roc superficiel, les tendances générales observées dans Crow *et al.* (2017) suggèrent une certaine continuité entre la zone intermédiaire et l'aquifère rocheux.



Figure 2.9 – Comparaison des propriétés géomécaniques du groupe de Mabou, données du roc superficiel issues de Crow *et al.* (2017) et celles du roc profond de Séjourné (2017).

Le débitmètre révèle la présence d'un écoulement vertical dans les 6 puits testés (Tableau 2.7) avec une direction ascendante pour deux des puits localisés sur la rive droite, soit au nord de la rivière Kennebecasis (PO-01 et PO-02), et descendante pour ceux situés en rive gauche (PO-04, PO-07 et PO-09) et donc au sud de la rivière. Seul le puits PO-03 présente une combinaison des deux directions d'écoulement.

Tableau 2.7 – Flux mesuré sans pompage sur les puits d'observation de la CGC sur le secteur de McCully, traduit et modifié de Crow *et al.* (2017).

Puits	Direction du flux	Gamme de flux (L/min)	Distance p/r à la rivière (m)
PO-01	Ascendant	0.09 - 1.82	577
PO-02	Ascendant	0.74 – > 3.78 <sup>1</sup> (estimé à 80 L/min)	97
	Ascendant (18.75 à 31.13 p/r sol)	2.22 – 2.68	815
FO-03	Descendant (31.13 à 47.00 p/r sol)	0.40 - 0.78	815
PO-04	Descendant	0.16 – 0.82	728
PO-07	Descendant	0.53 – > 3.78 <sup>1</sup>	737
PO-09	Descendant	0.08 - 0.33	736

<sup>1</sup> La limite maximale de mesure de la sonde est de 3.78 L/min.

La conductivité électrique de l'eau souterraine des puits avec un flux ascendant est supérieure à 900  $\mu$ S/cm tandis que dans les puits présentant un flux descendant, celle-ci est inférieure à 500  $\mu$ S/cm (Crow *et al.*, 2017). Ceci concorde avec les directions d'écoulement : 1) un flux ascendant amènerait des eaux plus évoluées ayant circulé plus profondément vers la zone d'émergence, 2) tandis qu'un flux descendant refléterait la recharge de la nappe par des eaux plus jeunes et moins chargées.

Sur l'ensemble des puits d'observation investigués sur le site de McCully, 265 litages et 77 fractures ont été identifiés. Les structures ouvertes (65 litages et 18 fractures) persistent jusqu'à la base du puits le plus profond à 80 m p/r au sol, dont environ la moitié (31 litages et 11 fractures) contribuent à l'écoulement (Figure 2.10). Ces structures ouvertes sont distribuées de façon plutôt hétérogène sur le profil, ce qui ne suggère pas de tendance à leur décroissance en profondeur. Cette distribution hétérogène est à opposer aux observations Ladevèze (2017b) sur les affleurements rocheux, indiquant une diminution du nombre de fractures développées dans les plans de litage sur les 50 premiers mètres du roc. Toutefois, ce résultat corrobore les conclusions de Ladevèze (2017b) sur la répartition hétérogène des fractures subverticales le long des forages.





Sur le secteur d'Elgin, l'analyse des diagraphies vidéo indique que le roc est recoupé par de nombreuses fractures participant potentiellement à la circulation de fluides au sein de l'aquifère. Sur le puits PO-10, l'écoulement a été interprété comme descendant (Crow *et al.*, 2017).

## 2.4.6 Géochimie des eaux souterraines

Des campagnes d'échantillonnage d'eau souterraine ont été réalisées tous les quatre mois sur 16 puits, dont 6 puits résidentiels (Tableau 2.8) pour 1) définir l'origine du méthane dissous dans l'aquifère superficiel et 2) déterminer les différents types d'eau et leur âge (Rivard *et al.*, 2017).

Région	Puits	Type d'eau	Tritium (TU)	Datation radiocarbone (âge BP) <sup>1</sup>	TDS (mg/L)
	R01	Ca-HCO₃	3.9	1 708	186
	R02	Ca-HCO₃	3.2	4 403	128
	PO-01	Ca-SO <sub>4</sub>	<0.8	10 482	1 994
	PO-02	Ca-Cl	<0.8	6 478	537
	PO-03	Ca-HCO₃	3.0	3 320	96
McCully	PO-04	Ca-HCO₃	3.1	2 536	245
	PO-05	Mixte-HCO <sub>3</sub>	3.3	Moderne	98
	PO-06	Ca-HCO₃	1.4	7 920	148
	PO-07	Ca-HCO₃	4.1	2 398	241
	PO-09	Ca-HCO₃	1.7	7 908	155
	PO-11	Na-Cl	-	-	282
	R03	Ca-HCO₃	3.0	6 926	131
	R04	Ca-HCO₃	3.1	6 961	222
Elgin	R05	Ca-HCO₃	-	-	160
-	R06	Na-Cl	-	-	213
	PO-10	Na-HCO₃	2.5	9 284	169

Tableau 2.8 – Synthèse des résultats géochimiques préliminaires pour l'eau souterraine sur la datation et les solides totaux dissous (TDS).

<sup>1</sup>Âge <sup>14</sup>C non corrigé.

Dans la région du champ de McCully, seuls trois puits (PO-01, PO-04 et PO-07) contiennent de l'eau souterraine avec du méthane (CH<sub>4</sub>) dissous, à une concentration inférieure à 1 mg/L. Dans la région d'Elgin, quatre des six puits (R03, R04, R05 et R06) contiennent du méthane dissous avec une teneur inférieure à 5 mg/L. La signature isotopique de ces échantillons est ambigüe et fait présentement l'objet d'une analyse spécifique basée sur les coefficients de fractionnement isotopiques.

Selon les analyses, la plupart des puits échantillonnés reflètent la présence d'eaux jeunes de type Ca-HCO<sub>3</sub> et sont en accord avec les résultats de Al *et al.* (2013) (Section 2.1.2).

# **3 DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE**

La région d'étude couvre les bassins versants de la rivière Kennebecasis, sur laquelle des données de jaugeage ont été collectées à la station hydrométrique d'Apohaqui à l'aval de Sussex depuis 1961, et de la rivière Pollett. Le champ gazier de McCully est localisé au centre du premier bassin, tandis que le champ prospectif de condensats d'Elgin est situé au sein du deuxième bassin (Carte 1).

# 3.1 Localisation et physiographie

D'une superficie totale de 1 417 km<sup>2</sup>, la zone d'étude présente une topographie relativement escarpée avec de nombreuses vallées encaissées. La rivière Kennebecasis, orientée est-ouest selon les principales structures du bassin (Section 3.5.1), rejoint le fleuve Saint-Jean à l'amont de la ville éponyme. Le réseau hydrographique du bassin est très développé comme en témoignent ses divers affluents et sous-bassins secondaires (Tableau 3.1).

Bassin	Superficie totale (km²)	Longueur du cours d'eau (km)	Altitude minimale (m/NMM)	Altitude maximale (m/NMM)
Kennebecasis supérieur	339.2	70.0	20 <sup>1</sup>	409 <sup>1</sup>
Ruisseau Smiths	208.2	40.0	30	250
Ruisseau Trout	219.3	29.1	15	360
Rivière Millstream	274.3	38.8	12	230
Kennebecasis inférieur <sup>2</sup>	62.0 <sup>1</sup>	36.1 <sup>1</sup>	8 <sup>1</sup>	360 <sup>1</sup>
Rivière Kennebecasis <sup>3</sup>	1103.0 <sup>1</sup>	106.1 <sup>1</sup>	8 <sup>1</sup>	409 <sup>1</sup>

Tableau 3.1 – Caractéristiques du bassin de la rivière Kennebecasis, données extraites du Kennebecasis Watershed Restoration Committee (2013).

<sup>1</sup> Données extraites avec ARCGIS.

<sup>2</sup> Une partie seulement de ce bassin secondaire est recoupée par le territoire d'étude.

<sup>3</sup>La limite aval correspond à la station hydrométrique d'Apohaqui.

Le bassin de la rivière Pollett (Tableau 3.2) est un sous-bassin de la rivière Petitcodiac. Il a une orientation sud-nord, depuis la source vers l'exutoire à l'amont de la ville de Salisbury.

Tableau 3.2 – Caractéristiques du bassin de la rivière Pollett,	données extraites des ressources
géographiques de la province du Nouveau-Brunswick (GeoNB,	2002, GeoNB, 2014).

Bassin	Superficie	Longueur	Altitude	Altitude
	totale	du cours	minimale	maximale
	(km²)	d'eau (km)	(m/NMM)	(m/NMM)
Rivière Pollett	314.0	66.5	8	409

# 3.2 Démographie, occupation des sols et cultures

Le secteur d'étude constitué des deux bassins versants recoupe trois comtés recouverts en majorité par des forêts et, dans une moindre mesure, par des terres agricoles (Tableau 3.3).

Comté	Chef-lieu	Superficie (km <sup>2</sup> )	Superficie recoupant le secteur d'étude (km <sup>2</sup> )
Albert	Hopewell Cape	1 807.9	254.0
Kings	Hampton	3 484.2	1 097.2
Westmorland	Dorchester	3 666.2	65.2
	Total	8 958.3	1 416.4

Tableau 3.3 – Statistiques spatiales des comtés recoupés par le secteur d'étude, tiré de Statistique Canada (2016b).

## 3.2.1 Statistiques démographiques locales

Les trois comtés recoupant la zone d'étude présentent une population totale de 247 722 habitants pour une densité de 27.7 hab/km<sup>2</sup> (Tableau 3.4). Dans la ville la plus peuplée du secteur, Sussex, à 10 km à l'ouest du champ de McCully, vivent 4 282 habitants au dernier recensement de 2016 pour une aire urbaine de 5 298 habitants (Statistique Canada, 2016b). Sur le bassin de la rivière Pollett, le village d'Elgin constitue le centre de population le plus important avec 892 habitants (Statistique Canada, 2016b) à proximité immédiate des forages gaziers (moins de 5 km).

Tableau 3.4 – Statistiques	démographiques	des	comtés	recoupés	par	le secteur	d'étude,	tiré de
Statistique Canada (2016b)	 I•			-	-			

Comté	Chef-lieu	Population (habitants)	Densité (hab/km <sup>2</sup> )	Superficie (km <sup>2</sup> )
Albert	Hopewell Cape	29 158	16.1	1 807.9
Kings	Hampton	68 941	19.8	3 484.2
Westmorland	Dorchester	149 623	40.8	3 666.2
	Total	247 722	27.7	8 958.3

## 3.2.2 Couverture spatiale des sols et cultures

Selon la couverture du sol (Carte 11), les bassins étudiés sont principalement recouverts de forêts (1 101 km<sup>2</sup> soit 77.7 % du territoire), particulièrement sur les hauts topographiques, et les zones urbaines y sont minoritaires (33 km<sup>2</sup> soit 2.3 % du territoire). Une grande partie des bassins (282 km<sup>2</sup> soit 19.9 % du territoire) est vouée aux activités agricoles (Tableau 3.5 et Figure 3.1), élevages et cultures compris (Carte 16).

Tableau 3.5 – Couverture du sol sur le territoire d'étude couvrant les deux bassins, données et nomenclature issues de la GéoBase (2009) avec une résolution de 30 m.

Entités les plus représentées (> 10 km²)	Surface (km²)	Surface (%)	Entités les moins représentées (< 10 km²)	Surface (km²)	Surface (%)
Coniférien - ouvert	364.43	25.73	Forêt mixte	6.95	0.49
Mixte - dense	321.01	22.66	Forêt de conifères	6.71	0.47
Cultures pérennes et pâturages	207.70	14.66	Zone humide - arbustive	2.69	0.19
Feuillu - ouvert	127.55	9.01	Eau	1.86	0.13
Coniférien - clairsemé	114.93	8.11	Mixte - clairsemé	0.86	0.06
Cultures annuelles	47.89	3.38	Feuillu - clairsemé	0.82	0.06
Petits arbustes	43.08	3.04	Prairies, herbes indigènes	0.40	0.03
Feuillu - dense	40.97	2.89	Zone humide - boisée	0.39	0.03
Mixte - ouvert	37.03	2.61	Zone humide - herbacée	0.30	0.02
Plantes herbacées	25.06	1.77	Arbustes	0.25	0.02
Coniférien - dense	17.69	1.25	Ombre	0.22	0.02
Forêt de feuillus	16.95	1.20	Terres humides	0.07	0.01
Zones développées	16.86	1.19	Stérile/non végétalisé	0.03	0.00
Terrain découvert	13.74	0.97			



Figure 3.1 – Couverture du sol sur le territoire d'étude couvrant les deux bassins, données et nomenclature issues de la GéoBase (2009) avec une résolution de 30 m.

En plus de l'élevage dont les pâturages couvrent 7.84 % du territoire, les cultures de maïs et de petits fruits, tels que les bleuets, sont les plus représentées (Tableau 3.6 et Figure 3.2).

Entités les plus	Surface	Surface	Entités les moins	Surface	Surface
représentées (> 10 km²)	(km²)	(%)	représentées (< 10 km²)	(km²)	(%)
Forêt de conifères	466.25	32.91	Maïs	5.51	0.39
Forêt mixte	305.98	21.60	Petits fruits	2.14	0.15
Forêt de feuillus	249.53	17.61	Orge	1.35	0.10
Arbustaie	177.41	12.52	Eau	1.08	0.08
Pâturage et cultures fourragères	111.04	7.84	Jachère	0.70	0.05
Milieu urbain et bâti	46.26	3.27	Avoine	0.59	0.04
Terres humides	34.49	2.43	Pomme de terre	0.50	0.03
Sols nus et terres stériles	13.34	0.94	Soya	0.29	0.02
			Blé	0.11	0.01
			Prairies	0.07	0.00
			Houblon	0.07	0.00

Tableau 3.6 – Distribution des cultures sur le territoire d'étude couvrant les deux bassins, données et nomenclature issues d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (2010) avec une résolution de 30 m.



Figure 3.2 – Distribution des cultures sur le territoire d'étude couvrant les deux bassins, données et nomenclature issues d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (2010) avec une résolution de 30 m.

Cette vocation agricole est caractéristique des vallées des rivières Kennebecasis et Petitcodiac localisées respectivement au cœur des comtés de Kings et de Westmorland, ces derniers ayant le plus d'exploitations agricoles au Nouveau-Brunswick (Tableau 3.7).

Comté	Superficie agricole moyenne (ha)	Nombre d'exploitations agricoles
Albert	114	93
Kings	133	353
Westmorland	123	291
Total	127	747

Tableau 3.7 – Statistiques agricoles des comtés recoupés par le secteur d'étude, tiré de Statistique Canada (2016a).

# 3.3 Climat

Selon le Gouvernement du Nouveau-Brunswick (2018), la province bénéficie d'un climat relativement doux influencé par la proximité de la baie de Fundy et l'océan Atlantique avec des saisons bien contrastées. D'après la classification de Köppen basée sur les températures et les précipitations (Hufty, 2001), le sud du Nouveau-Brunswick possède un climat de type continental humide avec des étés tempérés (Tableau 3.8).

Tableau 3.8 – Éléments caractéristiques d'un climat continental humide selon la classification de Köppen, tel que celui du sud du Nouveau-Brunswick, tiré de Hufty (2001).

	Code	Туре	Caractéristique
			Température moyenne du mois le plus froid < -3°C
Type de climat	D	Continental	Température moyenne du mois le plus chaud > 10°C
			Hivers et étés bien contrastés
Régime	£		Climat humide avec des précipitations tous les mois de l'année
pluviométrique	I	-	Pas de saison sèche
Variations de	h	Été	Température moyenne du mois le plus chaud < 22°C
températures	b	tempéré	Températures moyennes des 4 mois les plus chauds > 10°C

En se basant sur les relevés combinés des stations météorologiques de Sussex et de Sussex Four Corners, proches de la ville éponyme (Carte 1), la température moyenne annuelle est de 6.3 °C pour un cumul moyen de précipitations de 1 132 mm/an entre 1980 et 2017 (Tableau 3.9 et Figure 3.3). Les mois les plus froids sont ceux de janvier et février. Le cumul moyen de neige atteint 263 mm/an entre les mois de novembre et avril. Les températures annuelles maximales sont enregistrées en juillet et août. La pluviométrie est maximale durant le printemps (mai et juin) et l'automne (septembre et octobre).

Mois	T <sub>min</sub> (°C)	T <sub>moy</sub> (°C)	T <sub>max</sub> (°C)	Pluie (mm)	Neige (mm)	P <sub>tot</sub> (mm)	ET (mm)
Janvier	-13.2	-8.0	-2.6	26.7	75.2	101.9	1.7
Février	-12.0	-6.6	-1.1	22.4	61.2	83.5	2.4
Mars	-6.7	-1.7	3.4	56.9	45.0	101.9	7.3
Avril	-0.4	4.9	10.2	77.9	5.4	83.3	28.6
Mai	4.9	11.0	17.1	91.5	0.0	91.5	70.2
Juin	9.8	15.9	22.0	96.5	0.0	96.5	103.2
Juillet	13.3	19.3	25.3	82.6	0.0	82.6	127.3
Août	12.7	18.8	24.9	71.9	0.0	71.9	114.7
Septembre	8.6	14.6	20.5	95.0	0.0	95.0	76.3
Octobre	3.1	8.4	13.8	104.4	0.6	105.0	39.6
Novembre	-1.7	2.7	7.2	88.9	18.6	107.5	14.1
Décembre	-8.7	-4.1	0.7	55.0	56.6	111.5	3.5
Annuel	0.8	6.3	11.8	869.6	262.6	1 132.3	588.9

Tableau 3.9 – Synthèse des normales climatiques à Sussex entre 1980 et 2017, données issues du Gouvernement du Canada (2018a).



Figure 3.3 – Normales climatiques à Sussex entre 1980 et 2017. Données issues du Gouvernement du Canada (2018a), traitées et visualisées avec le logiciel GWHAT (Gosselin et al., 2017).

# 3.4 Ressources non conventionnelles d'hydrocarbures dans le sud du Nouveau-Brunswick

Le Nouveau-Brunswick présente un certain potentiel en ressources pétrolières et gazières. Le premier forage a été réalisé en 1859 près de Dover au sud de Moncton, sur la rive gauche de la rivière Petitcodiac (Peter, 2000). Ce forage a alors orienté l'exploration de ces ressources vers la formation d'Albert. Sur l'autre rive, le champ de Stoney Creek a ainsi produit du pétrole et du gaz entre 1910 et 1991 (Park, 2014).

La construction du gazoduc de la « Maritimes and Northeast Pipeline » à la fin des années 90 a suscité un intérêt croissant pour l'exploration des ressources gazières au sud du Nouveau-Brunswick. Dans le sous-bassin de Moncton, Corridor Resources Inc. et Potash Corporation of Saskatchewan Inc. ont ainsi conjointement découvert le champ de gaz naturel de McCully près de Sussex en 2000 (Peter, 2000). L'objectif était alors de déterminer 1) le potentiel des unités du groupe de Horton pour l'exploitation gazière et 2) la possibilité de trouver des formations adéquates pour injecter des eaux usées issues des opérations minières dans les unités recoupées par ce forage exploratoire.

Sur le champ de McCully (Carte 1), les unités ciblées par l'industrie sont le grès fin du membre d'Hiram Brook et le shale du membre de Frederick Brook (Section 3.5.1). Afin d'y extraire du gaz, 39 puits verticaux ou inclinés ont été forés entre 2 et 4 km de profondeur (Corridor Corporation Inc., 2016). Depuis 2003, année de mise en production, ces deux unités ont été stimulées par fracturation hydraulique avant la mise en vigueur du moratoire sur la fracturation en juin 2015 (Section 1.1). La production actuelle du site se fait par l'intermédiaire de 32 puits répartis sur 11 sites de forage (Corridor Corporation Inc., 2016). Contrairement au grès fin du membre d'Hiram Brook, le shale a nécessité l'injection d'un volume important de fluide de fracturation lors des opérations de stimulation. Le potentiel exploitable estimé du shale du membre de Frederick Brook est supérieur à 75 Tcf (2.1x10<sup>12</sup> m<sup>3</sup>) à l'échelle de la province (Rivard *et al.*, 2014a) et de l'ordre de 1 Tcf (2.8x10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>) sur les 75 km<sup>2</sup> du champ de McCully (Hinds et Peter, 2006).

Sur le deuxième secteur d'intérêt plus à l'est (Carte 1), dans la région d'Elgin, un premier puits exploratoire avait été foré sans succès par Corridor Resources Inc. en 1999 (Peter, 2000). À partir de 2011, des travaux de forage ont de nouveau été engagés dans la région d'Elgin (Park, 2014). Ces derniers ont révélé le potentiel intéressant du shale du membre de Fredrick Brook pour l'exploitation de condensats, le shale étant moins mature thermiquement que sur le site de McCully (Rivard *et al.*, 2017).

## 3.5 Géologie

À l'est du Canada, le bassin du Paléozoïque tardif des Maritimes forme une succession sédimentaire de près de 148 000 km<sup>2</sup> dont 70 % de sa surface est localisée dans le Golfe du Saint-Laurent et le reste en milieu continental (Peter, 1993, Peter et Johnson, 2009). Le bassin repose sur un socle cristallin d'âge Protérozoïque à Dévonien recoupé par plusieurs structures majeures d'orientation nord-est (Figure 3.4). La plupart de ces failles à rejet horizontal, telles que celles de Belleisle, Caledonia, Clover Hill, Harvey-Hopewell et Kennebecasis, ont contribué à segmenter le bassin des Maritimes en sous-bassins et à isoler les sous-bassins par divers soulèvements du socle, dont ceux du Calédonien et de Westmorland (Peter, 1993, Peter et Johnson, 2009, Waldron *et al.*, 2015). Les sous-bassins de Cocagne, Cumberland, Sackville et Moncton sont les principaux bassins secondaires et leurs successions stratigraphiques présentent une certaine similitude régionale (Peter et Johnson, 2009).



Figure 3.4 – Distribution des sous-bassins, des soulèvements du socle et des principales structures du bassin des Maritimes au sud-est du Nouveau-Brunswick, traduit et modifié de Lamontagne *et al.* (2015) selon la figure de Peter et Johnson (2009) ; la localisation des failles est extraite de Hinds et Peter (2006).

### 3.5.1 Géologie et structures du socle rocheux

Sur la région d'étude (Figure 3.4), deux types d'unités se distinguent : 1) les soulèvements du socle cristallin d'âge Protérozoïque à Dévonien moyen et 2) les bassins sédimentaires d'âge Dévonien inférieur à Carbonifère, dont celui de Moncton. La carte géologique et structurale (Carte 3) a été réalisée à partir des travaux de Barr *et al.* (2005a), Barr *et al.* (2005b), Johnson et Peter (2005) et Peter *et al.* (2005).

La coupe de Hinds (2008) détaille la succession sédimentaire de ce sous-bassin recoupé par plusieurs structures (Figure 3.5) dont les chevauchements de Springdale et Penobsquis. Ce type de failles en compression, situées entre le champ de McCully et la surface, serait généralement bien scellé et imperméable limitant ou empêchant ainsi la migration de fluides vers la surface. Toutefois, les fractures développées dans les zones de dommage associées au mouvement des failles peuvent augmenter la perméabilité de part et d'autre de ces structures (Caine *et al.*, 1996).



Figure 3.5 – Coupe géologique et structurale du sous-bassin de Moncton au droit des zones d'intérêt (champ gazier et gîtes de potasse, traduit et modifié de Hinds (2008) ; localisation de la coupe sur la figure 3.4.

Les roches ignées du complexe cristallin sont peu représentées spatialement (Figure 3.6) et ne présentent pas de réel intérêt dans le cadre de cette étude bien que quelques puits d'alimentation en eau potable y soient forés (Section 3.6.2). Du nord-ouest au sud-est des bassins versants étudiés, ces roches affleurent à plusieurs endroits au niveau des soulèvements de Mascarène, de Jordan Mountain et du Calédonien ainsi qu'au sud de la faille de Clover Hill (Carte 3).

Le sous-bassin de Moncton de 3 700 km<sup>2</sup> (Peter, 1993) présente, quant à lui, un intérêt économique en raison de l'existence 1) de deux réservoirs gaziers dans la formation d'Albert du Tournaisien, en l'occurrence dans le champ de McCully exploité par Corridor Resources Inc. et 2) d'une structure de sel du groupe de Windsor du Viséen dont la potasse a été extraite à partir de la mine souterraine de Potash Corporation of Saskatchewan Inc. jusqu'en novembre 2015 (Wilson, 2005).

Le remplissage sédimentaire du sous-bassin de Moncton s'est fait par l'intermédiaire de six cycles de dépôt entre le Dévonien supérieur et le Carbonifère supérieur. Toutes ces unités affleurent dans les deux bassins versants, mais sur des étendues variables (Figure 3.7 et Carte 3). La succession sédimentaire au cœur de ce sous-bassin est donc divisée en six groupes séparés par des discordances, excepté entre les groupes de Windsor et de Mabou (Figure 3.8). Du plus ancien au plus récent, il y a donc les groupes de Horton, de Sussex, de Windsor, de Mabou, de Cumberland et de Pictou. Les deux derniers ne sont pas présents dans la zone d'étude.

À la base du sous-bassin, les conglomérats de la formation de Memramcook du groupe de Horton reposent en discordance sur le socle cristallin. Cette unité conglomératique est néanmoins absente au droit du champ de McCully (Figure 3.5). Sur la coupe de la figure 3.5, c'est la formation de McQuade, formée de grès, de siltstone et de mudstone (Peter et Johnson, 2009), qui marque la base du bassin sédimentaire.

Au-dessus de ces deux unités, la formation d'Albert, avoisinant les 1 000 m d'épaisseur, est subdivisée en plusieurs membres alternants shale et grès, avant d'atteindre la formation de Bloomfield au sommet du groupe de Horton sur laquelle le groupe de Sussex repose. La puissance du groupe de Horton varie entre 250 et 1 000 m au cœur du champ gazier de McCully (Hinds et Peter, 2006).

Le groupe de Sussex, sus-jacent, est représenté par les unités clastiques suivantes : les formations de Mill Brook et de Dutch Valley, dont l'épaisseur totale varie respectivement entre 10 et 400 m et entre 450 et 900 m selon la position dans le bassin (Hinds et Peter, 2006).



Figure 3.6 – Distribution spatiale des roches sous-affleurantes du socle cristallin et du bassin sédimentaire sur les bassins des rivières Kennebecasis et Pollett.



Figure 3.7 – Distribution spatiale des principaux groupes d'unités sédimentaires sur les bassins des rivières Kennebecasis et Pollett.

Le groupe de Sussex est recouvert par cinq unités carbonatées du groupe de Windsor présentant des faciès variés. La base du groupe de Windsor est formée d'une unité continentale clastique, la formation d'Hillsborough (Hinds et Peter, 2006). Cette dernière est recouverte par les faciès marins des formations de Gays River et Macumber sous-jacentes aux unités évaporitiques des formations d'Upperton, de Cassidy Lake et de Clover Hill (Hinds et Peter, 2006).

Le groupe de Mabou, constituant l'aquifère principal du territoire (Section 3.6), repose sur les formations évaporitiques du groupe de Windsor. La séquence sédimentaire du groupe de Mabou est constituée d'une alternance de conglomérats, de grès et de mudstones comme les descriptions de forages l'indiquent (Annexe IX). Cette unité peut atteindre 600 m au cœur du sous-bassin de Moncton comme le révèlent les forages gaziers profonds et également la coupe de Hinds (2008) utilisée pour la réalisation du modèle numérique (Section 6.2).

Sur le territoire, le groupe sus-jacent de Cumberland est représenté par la formation de Boss Point formée de grès et de conglomérats de 300 m d'épaisseur maximum (Hinds et Peter, 2006).

Finalement, le remplissage du sous-bassin de Moncton se termine par la formation de Salisbury du groupe de Pictou bien que ce dernier ne soit pas présent dans la zone d'étude. Il s'agit d'une alternance de mudstones et siltstones avec quelques interlits mineurs de grès et de charbons.

La caractérisation de la partie supérieure du roc est un élément important afin de comprendre les écoulements au sein de l'aquifère. Les propriétés hydrauliques et le rôle des fractures des unités superficielles ont donc été définis dans le cadre de ce projet (Section 5.3).

# 3.5.2 Unités d'intérêt pour l'industrie

Dans le sous-bassin de Moncton, les formations ciblées par l'industrie gazière appartiennent à la formation d'Albert du groupe de Horton. Il s'agit du grès fin du membre d'Hiram Brook et du shale du membre de Frederick Brook (Figure 3.8). L'industrie exploite de manière non conventionnelle ces deux unités constituant le champ gazier de McCully depuis 2003. La discordance entre les groupes de Horton et de Sussex ainsi que la structure anticlinale (Wilson, 2005) constituent un piège stratigraphique à la migration des fluides à partir des interlits de shales présents au sein des grès sous-jacents peu poreux et peu perméables du membre d'Hiram Brook. Sur l'ensemble des forages de Corridor Resources Inc. (Séjourné, 2017), le membre d'Hiram Brook est rencontré entre 1 100 et 2 500 m de profondeur tandis que le membre de Frederick Brook est localisé entre 1 700 et 3 000 m de profondeur. Sur le champ de McCully en particulier, les puits gaziers atteignent les deux réservoirs à des profondeurs comprises entre 1 900 et 2 000 m (Hinds, 2008).

La deuxième ressource ciblée par l'industrie, cette fois minière, est représentée par la formation de Cassidy Lake du groupe de Windsor (Figure 3.8) d'une épaisseur maximale de 400 m (Hinds et Peter, 2006). Entre 1983 et 2015, de la potasse y a été extraite depuis les mines de Potash Corporation of Saskatchewan Inc. Étant donné que la mine a dû être dénoyée pour être exploitée, la nappe souterraine aurait localement baissé autour de la mine, causant localement des problèmes d'assèchement de puits domestiques (Section 3.6.3).



Figure 3.8 – Colonne stratigraphique de la région d'étude, traduit et modifié de Hinds et Peter (2006).

#### 3.5.3 Géologie des sédiments meubles

La carte des dépôts superficiels (Carte 4) a été réalisée à partir des travaux de Pronk *et al.* (2005a), Pronk *et al.* (2005b), Pronk *et al.* (2005c) et Pronk *et al.* (2005d). Selon Rampton *et al.* (1984) et Brinsmead et Finamore (1977), la surface du bassin des Maritimes au Nouveau-Brunswick est majoritairement occupée par des tills. Les tills indifférenciés couvrent en effet près de 89 % de la région d'étude (Figure 3.9).

Les tills glaciaires ont une matrice allant des argiles au sable avec une forte proportion de matériel grossier (Pronk *et al.*, 2005b, Rivard *et al.*, 2008b) allant jusqu'au bloc (Brinsmead et Finamore, 1977). La nature de la matrice des tills dépend généralement des unités du roc sous-jacentes : les tills sableux sont issus des grès tandis que les tills argileux proviennent des shales (Boisvert, 2004). Les tills de Boss Point, Waterford, Albert, Horton/Cumberland et Hopewell sont les plus représentés sur le territoire (Figure 3.10). Les travaux de Rivard *et al.* (2008b) suggèrent que ces tills ont une épaisseur moyenne de l'ordre de 8 m au Nouveau-Brunswick, bien que celle-ci peut varier localement. Cette couverture de tills joue un rôle essentiel dans la recharge de l'aquifère rocheux sous-jacent constituant la principale ressource en eau de la région (Section 3.6).

Les sédiments non consolidés plus grossiers, tels que les alluvions ou les dépôts fluvio-glaciaires, peuvent être d'excellents aquifères. Leur étendue est toutefois très limitée (Figure 3.9) et ils sont principalement concentrés dans les vallées. Les alluvions, composées de graviers et de graviers sableux avec une faible proportion en particules fines (Brinsmead et Finamore, 1977), sont concentrées dans la vallée de la rivière Kennebecasis. Dans la section amont des rivières, les dépôts fluvio-glaciaires sont grossiers, allant des graviers aux blocs, et s'affinent vers l'aval où ils deviennent sableux et silteux (Rampton *et al.*, 1984). Ces dépôts fluvio-glaciaires alimentent notamment les puits municipaux d'approvisionnement en eau localisés à proximité de Sussex.

Les dépôts de contact glaciaire, les tills d'ablation et les colluvions sont minoritaires sur le territoire (Figure 3.9). Les dépôts de contact glaciaire sont des dépôts grossiers stratifiés composés de sable et de gravier avec toutefois une proportion variable de silt et d'argile (Brinsmead et Finamore, 1977) et parfois la présence de blocs (Rampton *et al.*, 1984). Les tills d'ablation sont généralement moins compacts que les tills dont ils sont issus et sont principalement constitués de silt et d'argile (Pronk *et al.*, 2005d) avec toutefois une proportion importante d'éléments grossiers selon Rampton *et al.* (1984). Les colluvions sont quant à elles caractérisées par du matériel issu de l'érosion des unités rocheuses ou d'un remaniement des tills en bas de versants (Pronk *et al.*, 2005d, Rampton *et al.*, 1984).



Figure 3.9 – Distribution spatiale des dépôts meubles sur les bassins des rivières Kennebecasis et Pollett.



Figure 3.10 – Distribution spatiale des principales unités de tills sur les bassins des rivières Kennebecasis et Pollett.

En complément, des travaux sur l'épaisseur de cette couverture de sédiments meubles ont été effectués durant ce projet (Section 5.2). La granulométrie de ces dépôts a également été considérée (Section 5.1.1) ainsi que leurs propriétés hydrauliques (Section 5.1.3).

## 3.5.4 Unités pédologiques

Hormis l'influence de facteurs anthropiques, plusieurs éléments interviennent dans le processus de formation des sols : le climat, la nature du matériel parent, les conditions de drainage, le relief et le temps durant lesquels ces divers facteurs interviennent dans la pédogénèse (Aalund et Wicklund, 1950). Les conditions climatiques du Nouveau-Brunswick (Section 3.3) favorisent donc le développement d'un sol acide lessivé de type podzol (Figure 3.11) contribuant à l'accumulation de matière organique en surface et au développement des conifères. La classification de Aalund et Wicklund (1950) est basée sur la nature du matériel parent, tills glaciaires ou alluvions, tout en tenant compte des processus de drainage. Aucun sol organique n'est présent sur la région.



Figure 3.11 – Profil de sol type du sud-est du Nouveau-Brunswick, traduit et adapté de Aalund et Wicklund (1950).

Ces unités de sol ont une influence prépondérante dans l'estimation de la recharge spatialement distribuée (Section 5.6.4) avec le modèle d'infiltration HELP (Schroeder *et al.*, 1994). Les propriétés des sols interviennent en effet dans le calcul du coefficient de ruissellement avec la méthode du numéro de courbe (Monfet, 1979), méthode notamment basée sur la définition des groupes hydrologiques à partir de la granulométrie des sols.

La texture du sol se révélant être importante, la carte des sols (Carte 5) qui représente la distribution granulométrique des unités pédologiques compilées par Aalund et Wicklund (1950) à partir de cartes du sol (Provincial Department of Agriculture, 1948a, Provincial Department of Agriculture, 1948b, Provincial Department of Agriculture, 1949) a été utilisée dans la présente étude pour l'estimation de la recharge.

Les sols de texture moyenne, c'est-à-dire au-delà des limons silteux, sont caractéristiques du territoire où ils couvrent près de 89 % de sa surface (Figure 3.12). Les sols fins argileux, tels que les argiles silteuses ou les argiles, recouvrent moins de 11 % du territoire.



Figure 3.12 – Distribution spatiale des classes pédologiques sur les bassins des rivières Kennebecasis et Pollett.

# 3.6 Hydrogéologie régionale

Le roc sédimentaire fracturé constitue l'aquifère régional de la région d'étude. Hormis les informations compilées sur le territoire (Section 2), peu de données sont disponibles sur l'usage de la ressource en eau (origine de l'eau pompée – eau souterraine ou eau de surface, débits des points de prélèvement, durée des pompages, quantité d'eau prélevée annuellement, utilisation de l'eau). Toutefois, au regard du caractère rural des bassins, des apports verticaux importants et de la faible densité de population, la pression exercée sur la ressource en eau n'apparaît pas être un enjeu important sur ce territoire. L'aspect quantitatif semble être secondaire vis-à-vis des inquiétudes locales concernant la qualité des eaux souterraines face aux potentielles pollutions de surface et à l'exploitation des gaz de shale, point sur lequel la présente étude se concentre.

En se basant sur les périmètres de protection associés aux captages régis par les municipalités (GeoNB, 2017), seuls trois sites de prélèvement municipaux sont présents sur les deux bassins, dont celui associé au réseau de Springdale (Section 3.6.3) captant l'aquifère au roc et fournissant un débit de 68 m<sup>3</sup>/h (GEMTEC, 2011). Les deux autres, gérés par les municipalités de Sussex et de Sussex Corner et situés sur ces mêmes municipalités, captent l'eau dans les dépôts fluvio-glaciaires (AMEC, 2016). En raison du contexte rural du territoire, l'accès à l'eau potable se fait par l'intermédiaire de puits résidentiels ou de fermes (Figure 3.13), surtout situés dans les vallées des principales rivières, là où la population se concentre.

## 3.6.1 Caractéristiques de l'aquifère utilisé pour l'approvisionnement en eau potable

Plusieurs éléments ressortent de la base de données des puits (Section 2.2) et permettent d'avoir un aperçu de leurs caractéristiques. Sur l'intégralité de cette base de données, les lithologies traversées lors des travaux de forage sont disponibles pour 1 100 puits et au moins un relevé de niveau de nappe est enregistré pour 1 382 puits. Les constats suivants ont ainsi pu être faits :

1) La majorité des puits domestiques sont forés jusqu'au roc (1 059 puits soit 96.3 %) ;

2) La profondeur médiane de la nappe avoisine les 6.1 m p/r au sol tandis que la profondeur médiane totale des puits résidentiels atteint 38.1 m p/r au sol (Figure 3.14) ;

3) La nappe est généralement peu profonde (entre 0 et 20 m p/r au sol dans 81.1 % des puits en conditions non jaillissantes) et la plupart des puits domestiques (811 soit 76.6 %) ont été forés entre 20 et 60 m p/r au sol (Figure 3.15) ;

4) Des conditions jaillissantes ont été documentées pour 87 puits soit 6.3 % d'entre eux.



Figure 3.13 – Puits résidentiel (R03), se référer à la carte des sites d'échantillonnage (Figure 4.11).



Figure 3.14 – Statistiques sur la profondeur des puits résidentiels et de la nappe pour l'aquifère au roc, informations issues de la base de données provinciale des puits.



Figure 3.15 – Distributions statistiques de la profondeur de la nappe et des puits résidentiels captant l'aquifère au roc, informations issues de la base de données provinciale des puits.

#### 3.6.2 Capacité spécifique des puits domestiques

À partir de la base de données de la province, seuls 245 puits disposent d'informations sur les niveaux de nappe, statique et dynamique, et sur les débits de pompage réalisés pour évaluer leur productivité. Ces trois paramètres permettent d'obtenir une estimation du débit spécifique, soit la quantité d'eau qu'un puits peut fournir par unité de rabattement de nappe (Mace, 2001) :

$$C_s = \frac{Q}{s} = \frac{Q}{W_s - W_d} \tag{1}$$

Оù

capacité spécifique du puits (m<sup>2</sup>/s), Cs :

Q	:	débit de pompage (m <sup>3</sup> /s),
S	:	rabattement de nappe (m),
Ws	:	niveau statique (m/NMM),
Wd	:	niveau dynamique (m/NMM).

L'équation de Cooper-Jacob (Cooper et Jacob, 1946) permet alors de relier la capacité spécifique d'un puits, en d'autres termes son efficacité, à la transmissivité et à la conductivité hydraulique de l'aquifère dans lequel le puits est installé. Ces calculs sont réalisés en considérant le type de roc intercepté (cristallin ou sédimentaire) puisque sur les 245 puits analysés, 25 (soit 10.2 %) recoupent des roches cristallines. Ces statistiques mettent en exergue plusieurs points :

1) La profondeur des puits forés dans le socle cristallin (Figure 3.16) est plus importante (médiane de 38.10 m p/r au sol contre 30.94 m p/r au sol pour ceux forés dans le roc sédimentaire). Ceci ne peut ni s'expliquer par les épaisseurs de dépôts superficiels (Figure 3.17) ni par la profondeur de la nappe (Figure 3.18), les valeurs étant similaires entre les deux types de roches traversées. Cette profondeur de forage est toutefois peu représentative du réel rendement du puits, mais traduit plutôt un « biais » lié à la plus faible conductivité hydraulique et donc au débit requis puisque les foreurs tentent d'atteindre des fractures productrices en forant plus profondément et obtenir au minimum une épaisseur saturée de l'ordre de 27 m (Figures 3.19 et 3.20);

2) La capacité spécifique du socle cristallin (et donc vraisemblablement la transmissivité et la conductivité hydraulique) est quelque peu inférieure à celle du roc sédimentaire (Figure 3.21). Pour le socle, elle se révèle être dans l'ensemble plus étalée selon la profondeur et comprend des valeurs généralement plus faibles que pour le roc sédimentaire (Figure 3.22);

3) La relation montrant que la capacité spécifique diminue avec la profondeur (Figure 3.22) reflète également le « biais » lié au débit et réservoir requis. Cette observation a déjà été constatée sur plusieurs projets de caractérisation (Laurencelle, 2018, Rivard et al., 2008a, Rivard et al., 2012).



Figure 3.16 – Profondeur totale des puits selon le type de roche.



Figure 3.18 – Profondeur de la nappe selon dans les puits le type de roche.

Figure 3.17 - Profondeur de l'interface entre les dépôts meubles et le roc dans les puits selon le type de roche.



Figure 3.19 – Épaisseur totale saturée dans les puits selon le type de roche.

23



Figure 3.20 – Épaisseur de roc saturé dans les puits selon le type de roche.





Figure 3.22 – Relation entre la profondeur totale et la capacité spécifique dans les puits selon le type de roche.

#### 3.6.3 Problématique liée à l'approvisionnement en eau

Afin de prévenir l'ennoyage des galeries de la mine de potasse de Penobsquis (Figure 3.24) situées entre 400 et 700 m de profondeur, des pompages d'eau vers la surface ont été mis en place dès 1998. Ces derniers sont considérés avoir entraîné des problèmes d'accès à l'eau potable. Plusieurs témoignages de résidents de Penobsquis concordent avec l'assèchement de puits en lien avec le dénoyage de la mine souterraine (Figure 3.23).

Deux nouveaux ouvrages de captage ont donc été implantés à Penobsquis (Figure 3.25). Ils desservent par un réseau de canalisations les habitations touchées par le dénoyage de la mine souterraine (Figure 3.26).

Le puits de production principal de 106.7 m de profondeur fournit un débit maximal de 68 m<sup>3</sup>/h selon les essais de pompage coordonnés par GEMTEC (2011). L'aquifère au roc offre localement une transmissivité de 4.9x10<sup>-2</sup> m/s mais reste tout de même limitant pour un coefficient d'emmagasinement de l'ordre de 0.017 %. GEMTEC (2011) recommande un débit de production sécuritaire de 33.7 m<sup>3</sup>/h.



Figure 3.23 – Ancien puits jaillissant.

Malgré l'ouverture récente de la mine de Picadilly (Figure 3.24) en octobre 2012, le site de Penobsquis a définitivement fermé depuis novembre 2015 en raison du faible prix de la potasse sur le marché (CBC News, 2015). Une estimation environnementale a été réalisée par AMEC (2016) afin d'évaluer l'impact de l'arrêt du pompage des saumures avant d'inonder naturellement la mine sur une période de 18 mois (CBC News, 2016a). AMEC (2016) a proposé de suivre le retour à l'équilibre via quatre puits d'observation forés à 300 m p/r au sol et la qualité des eaux souterraines avec plusieurs puits résidentiels (AMEC, 2016). Le site de Picadilly opère au ralenti depuis janvier 2016, car il est coûteux à exploiter en raison de la géologie particulière du gisement (CBC News, 2016b). La ville de Sussex a mandaté une firme afin de confirmer le potentiel géothermique de la mine et la faisabilité d'une potentielle reconversion du site pour la production d'énergie (AMEC, 2018).



(a)

Figure 3.24 – (a) Anciens bâtiments de la mine de Penobsquis et (b) récent développement de la mine de Picadilly, images extraites de CBC News (2015) et CBC News (2016b).

(b)



Figure 3.25 – (a) Puits d'alimentation en eau 1 et station, (b) puits d'alimentation en eau 2 et (c) réservoir d'eau potable du réseau de Springdale, images extraites de Google Street View (2013).



Figure 3.26 – Aménagement du réseau d'eau potable de Springdale après l'assèchement de puits domestiques suite au dénoyage de la mine de Penobsquis, données retranscrites à partir d'informations du Department of Environment (2011).

# 4 ACQUISITION DES DONNÉES

Afin de dresser le portrait de la ressource en eau souterraine de la région d'étude, des données additionnelles ont été acquises (Tableau 4.1) pour compléter celles déjà compilées (Section 2).

			Installati	on de puits d'observation							
Туре	Pério	de	Objectifs		Méthode						
Foregoe			Préciser la	a géologie	Carottes de roche et de						
doctructife	Nov-2	015	du roc et d	des dépôts	sédiments non consolidés						
uestructits			Définir la	granulométrie des dépôts	Déblais de forage						
Foregoe			Caractéris	er le réseau de fractures	Diagraphica						
Forages	Jul-20	)17	et les con	ditions d'écoulement	Diagraphies						
carolles			Définir la	géochimie de la roche	Échantillonnages des déblais						
			Définir la	géochimie	Échaptilloppogoo d'oqu						
Forage			des eaux	souterraines	Echantinonnages d'eau						
carotté	carotté Déc-2017 E			conductivité	Essais de perméabilité						
complémentaire			hydrauliqu	ie du roc	(slug test)						
			Suivre la p	piézométrie de la nappe	Capteur de pression						
Suivi piézométrique											
Туре	Période	Obje	ectifs		Méthode						
Quivi	3 fois/an de	Con	trôler et rele	ever les capteurs	Capteur de pression						
ponctuel	Nov-2015 à	Suiv	re les variat	tions de nappe	Capteur de pression						
Suivi		Latir	mor la roche	argo do l'oquifòro ou roo	Contour de proceion						
Sulvi	Dec-2015 a	ESUI	ner la recha	arge de l'aquillere au roc							
continu	UCI-2017 '	Defi	nir ies condi	itions de confinement de la n	lappe Capteur de pression						
		<u> </u>	ractóricatio	n dos propriátás bydraulia							
Туро			riodo	Objectife	Máthada						
		F	enoue	Définir les propriétés	Essais de perméchilité						
Essais a Cil		Ju	ıl-2016	bydrauliques du rec	(slug tost)						
Tiyuraulique	5			Définir los propriétés	(sing lest)						
Essais d'inf	filtration	Ac	oû-2016	bydrauliques des dépâts	Perméamètre de Guelph						
Crapulamátria dos				Définir los propriétés	Granulamàtra lasor						
Granulometrie des		M	ar-2017	bydrauliques des dépôts	et tamis manuel						
Eccaie do n	norositá at do	h	un 2017	Définir les propriétés							
Losais ue p	JU	Π-2017 Εάν_2018	bydrauliques du roc	de sections de carottes							
permeability		el	100-2010								

Tablaau 4.4 C	unthàng dag travau	v ráaliaáa dana la	aadra du proj	at antra 2015 at 2010
1 abieau 4.1 – 3	viilliese ues liavau.	x realises ualis le	caule uu prop	el entre 2015 el 2016.

Échantillonnage des eaux souterraines											
Туре	Période	Objectif	Méthode								
Échantillonnage des eaux souterraines	3 fois/an de Nov-2015 à Oct-2017¹	Obtenir un portrait de la géochimie des eaux souterraines	Prélèvement par pompe submersible et analyses dans divers laboratoires								

<sup>1</sup> Ces opérations se poursuivent en 2018 et jusqu'au terme du projet global de la CGC prévu en mai 2019.

# 4.1 Installation de puits d'observation

Sur le territoire, 11 puits d'observation ont été implantés sur 8 sites selon trois phases de forage entre 2015 et 2017 (Carte 1, Tableau 4.2 et Figure 4.1).

Duite	Coordon	nées <sup>1</sup>	Type de	Diamètre	mètre Profondeur (m/sol) Base de la Base du tubage Hauteur de la								
Puits	X (m)	Y (m)	forage	(mm)	Forée	Sondée	cimentation (m/sol)	acier (m/sol)	margelle (m/sol)				
PO-01	310 809	5 070 597	Destructif	152	50.29	50.49	3.05	18.29	-1.02				
PO-02	313 894	5 072 381	Destructif	152	50.29	50.73	1.83	24.38	-0.97				
PO-03	316 440	5 073 675	Destructif	152	50.29	50.83	1.83	18.29	-0.97				
PO-04	310 114	5 067 616	Destructif	152	50.29	50.61	4.57	9.14	-0.94				
PO-05	320 807	5 073 136	Destructif	152	50.29	16.30	4.57	9.45	-0.90				
PO-06	314 938	5 070 567	Destructif	152	50.29	50.26	4.57	18.29	-1.02				
PO-07	310 116	5 067 607	Carotté	96	50.29	50.20	2.50	6.15	-0.50				
PO-08	336 141	5 078 231	Carotté	96	39.62	-	2.50	13.72	-0.30				
PO-09	314 942	5 070 569	Carotté	96	80.16	79.92	2.50	18.20	-0.30				
PO-10	340 546	5 076 560	Carotté	96	49.38	16.00	2.50	6.30	0.00				
PO-11	329 599	5 069 990	Carotté	96	131.00	-	1.70	8.64	-0.50				
<sup>1</sup> Projecti	Projection : NAD 1983 UTM Zone 20N.												
Puits	Secteur	Ar	nnée de réal	isation C	Commentair	es							
PO-01	McCully	20	15	F	Puits situé sur le site des forages gaziers suivants : D-66, N-66, D-67, H-76, J-76 et P-76								
PO-02	McCully	20	15	F	uits jaillissar	nt							
	MaQuilla		45	F	uits situé su	r le site des f	forages gaziers suivants	<u>: C-57, E-57, I-67, P</u>	<u>K-57 et P-67</u>				
PO-03	McCully	20	15		uits situe su	r le site des i	forages gaziers suivants	5 : L-38, I-47, J-47, P	-47, C-48 et K-48				
PO-04	McCully	20	15	F	uits localise Puits situé su	r le site du fo	platerorme que le puits prage gaziers suivant : H	PO-07 I-28					
	McCully	20	15	F	uits partielle	ment effondi	ré après les opérations o	le forage					
FO-05	wiccully	20	15	F	Puits situé su	r le site du fo	orage gaziers suivant : C	-75					
PO-06	McCully	20	15	F	Puits localisé Puits situé su	à proximité ( r le site du fo	du puits PO-09 prage gaziers suivant · F	2-56					
PO-07	McCullv	20	16	i	uits localisé	à proximité d	du puits PO-04	-00					
				Puits contaminé par un épanchement d'huile hydraulique lors des opérations de forage et									
PO-08	Elgin	20	16	Ċ	lont le suivi a	i montré que	l'eau ne contenait plus	d'huile ni de BTEX d	ès d'octobre 2017				
				F	Puits situé sur le site des forages gaziers suivants : G-41 et L-41								
PO-09	McCully	20	16	F	Puits localisé	sur la même	e plateforme que le puits	PO-06					
PO-10	Elgin	20	16	F	Parois effond	rées juste av	ant les travaux de diagr	aphie					
PO 11	Site intern	nódiairo 20	17	F			de nuite miniere, entre M	IcCully at Elgin					
P0-11			17	F	uns localise	a proximile (	le puils miniers, entre M	iccuity et Eight					

Tableau 4.2 – Caractéristiques des puits d'observation aménagés dans le cadre du projet entre 2015 et 2017.

En novembre 2015, la première phase consistait à réaliser les 6 premiers forages destructifs directement sur les sites ou plateformes (*pads*) de forages gaziers de Corridor Resources Inc. L'objectif était de vérifier la présence potentielle de méthane dans les eaux souterraines ainsi que d'indices d'hydrocarbures dans les formations traversées.

En juillet 2016, la deuxième phase de forage s'est orientée vers le champ prospectif d'Elgin où deux forages carottés ont été implantés dont un sur l'un des sites de forage de Corridor Resources Inc. En complément, deux autres forages carottés ont été aménagés à proximité des puits d'observation ayant présenté des indices d'huile ou de bitume (PO-06) et de méthane dans les eaux souterraines (PO-04). Ces forages carottés devaient également permettre des analyses 1) pétrophysiques (porosité, perméabilité et densité des grains), 2) géochimiques sur les eaux interstitielles (Barton, 2018) et 3) géochimiques sur la roche.

Enfin, une dernière opération de forage a été programmée après que des travaux de prospection minière aient révélé la présence d'hydrocarbures sur une zone faillée entre les secteurs de McCully et d'Elgin. Un forage complémentaire carotté a alors été réalisé en novembre 2017.







Figure 4.1 – (a) Puits PO-05, (b) plateforme des puits PO-04 et PO-07 et (c) puits PO-09.

# 4.2 Suivi piézométrique

Le suivi des niveaux de nappe est réalisé au moyen de capteurs de pression submergés (*Leveloggers* de *SOLINST*) depuis décembre 2015 pour 3 des 6 premiers puits forés (Tableau 4.3). Ce suivi se poursuivra jusqu'au comblement des puits, prévu en août 2018 à la demande de Corridor Resources Inc. Afin de compenser ces mesures des variations de la pression atmosphérique, des sondes barométriques (*Barologgers*) ont été installées dans les têtes de puits de certains forages (Tableau 4.4). Les mesures dans tous les puits d'observation ont été synchronisées avec des pas de temps compris entre 15 et 30 min ; soit un intervalle assez court pour voir des évènements de recharge rapide tout en évitant de saturer la mémoire des sondes.

Tabloda Ho Oynthood da califi a long tonno doo parto a cocon atton ontro accontino zono zonno
---

Sonde	Péri	iode		2015						2	016							2017								
Puits	Début	Fin	Nombre de jours	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre
PO-01	02-12-15	11-10-17	679																							
PO-02	08-08-16	11-10-17	429																							
PO-03	02-12-15	11-10-17	679																							
PO-04	02-03-16	11-10-17	588									0.1.1														
PO-05	01-03-16	11-10-17	498									91 jo sans	ours donr	nées												
PO-06	03-12-15	11-10-17	678																							
PO-07	08-08-16	11-10-17	429																							
PO-09	09-08-16	11-10-17	428																							
PO-10	10-08-16	12-10-17	428																							

Tableau 4.4 – Synthèse du suivi à long terme de la pression atmosphérique entre décembre 2015 et octobre 2017.

Baromètre	Péri	iode		2015						20	16							2017								
Puits	Début	Fin	Nombre de jours	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre
PO-03	02-12-15	30-07-16	241																							
PO-05	01-03-16	22-06-17	479																							
PO-04	22-06-17	11-10-17	111																							
PO-10	21-06-17	11-10-17	112																							

Pas de temps :

30 minutes

15 minutes

Les campagnes de relève des capteurs pressiométriques ont permis 1) de collecter les données, 2) de s'assurer de l'enregistrement conforme des niveaux d'eau et 3) de faire un contrôle manuel du niveau de nappe au moyen d'une sonde rubanée (Tableau 4.5).

Relève	Automne 2015	Hiver 2016	Été 2016	Automne 2016	Hiver 2017	Automne 2017
Date	26-Nov	1er-Mar	29-Jul	8-Nov	7-Mar	11-Oct
	au 3 Dec	au 2-Mar	au 10-Aou	au 10-Nov	au 9-Mar	
Puits		Nive	eau d'eau par ra	pport au sol (m	/TN)	
PO-01	0.74 <sup>1</sup>	0.50	1.40 <sup>1</sup>	1.40	0.84	1.63
PO-02	-5.20	-	-3.01	-1.95	-	-
PO-03	4.63 <sup>1</sup>	2.49	6.85 <sup>1</sup>	8.65	4.46 <sup>1</sup>	-
PO-04	2.07 <sup>1</sup>	1.57	2.77 <sup>1</sup>	3.22	2.36	3.25
PO-05	6.89 <sup>1</sup>	5.15	8.08 <sup>1</sup>	8.93	5.36	-
PO-06	24.98 <sup>1</sup>	23.73	26.10 <sup>1</sup>	26.63	25.46	26.72
PO-07	-	-	2.56 <sup>1</sup>	3.02	2.09	2.98
PO-09	-	-	26.07 <sup>1</sup>	26.60	25.43	26.70
PO-10	-	-	5.44 <sup>1</sup>	4.87	-	-

Tableau 4.5 – Synthèse des relevés manuels de niveau de nappe effectués dans le cadre du projet entre novembre 2015 et octobre 2017.

<sup>1</sup>Moyenne calculée sur plusieurs relevés.

Les objectifs de ces installations étaient : 1) d'enregistrer les fluctuations saisonnières de la nappe (Section 5.3.4), 2) de déterminer le degré de confinement de la nappe (Sections 5.4.2 et 5.4.3) et 3) d'estimer le taux de recharge annuelle de l'aquifère rocheux à l'aide des hydrogrammes de puits (Section 5.6.5).

Le niveau de nappe par rapport au sol est alors mesuré de la façon suivante (Figure 4.2) :

$$Z_{nappe} = Z_{sonde} + h_{eau} = Z_{sonde} + (h_{tot} - h_{air})$$
(2)

où $Z_{nappe}$ : profondeur de la nappe (m/sol), $Z_{sonde}$ : profondeur de la sonde (m/sol), $h_{eau}$ : pression de la colonne d'eau (m), $h_{tot}$ : pression totale (air + eau) (m), $h_{air}$ : pression atmosphérique (m).

Ce suivi sur le long terme permet de produire des hydrogrammes afin de remplir les objectifs 2 et 3 (Figures I.13 à I.21).



Figure 4.2 – Configuration type de suivi piézométrique dans un puits.

# 4.3 Caractérisation des propriétés hydrauliques et de la granulométrie

Dans toute étude de caractérisation hydrogéologique, l'estimation des propriétés hydrauliques se révèle être indispensable. Dans le cadre de cette étude, les propriétés considérées sont 1) la conductivité hydraulique in situ du roc et des dépôts superficiels, 2) la granulométrie des dépôts meubles et 3) la porosité et la perméabilité des carottes du massif rocheux.

Dans le cas de l'aquifère rocheux, la conductivité hydraulique agit directement sur l'écoulement et peut se mesurer en effectuant des essais de perméabilité in situ à charge variable appelés « *slug tests* » (Section 4.3.1). Pour les dépôts meubles non saturés, cette propriété influe sur le taux de recharge et la vulnérabilité de l'aquifère rocheux sous-jacent. Dans ce cas, elle se détermine par l'intermédiaire d'essais de perméabilité in situ à charge constante avec un perméamètre de Guelph (Section 4.3.2).

La conductivité hydraulique dans le cas de dépôts grossiers et homogènes peut généralement être estimée à partir de la granulométrie des sédiments superficiels (Section 4.3.3) (Devlin, 2015). Bien que cette relation présente certaines limitations, la distribution granulométrique des dépôts de couverture, et donc indirectement leur conductivité hydraulique, permettent de définir des hydrofaciès à l'échelle des bassins.

Hormis les essais hydrauliques in situ, les analyses de laboratoire réalisées sur certaines sections de carottes permettent entre autres de déterminer la porosité et la perméabilité des différentes lithologies du roc. Dans notre cas, les analyses ont été réalisées au laboratoire du Core Laboratories de Calgary. Un calcul permet ensuite de relier la perméabilité à la conductivité hydraulique (Section 5.3.3). Ces propriétés sont primordiales dans la définition des conditions initiales du modèle d'écoulement.

## 4.3.1 Essais à choc hydraulique (*slug tests*)

Un essai à choc hydraulique consiste à appliquer une variation de charge hydraulique de façon quasi instantanée dans le puits et à mesurer le retour au niveau statique dans le temps (Hyder *et al.*, 1994). Ce type de mesure présente l'avantage d'être plus rapide, moins fastidieux et moins coûteux qu'un essai de pompage longue durée conventionnel de 72 heures. La valeur de conductivité hydraulique obtenue est dite ponctuelle, car représentative des formations locales autour du puits puisque le volume d'eau déplacé est limité (Ladevèze *et al.*, 2016).
La méthode pneumatique utilisée pour induire le changement de niveau d'eau consistait à injecter un volume d'azote sous pression dans un puits scellé pour induire un rabattement du niveau de nappe (Figure 4.3). Après stabilisation du niveau d'eau dans le puits, cette pression était ensuite relâchée subitement afin de mesurer le retour au niveau initial (Hamilton et Li, 2003) au moyen d'un capteur de pression *SOLINST* dont le pas de temps avait été fixé à une seconde.



Figure 4.3 – Principe d'un essai pneumatique avec pour exemple le puits PO-04.

Ces essais n'ont pas pu être appliqués sur les puits PO-02 et PO-08 puisque respectivement jaillissant et contaminé. Ce fut également le cas du puits PO-09 pour lequel la méthode pneumatique s'est avérée non concluante. Sur ce puits, la hauteur de roc fracturé dénoyé sous le tubage est très importante (8 m environ lors des essais) et la mise sous pression n'a pas pu fonctionner. Hormis ces trois cas, trois tests ont été complétés sur les sept autres puits d'observation en juillet 2016 afin d'obtenir une bonne représentativité de la conductivité hydraulique du roc superficiel (Figure 4.4). Un puits complémentaire (ID-39528) localisé à proximité du puits d'observation PO-03 a également été testé à trois reprises.



Figure 4.4 – Installation pour effectuer des essais pneumatiques (*slug tests*) sur les puits (a) PO-01, (b) PO-05 et (c) sur le puits d'alimentation en eau de Corridor Resources Inc. (ID-39528) situé à proximité du puits PO-03.

Ces essais de perméabilité ont été interprétés à l'aide du logiciel AQTESOLV (Duffield, 2007). Deux solutions analytiques ont été utilisées afin de limiter les erreurs dues aux hypothèses de ces méthodes : le modèle de Bouwer et Rice (Bouwer et Rice, 1976) et celui du Kansas Geological Survey (KGS) développé par Hyder *et al.* (1994) (Figure 4.5). Hormis l'effet de stockage non considéré dans le cas du premier modèle, ces deux modèles se basent sur des simplifications communes synthétisées par Ladevèze *et al.* (2016) : 1) un aquifère d'extension latérale infinie, homogène, isotrope et d'épaisseur uniforme, 2) un écoulement horizontal jusqu'au puits, 3) un régime d'écoulement transitoire et 4) une variation instantanée du niveau d'eau au début du test. Ces deux méthodes permettent de considérer la pénétration partielle du puits dans l'aquifère, qu'il soit dans une nappe captive ou non (Ladevèze *et al.*, 2016).



Figure 4.5 – Exemple de résultat pour le puits PO-04 : (a) analyse avec le modèle de Bouwer et Rice et (b) analyse avec le modèle KGS.

Une analyse de sensibilité a été effectuée sur deux paramètres pour lesquels aucune donnée n'était disponible, soit l'anisotropie et l'épaisseur de l'aquifère (Figure 4.6). Leur influence étant négligeable, il a donc été décidé de considérer le milieu comme parfaitement isotrope et de considérer l'intervalle saturé de l'aquifère fracturé intercepté dans nos puits ouverts au roc (variable « b » sur la figure 4.6) comme représentatif de l'épaisseur de l'aquifère. Dans le cas présent, les longues sections ouvertes au roc favorisent la composante horizontale de l'écoulement au détriment de la composante verticale qui est alors non significative.



Figure 4.6 – Analyse de sensibilité du puits PO-01 sur (a) l'anisotropie (b = 100 m, soit la hauteur d'aquifère interceptée dans le puits ouvert au roc) et (b) l'épaisseur de l'aquifère ( $K_v/K_h$  = 1 soit un milieu isotrope).

#### 4.3.2 Essais au perméamètre de Guelph

Les essais au perméamètre de Guelph consistent à mesurer un débit d'infiltration en régime permanent dans un sol non saturé à partir d'un trou cylindrique effectué à l'aide d'une tarière dans lequel une charge d'eau constante est maintenue (Elrick *et al.*, 1989).

Dans les faits, le taux d'infiltration forme progressivement autour du trou vertical un bulbe de saturation qui atteint un état d'équilibre quand le régime permanent est établi (Figure 4.7). La forme de ce bulbe dépend du rayon du puits, de la charge imposée et de la texture du sol (Eijkelkamp Agrisearch Equipment, 2011). La conductivité hydraulique saturée est ensuite calculée à partir de ce flux constant en intégrant un facteur de forme dépendant de la texture du sol (Elrick *et al.*, 1989).

Pour les dépôts de sables grossiers et graveleux représentatifs des tills glaciaires de la région (Section 5.1.1), le paramètre  $\alpha$  utilisé pour déterminer le facteur de forme est égal à 0.36 cm<sup>-1</sup>. Dans un souci de cohérence, une même charge, égale à 10 cm, a été imposée sur tous les sites.



Figure 4.7 – Principe d'un essai au perméamètre de Guelph.

L'objectif était de définir la conductivité hydraulique des dépôts de tills les plus représentatifs du territoire (Carte 4). Sur chaque site, trois mesures ont été effectuées (Figure 4.8) afin de s'affranchir le plus possible des hétérogénéités du sol, telles que les racines, les fissures ou les blocs de roche épars. Finalement, les essais ont concerné six unités de tills représentant 49.20 % du territoire pour un total de 60 mesures réalisées entre 0.22 et 0.80 m de profondeur (Tableau 4.6).



Figure 4.8 – Réalisation des essais au perméamètre de Guelph : (a) PG-12 : trou effectué à l'aide d'une tarière, (b) PG-19 : prise de mesure de niveau d'eau sur le cylindre gradué et (c) PG-20 : déploiement typique sur chaque site de la carte 4.

En complément, une description stratigraphique a été effectuée sur chaque site à partir de critères visuels et des échantillons ont été collectés en vue d'effectuer des analyses granulométriques.

Unité	Superficie de la	Nombre	Nombre	Profondeur du trou (m)	
de tills	zone d'étude (%)	de sites	d'essais par site	Minimum	Maximum
Boss Point	15.79	4	3	0.23	0.60
Waterford	14.21	4	3	0.23	0.65
Broad River	1.56	3	3	0.25	0.59
Hillside	3.95	3	3	0.22	0.50
Brown's Flat	4.12	3	3	0.33	0.80
Horton/Cumberland	9.57	3	3	0.22	0.62
Total	49.20	60 (no	ombre d'essais)	0.22	0.80

Tableau 4.6 – Synthèse des essais au perméamètre de Guelph réalisés dans le cadre du projet en août 2016.

En raison de la présence de nombreux éléments grossiers allant des cailloux aux blocs sur les autres unités de dépôts meubles de la région, il n'a pas été possible de réaliser les trous à la tarière et d'y installer correctement les perméamètres. Un échantillonnage pour analyse granulométrique a donc été privilégié pour les dépôts les plus grossiers, soit les dépôts de contact glaciaire, les alluvions et les dépôts fluvio-glaciaires.

# 4.3.3 Granulométrie des dépôts meubles

L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution de la taille des grains d'un échantillon de sédiments. Elle permet alors d'identifier la nature des dépôts meubles et de les classer en hydrofaciès (Section 5.1.2).

Dans le cadre de cette étude, la répartition des particules pour chaque échantillon a été définie selon le système de classification du département de l'Agriculture des États-Unis (USDA, 2012) dont la nomenclature utilise un triangle des textures tel que défini par Mathieu et Lozet (2011). En raison de la texture grossière des échantillons de dépôts meubles prélevés, cette classification a été combinée à des analyses approfondies de la distribution des sables selon Mathieu et Lozet (2011) et de la proportion en éléments grossiers grâce à une échelle annexe du département de l'Agriculture des États-Unis (USDA, 2017).

En complément, le coefficient d'uniformité ( $C_u$ ) de chaque échantillon a été calculé afin d'estimer si le matériel analysé présentait une granulométrie uniforme ( $C_u < 6$ ) ou étalée ( $C_u > 6$ ). Il s'agit du rapport entre la granulométrie correspondant à 60 % du passant cumulé ( $d_{60}$ ) et celle correspondant à 10 % du passant cumulé ( $d_{10}$ ) (Todd et Mays, 2004) :

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \tag{3}$$

où C<sub>u</sub>

 $d_{60}$ 

**d**<sub>10</sub>

coefficient d'uniformité,
granulométrie correspondant à 60 % du passant cumulé,
granulométrie correspondant à 10 % du passant cumulé.

Deux méthodes d'analyse granulométrique ont été utilisées au laboratoire de l'INRS : 1) un tamisage manuel pour la fraction grossière et au besoin, 2) une granulométrie laser pour la fraction la plus fine correspondant aux particules dont le diamètre est inférieur à 0.125 mm.

Les 36 échantillons analysés proviennent de quatre modes de prélèvement : 1) la cuillère fendue lors des opérations de forages carottés, 2) les déblais de forages destructifs, 3) la tarière manuelle sur les sites d'essai de perméabilité et 4) le prélèvement manuel à la pelle pour les dépôts les plus grossiers (Figure 4.9 et Tableau 4.7).



Figure 4.9 – Prélèvements d'échantillons de dépôts meubles sur le terrain (a) à partir d'une carotte réalisée avec une tarière manuelle sur le site PG-01 (tills de Broad River) et par l'intermédiaire de prélèvements de sol pour les dépôts les plus grossiers tels que sur les sites (b) PR-13 (dépôts fluvio-glaciaires) et (c) PR-23 (dépôts de contact glaciaire).

Mode de Data		Nombre d'échantillons		Profondeur des prélèvements (m/sol)		Dánôt moublo caractórisó	Site de prélèvement	
prélèvement	Date	Prélevés	Analysés	Min	Max	Depot meuble caracterise	one de preievement	
Cuillère fendue	Jul-2016	6	6	2.22	11.89	Tills (1) Dépôts de contact glaciaire (5)	Forages carottés : PO-07, PO-09 et PO-10	
Déblai de forage	Nov-2015	7	7	27.40	13.72	Alluvions (4) Dépôts de contact glaciaire (3)	Forages destructifs : PO-01, PO-02 et PO-06	
Tarière manuelle	Aoû-2016	20	20	0.25	0.65	Tills (20)	Sites des essais au perméamètre de Guelph : PG-01 à PG-21	
Prélèvement manuel	Aoû-2016	6	3	-	-	Dépôts de contact glaciaire (1) Dépôts fluvio-glaciaires (1) Alluvions (1)	Sites pour les dépôts les plus grossiers : PR-13, PR-22 et PR-23	

Tableau 4.7 – Synthèse des échantillons prélevés sur le terrain dans le cadre du projet entre novembre 2015 et août 2016.

Tableau 4.8 – Synthèse des études sur le potentiel granulaire du territoire, données extraites de Brinsmead et Finamore (1977), Brinsmead et Seaman (1987), Seaman et Thibault (1986) et Seaman (1988).

Mode de Doto		Nombre d'échantillons		Profondeur des prélèvements (m/sol)		Dánật mouble caractáricá	liou do prélàvoment	
prélèvement	Date	Prélevés	Analysés	Min	Мах	Depot meuble caracterise		
Tranchée d'exploration	Aoû-1975 à Oct-1975	63	40	0.00	10.36	Dépôts de contact glaciaire (30) Dépôts fluvio-glaciaires (9) Tills d'ablation (1)	Secteurs de Sussex et de Hampstead	
Tranchée d'exploration	Été 1984	14	4	0.00	7.50	Dépôts de contact glaciaire (2) Dépôts fluvio-glaciaires (2)	Secteur de Central Lowland	
Tranchée d'exploration	Sep-1985	59	53	0.50	13.70	Dépôts de contact glaciaire (22) Dépôts fluvio-glaciaires (30) Alluvions (1)	Secteur de Petitcodiac	
Tranchée d'exploration	Été 1985 et Été 1986	43	41	0.50	4.50	Dépôts de contact glaciaire (34) Dépôts fluvio-glaciaires (7)	Secteurs de Waterford et de Salmon River	

Afin d'être représentatives des dépôts à l'échelle des deux bassins versants, des données extraites de documents existants sur le potentiel en granulats du secteur (Brinsmead et Finamore, 1977, Brinsmead et Seaman, 1987, Seaman, 1988, Seaman et Thibault, 1986) ont également été incluses. Ces quatre rapports présentent l'intérêt de se focaliser spécifiquement sur les dépôts fluvio-glaciaires et les dépôts de contact glaciaires de la région (Figure 4.10 et Tableau 4.8).



Figure 4.10 – Localisation des sites d'échantillonnages des dépôts granulaires extraits des publications de Brinsmead et Finamore (1977), Brinsmead et Seaman (1987), Seaman et Thibault (1986) et Seaman (1988).

Au total, 138 analyses par tamisage manuel ont été retranscrites dont 88 concernaient les dépôts de contact glaciaire et 48 les dépôts fluvio-glaciaires (Tableaux II.1 à II.12). Les épaisseurs de sédiments investigués peuvent atteindre 6.7 m pour les dépôts fluvio-glaciaires et les tranchées d'exploration ont même permis de découvrir des dépôts de contact glaciaire sur 13.70 m de hauteur.

Ces données viennent s'ajouter aux analyses granulométriques de la présente étude qui se concentraient essentiellement sur les tills glaciaires puisque représentant 21 des 36 granulométries réalisées (Tableaux II.15 à II.17), étant donné qu'ils représentent la plus grande superficie de la zone d'étude.

#### 4.3.4 Essais de porosité et de perméabilité sur les carottes de forages

Des sections de carottes de forages ont été confiées au laboratoire Core Laboratories de Calgary afin de mesurer la porosité et la perméabilité des formations rocheuses superficielles. La conductivité hydraulique a par la suite été calculée à partir des données de perméabilité (Rushton, 2003) pour de l'eau douce à 10°C :

$$K = k \frac{\rho_e g}{\mu_e} \tag{4}$$

оù

K : conductivité hydraulique (m/s),

k	:	perméabilité intrinsèque du sol (m <sup>2</sup> ),
$ ho_e$	:	masse volumique de l'eau à 10°C (999 kg/m³),
g	:	accélération gravitationnelle (9.81 m/s <sup>2</sup> ),
μ <sub>e</sub>	:	viscosité dynamique de l'eau à 10°C (1.3x10 <sup>-3</sup> Pa.s).

Dans un premier temps, les sections de carotte ont été sélectionnées en se basant sur les variations lithologiques constatées sur les nouveaux forages. Les variations de propriétés enregistrées lors des diagraphies ont également déterminé le choix des sections de carottes pour les puits PO-07 et PO-09 lors de la deuxième phase d'analyse en février 2018 (Tableau 4.9).

	Puits	Échantillon	Profondeur (m/sol)
PO-07 PO-08 PO-08		PO-07-13	13.4
	PO-07	PO-07-41	40.5
		PO-07-42	42.4
		PO-08-07	7.0
	PO-08-36	35.7	
		PO-09-23	22.9
 <del></del>		PO-09-37	36.6
ISe	PO-09	PO-09-60	60.0
Pha		PO-09-61	60.7
		PO-10-21	21.0
	PO-10	PO-10-30	29.6
		PO-10-44	43.9

	Puits	Échantillon	Profondeur (m/sol)	
		PO-07-14	14	
		PO-07-16	16	
		PO-07-24	24	
	PO-07	PO-07-27	27	
		PO-07-44	44	
18		PO-07-45	45	
rrier 2(		PO-09-19	19	
		PO-09-43	43	
fé	PO-09	PO-09-55	55	
3		PO-09-56	56	
ase		PO-09-68	68	
Ъ		PO-11-27	27	
		PO-11-58	58	
	DO 11	PO-11-73	73	
	PU-11	PO-11-108	108	
		PO-11-125	125	
		PO-11-131	131	

Tableau 4.9 – Synthèse des sections de carottes sélectionnées pour analyser les	propriétés du roc.
---	--------------------

# 4.4 Échantillonnages et analyses d'eau souterraine

La géochimie des eaux souterraines fait l'objet d'une étude spécifique dans le cadre du projet de la CGC (section 2.4.6). Les analyses comprenaient : 1) de la chimie organique et inorganique élémentaire (ions majeurs et mineurs, éléments traces et alcanes), 2) les isotopes de l'eau et de certains composés dissous tels que le méthane, 3) les gaz dissous (O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Ar, CO<sub>2</sub>) et 4) de la datation (tritium et carbone 14).

Les objectifs sont variés : 1) vérifier la présence d'hydrocarbures dissous dans les eaux souterraines et le cas échéant, déterminer leur origine (thermogénique ou microbienne) et leur provenance (profonde ou superficielle) ; 2) établir les processus en jeu dans la formation des hydrocarbures présents dans les eaux souterraines et 3) définir si la teneur en alcanes dans l'eau souterraine (principalement en méthane) et leurs isotopes présente une variabilité spatiale et temporelle. Ces analyses ont permis, entre autres, de déterminer les types d'eau du territoire (Figure 4.11), ce qui est essentiel dans toute étude de caractérisation hydrogéologique visant à comprendre le système d'écoulement, et de constater que peu de méthane est présent dans les aquifères de la région.



Figure 4.11 – Sites d'échantillonnages et types d'eau souterraine.

Les prélèvements ont été réalisés au moyen d'une pompe submersible de type *Grundfos Redi Flo 2* pour les puits d'observation de la CGC (Figure 4.12). Dans le cas des puits résidentiels, l'échantillonnage a été effectué directement en sortie de robinetterie du réseau domestique avant tout traitement de l'eau. Ces puits domestiques présentent l'intérêt de couvrir un plus large territoire, mais pourraient néanmoins entraîner un biais dans les analyses, lié à une construction inadéquate du puits, une contamination par des sels déglaçant ou les nitrates, une dégradation de la cimentation ou encore une détérioration des canalisations.

S'agissant d'un échantillonnage à faible débit, ce dernier était contrôlé en amont de l'échantillonnage pour vérifier qu'il ne dépasse pas 0.5 L/min, afin de s'assurer qu'il n'entraîne pas de rabattement trop important dans le puits en question pouvant alors engendrer d'éventuels dégazages et que seuls les horizons fracturés, ciblés suite aux diagraphies, soient pompés et non pas l'ensemble de l'eau dans le puits. La procédure comprenait notamment le suivi continu des paramètres physico-chimiques principaux à l'aide d'un appareil de mesure *Hanna* : pH, potentiel d'oxydoréduction ou redox, oxygène dissous, conductivité, salinité et température. Avant de procéder à l'échantillonnage, ces paramètres physico-chimiques devaient être stabilisés pendant un minimum de 15 min. Les bouteilles utilisées étaient ensuite disposées dans des glacières assurant le transport et leur entreposage dans un frigo avant leur envoi vers différents laboratoires.





Figure 4.12 – Échantillonnage des eaux souterraines par pompe submersible sur les sites des puits d'observation (a) PO-04 et PO-07 et (b) PO-06 et PO-09.

# 5 CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES

La présente section décrit les méthodes utilisées pour la production des cartes et du modèle numérique qui ont permis la définition des conditions hydrogéologiques des deux bassins versants de la région d'étude. L'interprétation s'appuie sur 1) les données issues des campagnes de terrain (Section 4), 2) des informations extraites de documents existants (Section 2.1), 3) des bases de données et des cartes gouvernementales (Section 2.2), 3) de rapports et de cartes géologiques (Section 2.3), et également sur 5) les travaux scientifiques de la CGC réalisés dans le cadre du projet global (Section 2.4).

# 5.1 Propriétés hydrauliques des dépôts meubles

Définir les propriétés hydrauliques des dépôts meubles est primordial puisqu'elles influencent les conditions de confinement de l'aquifère au roc (Section 5.4), le taux de recharge de l'aquifère au roc (Section 5.6) et également le degré de vulnérabilité de la nappe face aux éventuelles contaminations de surface (Section 5.7).

# 5.1.1 Distribution granulométrique des dépôts superficiels

Les analyses granulométriques effectuées sur les dépôts fluvio-glaciaires et les dépôts de contact glaciaire à partir des documents existants ont permis de mettre en exergue les points suivants :

1) Les textures grossières allant des sables grossiers non graveleux aux sables grossiers extrêmement graveleux sont les plus représentées avec 132 échantillons de dépôts granulaires sur 136 soit 97.1 % (Figure 5.1) ;

2) Les dépôts granulaires présentent un étalement relativement important de leur granulométrie traduit par un coefficient d'uniformité généralement supérieur à 6 (Figure 5.2) ;

3) La proportion de graviers est significative puisqu'avoisinant près de deux tiers du matériel des dépôts tandis que la proportion de silt est négligeable, le dernier tiers étant représenté par les sables (Figure 5.3) ;

4) La granulométrie des sables va de moyenne à très grossière, les sables fins et très fins étant peu présents dans ces dépôts (Figure 5.4) ;

5) L'unique échantillon de tills d'ablation analysé est un sable fin très graveleux tandis que le seul dépôt alluvial examiné correspond à un sable grossier extrêmement graveleux (Figure 5.1).



Figure 5.1 – Distribution des textures des dépôts superficiels sur les bassins, d'après les données de Brinsmead et Finamore (1977), Brinsmead et Seaman (1987), Seaman et Thibault (1986) et Seaman (1988).



Figure 5.2 – Coefficient d'uniformité des dépôts granulaires regroupant les dépôts fluvio-glaciaires et les dépôts de contact glaciaire, d'après les données de Brinsmead et Finamore (1977), Brinsmead et Seaman (1987), Seaman et Thibault (1986) et Seaman (1988).



Figure 5.3 – Textures des dépôts granulaires, d'après les données de Brinsmead et Finamore (1977), Brinsmead et Seaman (1987), Seaman et Thibault (1986) et Seaman (1988) ayant étudié le potentiel en granulats.



Figure 5.4 – Distribution granulométrique des sables au sein des dépôts granulaires, d'après les données de Brinsmead et Finamore (1977), Brinsmead et Seaman (1987), Seaman et Thibault (1986) et Seaman (1988) ayant étudié le potentiel en granulats.

Les échantillons de sédiments superficiels prélevés sur le terrain dans le cadre de ce projet concernent essentiellement les tills pour lesquels les analyses granulométriques mettent en évidence les éléments suivants :

1) En différenciant chaque unité de tills, les résultats indiquent une certaine hétérogénéité dans la distribution du matériel grossier à l'échelle des sites de prélèvements (Figure 5.5) ;

2) Toutefois, à l'échelle régionale, les tills sont majoritairement représentés par des sables grossiers plutôt graveleux à très graveleux (Figure 5.6) dont la granulométrie est très étalée (Figure 5.7). Ils peuvent donc être assimilés à une seule unité hydrogéologique dont la matrice est composée de près de deux tiers de sable, le tiers restant étant des graviers (Figure 5.8) ;

3) Cette matrice majoritairement sableuse est caractérisée par peu de particules fines (moins de 4 % de silt et pratiquement pas d'argile) et une grande proportion (de 30 à 44 %) de particules très grossières (graviers) (Figure 5.9).





Quant aux autres dépôts, les analyses granulométriques font ressortir les conclusions suivantes :

1) Les alluvions sont généralement des sables grossiers avec une teneur en graviers variable dont la distribution granulométrique est plutôt uniforme ;

2) Les dépôts de contact glaciaire sont également caractérisés par des sables grossiers avec une teneur en graviers variable, conformément aux résultats précédents issus de la littérature.



Figure 5.6 – Distribution des textures des dépôts superficiels sur les bassins, d'après les échantillonnages de terrain et les déblais de forages.



Figure 5.7 – Coefficient d'uniformité des unités de tills, des dépôts de contact glaciaire et des alluvions, d'après les échantillonnages de terrain et les déblais de forages.



Figure 5.8 – Textures des unités de tills, des dépôts de contact glaciaire et des alluvions, d'après les échantillonnages de terrain et les déblais de forages.



Figure 5.9 – Distribution granulométrique des sables au sein des unités de tills, des dépôts de contact glaciaire et des alluvions, d'après les échantillonnages de terrain et les déblais de forages.

Ces analyses granulométriques (Tableaux II.1 à II.17) font donc ressortir les points suivants :

1) Quel que soit le type de dépôts meubles étudié (tills, dépôts fluvio-glaciaires, dépôts de contact glaciaire, alluvions et tills d'ablation), ceux-ci sont majoritairement caractérisés par des sables grossiers plus ou moins graveleux ;

2) Les tills apparaissent toutefois plus sableux et moins graveleux que les autres dépôts ;

3) À l'échelle locale, les tills présentent une certaine hétérogénéité dans la teneur en sables et en graviers. Toutefois, à l'échelle du territoire, les tills peuvent être regroupés en une seule unité hydrogéologique globale représentée par des sables grossiers généralement graveleux.

### 5.1.2 Classification des dépôts meubles en hydrofaciès

Cette classification permet de simplifier les lithologies quaternaires en les regroupant par hydrofaciès (HF), c'est-à-dire en unités ayant des caractéristiques hydrauliques semblables (Tableau 5.1 et Tableaux II.18 et II.19). La procédure de classification consiste à attribuer dans un premier temps une conductivité hydraulique théorique en se basant sur les cartes des unités quaternaires établies par Pronk *et al.* (2005a), Pronk *et al.* (2005b), Pronk *et al.* (2005c) et Pronk *et al.* (2005d) (Tableaux II.12 et II.13). Ensuite, les résultats de l'analyse granulométrique permettent de vérifier ces regroupements en hydrofaciès (Tableau II.20).

Matériel « type »		Conductivit	é hydrauli	Granulométrie des		
	selon la littérature	K	K Min		Туре	dépôts meubles
HF5	Gravier	Très élevée	3.0x10 <sup>-4</sup>	3.0x10 <sup>-2</sup>	1.0x10 <sup>-4</sup>	Sable grossier très graveleux
HF4	Sable grossier	Élevée	9.0x10 <sup>-7</sup>	6.0x10 <sup>-3</sup>	1.0x10⁻⁵	Sable grossier graveleux
HF3	Sable fin à moyen	Moyenne	2.0x10 <sup>-7</sup>	5.0x10 <sup>-4</sup>	1.0x10 <sup>-6</sup>	Sable fin à moyen
HF2	Silt ou limon	Faible	1.0x10 <sup>-9</sup>	2.0x10 <sup>-5</sup>	1.0x10 <sup>-7</sup>	Silt ou limon
HF1	Argile	Très faible	1.0x10 <sup>-11</sup>	4.7x10 <sup>-9</sup>	1.0x10 <sup>-10</sup>	Argile

Tableau 5.1 – Définition des hydrofaciès et des conductivités hydrauliques.

<sup>1</sup>D'après Domenico et Schwartz (1990).

En se basant sur la carte des dépôts meubles (Carte 4), seuls deux hydrofaciès sont identifiés sur le territoire (Carte 6). Il s'agit des classes d'hydrofaciès ayant les conductivités hydrauliques les plus élevées (HF4 et HF5). Ceci est confirmé par les résultats de l'analyse granulométrique (**Tableau** 5.2) où les tills, considérés comme des sables grossiers graveleux et homogènes à l'échelle régionale, sont regroupés dans l'hydrofaciès 4 qui est dominant dans la région d'étude. Pour les autres dépôts, minoritaires sur le territoire, ils sont rassemblés dans l'hydrofaciès le plus grossier (HF5), généralement retrouvé dans les vallées le long des cours d'eau.

Tableau 5.2 – Définition des hydrofaciès des sédiments de la région d'étude selon la littérature et les travaux de terrain, données de la littérature issues de Pronk et al. (2005c), Rampton et al. (1984) et Seaman (1988).

	Source						
Dépôt	Littároturo	Uudrofooiào final					
	Litterature	Description lithologique	Granulométrie	- Hyurolacies lillai			
Colluvions	HF4	-	-	HF4			
Contact glaciaire	HF5	HF5	HF4	HF5			
Fluvio-glaciaires	HF5	HF5	HF4	HF5			
Tills d'ablation	HF5	-	-	HF5			
Alluvions	HF5	HF5	HF4	HF5			
Tills indifférenciés	HF4	-	-	HF4			
Albert <sup>1</sup>	HF4	-	-	HF4			
Boss Point <sup>1</sup>	HF4	HF3-HF4	HF4	HF4			
Broad River <sup>1</sup>	HF4	HF3-HF4	HF4	HF4			
Brown's Flat <sup>1</sup>	HF4	HF4	HF4	HF4			
Coldbrook <sup>1</sup>	HF4	-	-	HF4			
Cumberland <sup>1</sup>	HF4	-	-	HF4			
Cumberland/Boss Point <sup>1</sup>	HF4	-	-	HF4			
East Scotch Settlement <sup>1</sup>	HF4	-	-	HF4			
Hammondvale <sup>1</sup>	HF4	-	-	HF4			
Hillside <sup>1</sup>	HF4	HF4	HF4	HF4			
Hopewell <sup>1</sup>	HF4	-	-	HF4			
Horton/Cumberland <sup>1</sup>	HF4	HF3-HF4	HF4	HF4			
Jordan Mountain <sup>1</sup>	HF4	-	-	HF4			
Millstream <sup>1</sup>	HF4	-	-	HF4			
Point Wolf <sup>1</sup>	HF4	-	-	HF4			
Salisbury <sup>1</sup>	HF4	-	-	HF4			
Sally Brook <sup>1</sup>	HF4	-	-	HF4			
Urney <sup>1</sup>	HF4	-	-	HF4			
Waterford <sup>1</sup>	HF4	HF3-HF4	HF4	HF4			
Marron à jaunâtre <sup>1</sup>	HF4	-	-	HF4			

<sup>1</sup>Unités de tills.

Cette simplification en classes d'hydrofaciès est utile pour dresser un portrait global des propriétés hydrauliques des dépôts meubles. Elle peut toutefois entraîner une imprécision pouvant être liée 1) à la variabilité des sources de données, 2) aux divers types de données utilisés et 3) aux différentes personnes ayant collectées ces données sur le terrain. Néanmoins, les résultats obtenus à partir des campagnes de terrain récentes appuient ceux issus de la littérature. Ils tendent à confirmer une certaine homogénéité à l'échelle du territoire traduit par une couverture de sédiments superficiels grossiers et donc perméables et l'absence (ou presque) de lithofaciès fin.

#### 5.1.3 Conductivités hydrauliques des dépôts superficiels

Les conductivités hydrauliques obtenues à partir des essais d'infiltration avec les perméamètres de Guelph concernent six unités de tills représentatives du territoire (Figure 5.10). Les résultats révèlent une variabilité locale de ce paramètre d'un à deux ordres de grandeur au sein de chaque unité selon le site testé. Les conductivités hydrauliques obtenues, pour la plupart comprises entre 2.1x10<sup>-6</sup> et 2.4x10<sup>-5</sup> m/s, sont compatibles avec des tills sableux grossiers contenant peu d'argile. La valeur moyenne globale des valeurs médianes de chaque unité est de l'ordre de 8.0x10<sup>-6</sup> m/s.





Ces résultats sont cohérents avec les conclusions déduites de l'analyse granulométrique puisqu'ils confirment le caractère hétérogène des tills à l'échelle locale tout en ayant des propriétés relativement homogènes à l'échelle régionale. En effet, la valeur médiane de conductivité hydraulique de 8.0x10<sup>-6</sup> m/s constitue la valeur typique des tills rencontrés sur le territoire. De plus, ces valeurs de conductivités hydrauliques élevées correspondent bien à l'hydrofaciès (HF4) précédemment défini ; la conductivité hydraulique « typique » de cet hydrofaciès étant de 1.0x10<sup>-5</sup> m/s.

Afin de compléter ces données de conductivité hydraulique et de permettre une plus large spatialisation de l'information, des relations empiriques reliant la granulométrie à la conductivité hydraulique ont été utilisées grâce à la feuille de calcul HydrogeoSieveXL développée par Devlin (2015). Ces relations s'appliquent préférentiellement aux sédiments présentant des granulométries homogènes et des matériaux grossiers, c'est-à-dire pauvres en argile et riches en graviers (Devlin, 2015). Bien que les dépôts caractérisés présentent une distribution granulométrique généralement étalée, ces relations ont quand même été appliquées puisque les dépôts meubles représentatifs du territoire correspondent à des sables grossiers graveleux. Toutefois, aucune corrélation n'a pu être formellement établie entre les résultats des essais de perméabilité et les valeurs issues de ces calculs, ces derniers ayant tendance à surestimer d'un ordre de grandeur les valeurs de conductivité hydraulique mesurées sur le terrain avec les perméamètres de Guelph. En effet, ces relations ne tiennent pas compte de plusieurs facteurs pouvant expliquer cette surestimation : 1) l'effet de compaction du sol, 2) l'arrangement naturel des grains ou encore 3) l'hétérogénéité du milieu (Devlin, 2015). Dans notre cas, l'étalement de la granulométrie a probablement eu pour effet d'augmenter artificiellement les valeurs calculées de conductivité hydraulique.

#### 5.1.4 Synthèse sur les hydrofaciès et les propriétés des dépôts meubles

L'analyse granulométrique de l'ensemble des dépôts meubles et la définition des conductivités hydrauliques des différentes unités de tills ont ainsi permis de définir deux classes d'hydrofaciès caractéristiques du territoire : HF4 et HF5. Les résultats sont résumés au tableau 5.3.

	Types de	Superficie	Conductivité hydraulique (m/s)				Granulométrie
HF	dépôt meuble représentatifs	sur les bassins (%)	К	Min	Мах	Туре	des dépôts meubles
	Contact glaciaire			Théori	guo <sup>1</sup>		
	Fluvio-glaciaires	0.10	Theonque				Sable grossier
пгэ	Tills d'ablation	9.10		2 0v10-4	3 0v10-2	1.0v10-4	très graveleux
	Alluvions		TTES Elevee	3.0810	3.0810-	1.02104	
	Tills indifférenciés	00.82		Mesu	rée²		Sable grossier
1164	Colluvions	30.02	Élevée	2.0x10 <sup>-6</sup>	2.0x10 <sup>-5</sup>	8.0x10 <sup>-6</sup>	graveleux

Tableau 5.3 – Caractéristiques des	hydrofaciès	représentatifs	du territoire.
------------------------------------	-------------	----------------	----------------

<sup>1</sup>Données typiques pour ces unités de dépôts superficiels en l'absence de mesures directes.

<sup>2</sup>Données issues des essais de perméabilité avec les perméamètres de Guelph.

# 5.2 Épaisseur des dépôts meubles

La couverture de sédiments superficiels étant généralement perméable et relativement homogène à l'échelle du territoire, c'est donc l'épaisseur de cette couverture qui contrôle le taux de recharge et qui assure également une protection vis-à-vis d'éventuelles pollutions de surface. Il est donc primordial de définir spatialement cette épaisseur afin de représenter les variations locales d'épaisseur des sédiments meubles sus-jacents à la surface du substratum rocheux et d'identifier les secteurs de roc affleurant.

La procédure mise en œuvre pour réaliser cette carte consistait à 1) collecter les données d'épaisseur de dépôts meubles dans la base de données des puits résidentiels de la province (Section 5.2.1), 2) procéder à un tri des informations tirées de cette base de données (Section 5.2.2), 3) effectuer un traitement statistique sur les puits retenus (Section 5.2.3), 4) interpoler les données d'épaisseur conservées sur une grille régulière (Section 5.2.4), puis 5) valider les paramètres d'interpolation appliqués (Section 5.2.5).

La procédure employée pour développer les cartes d'épaisseur totale des dépôts superficiels (Carte 7) et du toit du roc (Carte 8) est détaillée dans le diagramme décisionnel de la figure 5.11.

# 5.2.1 Source des données d'entrée

Les descriptions stratigraphiques des puits résidentiels répertoriés dans la base de données provinciale représentent la quasi-totalité des données disponibles. Ainsi, 2 210 puits domestiques disposaient d'une description stratigraphique complète alors que seulement 10 puits d'observation ont été forés par la CGC (Tableau 5.4).

#### Tableau 5.4 – Source des données.

Source	Nombre de puits	Proportion (%)
BD provinciale des forages résidentiels	2 210	99.55
Puits de la CGC	10	0.45
Total des données	2 220	100.00



Figure 5.11 – Diagramme décisionnel du processus d'interpolation de l'épaisseur des dépôts meubles.

# 5.2.2 Tri des données d'entrée

La procédure de sélection et de validation des données stratigraphiques visait à écarter les puits de la base de données provinciale ne respectant pas les critères suivants :

- Phase 1 : puits avec une description stratigraphique incohérente ;
- Phase 2 : puits sans données sur les épaisseurs des diverses séquences stratigraphiques ;
- Phase 3 : puits situés en dehors de la carte des dépôts meubles et donc hors du territoire ;
- Phase 4 : puits localisés au droit de dépôts meubles non caractérisés ;
- Phase 5 : puits sans indication de localisation.

Sur les 2 210 puits extraits de la base de données de la province, 1 217 (55,1 %) ont finalement été retenus suite à ce processus de validation écartant donc 993 d'entre eux (Tableau 5.5).

Phase de sélection	Nombre de puits exclus	Nombre de puits conservés
Phase 1	163	2 047
Phase 2	27	2 020
Phase 3	795	1 225
Phase 4	7	1 218
Phase 5	1	1 217

Tableau 5.5 – Synthèse de la procédure de tri et de validation des données d'entrée.

# 5.2.3 Traitement statistique des données retenues

Une étape de traitement statistique est nécessaire afin de valoriser les données d'entrée dont la fiabilité est incertaine. Ce processus, inspiré de Talbot Poulin *et al.* (2013), a été appliqué sur les 1 217 puits conservés suite à la phase de tri préliminaire afin d'exclure les données aberrantes.

- Phase 1 : la moyenne mobile d'épaisseur a été calculée quand trois données ou plus étaient disponibles dans un rayon de 250 m. Quand la différence entre l'épaisseur des dépôts meubles et cette moyenne locale d'épaisseur était supérieure à 5 m, les données étaient rejetées ;
- Phase 2 : l'écart-type mobile d'épaisseur a été calculé quand cinq données ou plus étaient disponibles dans un rayon de 500 m. Quand la différence entre l'épaisseur des dépôts meubles pour un puits donné et cette moyenne locale était supérieure à l'écart-type local, les données du puits étaient alors exclues ;
- Phase 3 : en dernier lieu, une analyse visuelle a permis d'exclure quelques données aberrantes ayant réussi à passer les deux premiers filtres de traitement statistique.

Ce processus en trois phases, basé sur un jugement professionnel, a permis d'exclure 197 données incohérentes et réduire le nombre de données retenues à 1 020 puits (Tableau 5.6).

Phase de traitement	Nombre de puits exclus	Nombre de puits conservés
Phase 1	127	1 090
Phase 2	39	1 051
Phase 3	31	1 020

Tableau 5.6 – Synthèse de la procédure de traitement statistique des données d'entrée.

# 5.2.4 Procédure d'interpolation des données conservées

L'estimation de l'épaisseur des dépôts meubles a été effectuée en deux étapes : 1) l'interpolation par krigeage ordinaire à l'aide de *SGeMS* (Remy, 2004) quand la densité de points était suffisante et 2) dans le cas contraire, l'attribution d'une valeur médiane d'épaisseur, égale à 2.13 m pour les tills, basée sur les données des puits.

Pour l'interpolation, les données utilisées comprenaient au total 1 070 points, dont 1 030 issues de puits résidentiels et d'observation (Tableau 5.7). Des points de forçage ont également été ajoutés en amont de l'interpolation pour les zones sous-échantillonnées. Sur ces points, la valeur médiane d'épaisseur des tills trouvée à partir des puits résidentiels a été appliquée, soit 2.13 m. Toutefois, pour ne pas contraindre l'interpolation, il a été décidé de conserver un faible nombre de points synthétiques (40 au total soit 3.74 % des données d'entrée) (Tableau 5.7).

Tableau 5.7 – Données utilisées	s pour l'interpolation.
---------------------------------	-------------------------

Catégorie	Source	Nombre de données	Proportion (%)
Description stratigraphique	Puits de la BD provinciale	1 020	95.33
(points d'abornation)	Puits de la CGC	10	0.93
(points a observation)	Total des points d'observation	1 030	96.26
Zones sous-échantillonnées	Épaisseur médiane des tills	40	3.74
(points synthétiques)	Total des points synthétiques	40	3.74
	Total des données d'entrée	1 070	100.00

L'interpolation a été effectuée sur une grille régulière correctement ajustée afin d'inclure l'intégralité des données d'entrée (Tableau III.1) ainsi qu'une zone tampon de près de 1 km de distance par rapport aux limites des bassins pour éviter les effets de bordure liés au processus d'interpolation. Un maillage de 70 m par 70 m a été utilisé pour être en accord avec la résolution du MNT et pour être également cohérent avec l'interpolation de la carte piézométrique (Section 5.5). L'analyse géostatistique, effectuée sur *SGeMS* (Remy *et al.*, 2009), consistait à ajuster un modèle analytique sur le semi-variogramme expérimental omnidirectionnel (Figure III.1) avant de procéder à l'interpolation en définissant des paramètres de recherche (Tableau III.2).

### 5.2.5 Optimisation de l'interpolation

Les paramètres d'interpolation utilisés lors du krigeage ordinaire ont été optimisés par validation croisée pour réduire l'erreur quadratique moyenne (MSE) et l'erreur moyenne (ME). Ce processus a été appliqué en interpolant 95 % des données d'entrée puis en comparant les valeurs estimées d'épaisseur avec les valeurs mesurées au puits sur les 5 % de points restants (Figure III.2). Les résultats reflètent une bonne fiabilité de l'interpolation avec des erreurs réduites (Tableau 5.8).

Type d'erreur	Krigeage ordinaire
Erreur moyenne – ME (m)	-0.020
Erreur moyenne absolue – MAE (m)	0.066
Erreur quadratique moyenne – MSE (m <sup>2</sup> )	0.062
Erreur type – RMSE (m)	0.248

Tableau 5.8 – Statistiques issues du processus de validation croisée.

La carte finale obtenue (Carte 7) résulte de la combinaison de deux techniques : 1) l'estimation des épaisseurs par krigeage ordinaire sur la majeure partie des bassins (1 346 km<sup>2</sup> soit 94.99 % du territoire) et 2) l'attribution d'une valeur médiane d'épaisseur de 2.13 m sur une petite fraction de la zone d'étude (71 km<sup>2</sup> soit 5.01 % du territoire) où peu ou pas de données sont disponibles. La carte du toit du roc (Carte 8) a ensuite été obtenue en soustrayant cette épaisseur de dépôts meubles de la topographie issue du MNT (Carte 2).

# 5.2.6 Synthèse

D'après les descriptions stratigraphiques des 1 030 puits validés, l'épaisseur médiane des dépôts meubles avoisine les 2.1 m et atteint un maximum de 18.7 m près de la rivière Millstream (Figure 5.12). Une couche de till est rencontrée dans 82.3 % des descriptions de puits. Les dépôts superficiels présentent généralement une épaisseur n'excédant pas les 4.6 m (valeur équivalente au 3<sup>e</sup> quartile pour les 1 030 valeurs d'épaisseur retrouvées dans les descriptions de puits). Les dépôts de contact glaciaire, principalement localisés dans les vallées des rivières Smith, Millstream et Kennebecasis, arborent des épaisseurs légèrement plus importantes avec une valeur médiane proche de 4.0 m.

À l'échelle des bassins (Carte 7), l'épaisseur moyenne des dépôts meubles est de 2.8 m après interpolation pour un maximum de 17.6 m avec des valeurs généralement comprises entre 2.1 et 3.8 m (respectivement 1<sup>er</sup> et 3<sup>e</sup> quartile calculés sur l'ensemble des mailles des bassins).

Au nord de la rivière Kennebecasis, les dépôts apparaissent en moyenne légèrement plus épais qu'au sud du bassin. C'est également le cas sur le bassin de la rivière Pollett où les dépôts sont plus minces au sud et ont tendance à s'épaissir vers l'aval de la rivière. Sur ces deux bassins, les plus faibles accumulations de dépôts superficiels sont associées aux reliefs des collines Calédoniennes identifiées au sud du territoire (Carte 2).

Localement, le roc affleure lors de changements brusques de relief tandis que les dépôts les plus épais se retrouvent dans les zones de replat telles qu'au cœur de la vallée de la rivière Kennebecasis, notamment sur le secteur de McCully à l'est de Sussex.





Globalement, la topographie du substratum rocheux (Carte 8) reflète la topographie de surface, à l'exception de quelques zones de dépressions comblées de dépôts meubles. Sur les bassins, l'élévation de la surface du roc varie de -2.5 à +409.7 m p/r NMM. En général, les reliefs positifs les plus prononcés correspondent aux roches intrusives, moins marquées par l'érosion. Les contacts abrupts avec les roches sédimentaires, généralement matérialisés par des failles d'orientation WSW-ENE, marquent la transition avec des zones de plus bas-relief. Dans ce bassin sédimentaire, les surcreusements du roc correspondent également aux principaux cours d'eau.

En définitive, l'épaisseur relativement faible des dépôts superficiels et leur perméabilité plutôt élevée sont deux facteurs prépondérants pouvant augmenter la vulnérabilité de la nappe face aux potentielles pollutions de surface (Section 5.7) et favoriser la recharge de l'aquifère rocheux (Section 5.6). Ces deux éléments renforcent également l'idée selon laquelle l'aquifère aurait un caractère libre à l'échelle du territoire d'étude (Section 5.4).

#### 5.3 Propriétés hydrauliques et suivi piézométrique de l'aquifère rocheux

La connaissance des propriétés hydrauliques du roc est importante, car ces dernières permettent de quantifier les écoulements préférentiels de l'eau souterraine dans l'aquifère rocheux. Ces propriétés incluent notamment la conductivité hydraulique déduite d'essais de perméabilité à charge variable (Section 5.3.2). En conditions naturelles, la conductivité hydraulique est principalement influencée par le degré de fracturation du roc ; cette dernière a été étudiée à partir de diagraphies et d'affleurements (Section 5.3.1). En complément, des données de perméabilité et de porosité de matrice du roc superficiel ont été obtenues de carottes de forage à partir d'essais en laboratoires (Section 5.3.3). Finalement, le suivi piézométrique à long terme offre des informations complémentaires sur le comportement de la nappe (Section 5.3.4).

#### 5.3.1 Fracturation du roc

Ladevèze (2017b) a étudié la distribution des fractures dans les unités potentiellement aquifères du roc superficiel (Section2.4.4). Au sein de l'aquifère rocheux régional, majoritairement représenté par les grès et les conglomérats des groupes de Mabou et de Cumberland, la circulation de l'eau souterraine est surtout contrôlée par un réseau de fractures interconnectées. L'interprétation des diagraphies dans une dizaine de puits d'observation par Crow *et al.* (2017) indique que les fractures contrôlant l'écoulement sont distribuées de façon hétérogène dans les 50 à 80 premiers mètres du roc (Section 2.4.5). La figure 2.10 montre tout de même que les fractures transmissives sont plus nombreuses dans les 50 premiers mètres bien qu'un seul puits d'observation n'ait atteint la profondeur de 80 m. Ladevèze (2017b) ajoute que la densité de fractures développées dans les plans de litages des unités gréseuses tendrait à diminuer sur les 50 premiers mètres du roc même si peu d'affleurements sont disponibles sur le territoire.

Cette tendance à la décroissance de la densité de fracturation naturelle selon la profondeur du roc avait déjà été constatée par Rivard *et al.* (2008a) dans le bassin des Maritimes. En contexte sédimentaire similaire, les travaux de Francis et Gale (1988) ont aussi montré que le nombre de fractures ouvertes diminue en profondeur. Au sein du sous-bassin de Moncton, Carr (1964) confirme d'ailleurs que l'écoulement devient négligeable au-delà de 100 m de profondeur, seuil de profondeur également mis en évidence par Rivard *et al.* (2008a). La distribution des fractures ouvertes et leur interconnexion contrôlent les propriétés hydrauliques de l'aquifère. Le réseau de fractures concentre l'écoulement de l'eau souterraine dans la partie sommitale du roc, appelée « zone active d'écoulement ».

85

#### 5.3.2 Conductivités hydrauliques du roc

Les résultats des essais de perméabilité sont considérés représentatifs des propriétés hydrauliques du roc superficiel puisque les puits utilisés atteignent une profondeur maximale de 50 m sous la surface. Selon les sites, la conductivité hydraulique varie de moyenne à très élevée pour des valeurs comprises entre 9.4x10<sup>-7</sup> et 1.5x10<sup>-4</sup> m/s (Tableau 5.9 et Figure 5.14). Ces résultats traduisent la présence de nombreuses fractures transmissives contrôlant l'écoulement dans la partie supérieure du roc, que ce soit dans les secteurs de McCully ou d'Elgin.

Bien que les essais à choc hydraulique reflètent la conductivité hydraulique de l'aquifère rocheux dans un rayon proche du puits testé, les résultats indiquent une certaine homogénéité à l'échelle du territoire autour d'une valeur médiane de 1.8x10<sup>-5</sup> m/s. En effet, les valeurs de conductivité hydraulique calculées varient sur une gamme relativement étroite de deux ordres de grandeur caractéristique d'un roc perméable. Les quelques disparités observées à l'échelle locale traduisent probablement le degré de fracturation du roc superficiel.

	Conductivité hydraulique (m/s)							
Puits	s Essai 1 Essai 2		ai 2	Essai 3		M	Moyenne	
	BR <sup>1</sup>	KGS <sup>2</sup>	BR <sup>1</sup>	KGS <sup>2</sup>	BR <sup>1</sup>	KGS <sup>2</sup>	Globale	K <sup>3</sup>
PO-01	1.1x10⁻⁵	2.7x10 <sup>-5</sup>	1.2x10⁻⁵	2.9x10 <sup>-5</sup>	1.2x10⁻⁵	2.8x10 <sup>-5</sup>	2.0x10 <sup>-5</sup>	Élevée
PO-03	1.2x10 <sup>-4</sup>	1.8x10 <sup>-4</sup>	1.5x10 <sup>-4</sup>	2.1x10 <sup>-4</sup>	1.2x10 <sup>-4</sup>	1.1x10 <sup>-4</sup>	1.5x10 <sup>-4</sup>	Très élevée
PO-04	1.4x10 <sup>-5</sup>	1.6x10 <sup>-5</sup>	1.6x10 <sup>-5</sup>	1.8x10 <sup>-5</sup>	1.4x10⁻⁵	1.5x10⁻⁵	1.6x10⁻⁵	Élevée
PO-05	1.0x10 <sup>-6</sup>	1.5x10 <sup>-6</sup>	Un seul essa		ai exploitab	le	1.2x10⁻ <sup>6</sup>	Moyenne
PO-06	5.4x10 <sup>-5</sup>	5.1x10⁻⁵	5.5x10⁻⁵	5.3x10 <sup>-5</sup>	6.0x10 <sup>-5</sup>	6.0x10 <sup>-5</sup>	5.5x10 <sup>-5</sup>	Très élevée
PO-07	1.3x10 <sup>-5</sup>	1.4x10 <sup>-5</sup>	1.1x10 <sup>-5</sup>	9.2x10 <sup>-6</sup>	8.6x10 <sup>-6</sup>	7.9x10 <sup>-6</sup>	1.1x10 <sup>-5</sup>	Élevée
PO-10	9.1x10 <sup>-7</sup>	6.7x10 <sup>-7</sup>	1.1x10 <sup>-6</sup>	8.7x10 <sup>-7</sup>	1.2x10 <sup>-6</sup>	9.1x10 <sup>-7</sup>	9.4x10 <sup>-7</sup>	Moyenne
ID-39528	5.9x10⁻⁵	8.2x10 <sup>-5</sup>	4.9x10⁻⁵	6.1x10 <sup>-5</sup>	5.2x10⁻⁵	7.5x10⁻⁵	6.3x10 <sup>-5</sup>	Très élevée

Tableau 5.9 – Résultats des essais de perméabilité sur les puits d'observation.

<sup>1</sup>Modèle de Bouwer et Rice (1976) et <sup>2</sup>modèle du Kansas Geological Survey (Hyder et al., 1994) utilisés pour l'interprétation des essais à choc hydraulique.

<sup>2</sup>Conductivité hydraulique

En plus des travaux de Crow *et al.* (2017) et Ladevèze (2017b), ces essais de perméabilité ont mis en évidence plusieurs indices reflétant le fort degré de fracturation du roc superficiel. L'effondrement des parois du puits PO-05, dû au degré important de fracturation du roc, pourrait expliquer la perméabilité moyenne enregistrée lors de l'essai. La présence de nombreuses fractures dans la partie dénoyée du puits PO-09 a empêché la mise sous pression du puits, empêchant la réalisation d'un essai de perméabilité pneumatique.

Quant au puits PO-10, le seul testé sur le site d'Elgin, la valeur de conductivité hydraulique moyenne ne reflète pas le fort degré de fracturation observé dans la partie supérieure du roc à l'origine d'un effondrement. Ceci peut trouver son explication dans la nature de la fracturation du roc sur ce site, les fractures observées dans ce puits n'étant pas forcément toutes ouvertes, elles ne participeraient donc pas ou peu à l'écoulement.

# 5.3.3 Porosité et perméabilité

Les 28 sous-échantillons de carottes (*plugs*) analysés proviennent de cinq puits d'observation ayant des profondeurs allant de 39 à 130 m (Tableaux IV.1 et IV.2). S'agissant de sections non fracturées, les résultats de ces sous-échantillons représentent les propriétés hydrauliques de la matrice poreuse uniquement.

La conductivité hydraulique déduite des analyses de perméabilité est très faible et caractéristique d'unités imperméables (Tableau 5.10). L'écart avec les essais de perméabilité réalisés sur les forages en conditions naturelles est d'environ cinq ordres de grandeur (Section 5.3.2). Au sein de l'aquifère, ce sont donc clairement les fractures qui contribuent majoritairement à l'écoulement.

Les valeurs de porosité totale de la matrice avoisinent les 6 % (Tableau 5.10) soit une valeur de porosité relativement faible pour des grès. C'est d'ailleurs cette valeur de porosité qui a été intégrée dans la simulation de l'âge des eaux souterraines sur le bassin de la rivière Kennebecasis (Section 6.4). Toutefois, la porosité efficace de ces roches, non mesurée durant cette étude, reliée à la fracturation ouverte et interconnectée du roc, devrait avoir des valeurs beaucoup plus élevées et pourrait alors entraîner une forte diminution du temps de résidence de l'eau souterraine à l'échelle des bassins sur le long terme.

	Brofondour	Porosité Densité		Dormáchilitá à l'air	Conductivité	
Données	Protondeur	totale	Solide	Globale	Permeduline di di	hydraulique
	m	%	kg/m³	kg/m³	mD	m/s
Minimum	7	3.0	2 650	2 360	5.4x10 <sup>-3</sup>	3.52x10 <sup>-11</sup>
Maximum	131	11.4	2 780	2 610	1.5x10 <sup>-1</sup>	9.85x10 <sup>-10</sup>
Moyenne	47	6.3	2 711	2 540	2.8x10 <sup>-2</sup>	1.86x10 <sup>-10</sup>

Fableau 5.10 – Synthèse des essai	s de porosité et de perméabilité	sur les carottes de forages.
-----------------------------------	----------------------------------	------------------------------

Aucun lien formel n'a pu être établi entre la perméabilité et la porosité de la matrice. De plus, aucune tendance particulière de distribution statistique n'a pu être mise en évidence, ces deux propriétés étant réparties aléatoirement selon la profondeur.

#### 5.3.4 Variations du niveau de nappe

Le suivi des variations du niveau de nappe présenté ici couvre des périodes allant de 1.2 année à près de 1.9 année selon les puits (Tableau 5.11). Après compensation barométrique, la gamme d'amplitudes enregistrées varie de 1.35 m sur le puits PO-01 à 6.82 m sur le puits PO-03, avec une moyenne d'environ 3.5 m. Ces changements importants de niveaux d'eau dans les puits indiquent très probablement une faible valeur de porosité de drainage (*specific yield*) dans le réseau de fractures combinée à une importante recharge.

Duite	Période d'en	registrement	Nombre de jours	Nombre de jours Niveau d'eau Amplitu		Amplitude
Fuils	Début	Fin	d'enregistrement	Min (m/sol)	Max (m/sol)	maximale (m)
PO-01	2-Déc-2015	11-Oct-2017	679	0.36	1.71	1.35
PO-02	8-Aoû-2016	11-Oct-2017	429	-2.26	-6.58	4.32
PO-03	2-Déc-2015	11-Oct-2017	679	2.08	8.90	6.82
PO-04	2-Mar-2016	11-Oct-2017	588	1.51	3.32	1.81
PO-05	1-Mars-2016	11-Oct-2017	498	3.76	8.98	5.22
PO-06	3-Déc-2015	11-Oct-2017	678	23.06	26.51	3.46
PO-07	8-Aoû-2016	11-Oct-2017	429	1.28	3.06	1.78
PO-09	9-Aoû-2016	11-Oct-2017	428	23.65	26.70	3.05
PO-10	10-Aoû-2016	12-Oct-2017	428	2.31	6.05	3.75

Tableau 5.11 – Compilation du suivi des variations du niveau de nappe à long terme.

En se référant aux hydrogrammes (Figure 5.13), les puits montrent une gamme assez variée de comportements, traduisant des conditions hydrogéologiques spécifiques à chaque site. Les amplitudes les plus importantes sont enregistrées sur les puits PO-03, PO-05, PO-06 et PO-09. Sur ces sites, la période d'étiage correspond à une vidange importante de la nappe qui peut alors atteindre une profondeur assez importante sous la surface. Les puits PO-01, PO-04 et PO-07, proches de la rivière Kennebecasis, montrent une variabilité moins franche, potentiellement limitée par l'élévation de l'exutoire matérialisée par le cours d'eau. Les variations rapides et marquées du niveau de nappe du puits PO-10, suite aux évènements pluvieux, confirment la présence d'une zone très fracturée perméable en lien direct avec la surface ; élément déjà constaté par Crow *et al.* (2017) lors des travaux de diagraphie. Quant au comportement jaillissant du puits PO-02, il s'explique par la combinaison de deux facteurs : 1) une localisation en fond de vallée et 2) un fort gradient vertical dû à la présence de reliefs importants de part et d'autre de cette vallée encaissée.



Figure 5.13 – Hydrogrammes de neuf des puits d'observation construits dans le cadre du projet de la CGC, les données climatiques sont issues de Gouvernement du Canada (2018a).

#### 5.3.5 Synthèse sur les propriétés hydrauliques de l'aquifère rocheux

Les travaux de Crow *et al.* (2017) et de Ladevèze (2017b) combinés à l'analyse des carottes, aux essais de perméabilité et au suivi de nappe ont permis de définir les propriétés de l'aquifère (Tableau 5.12) utilisées lors du développement du modèle numérique (Section 0).

	Caractéristiques
	Fractures principalement développées dans les plans de litage
Fracturation	Décroissance de la densité de fractures selon la profondeur
	Écoulement dans le roc superficiel contrôlé par les fractures ouvertes
	Conductivité hydraulique élevée liée à la densité de fractures (10 <sup>-6</sup> < K < 10 <sup>-4</sup> m/s)
Proprietes	Roc fracturé relativement perméable sur le territoire (K <sub>médiane</sub> ~ 10 <sup>-5</sup> m/s)
nyulauliques	Porosité totale de la matrice faible (porosité de drainage non mesurée)
	Flux vertical important détecté dans les puits (Figure 5.14)
Écoulement	Débit de base des cours d'eau provient de l'aquifère fracturé
	Cours d'eau correspondent aux zones de résurgence du système aquifère

Tableau 5.12 – Principales caractéristiques du système aquifère rocheux.



Figure 5.14 – Présentation des résultats des essais de perméabilité et du débitmètre dans le roc selon quatre classes, les données d'écoulement vertical ont été retranscrites à partir d'informations fournies dans Crow *et al.* (2017).

### 5.4 Conditions de confinement de l'aquifère rocheux

La connaissance des conditions de confinement d'un aquifère est indispensable à la compréhension de l'écoulement des eaux souterraines. Le degré de confinement contrôle notamment le degré de vulnérabilité de l'aquifère face aux éventuelles pollutions de surface et agit sur la distribution des zones de recharge préférentielles sur le territoire.

Le confinement d'un aquifère est contrôlé par la nature et l'épaisseur des unités géologiques susjacentes distinguant ainsi trois types de conditions : libre, semi-captive et captive. Dans le cas d'une nappe libre, ces unités assurent une continuité entre la surface du sol et la zone saturée. La surface de la nappe est alors à pression atmosphérique et l'eau peut percoler verticalement jusqu'à la nappe. Quand la nappe est confinée à des pressions supérieures à celle de l'atmosphère sous des couches peu perméables à imperméables, elle est alors dite captive (Todd et Mays, 2004). Finalement, une nappe semi-captive est définie lorsque des conditions intermédiaires sont remplies.

Afin de définir les conditions de confinement, la plupart des études régionales telles que les PACES au Québec (Carrier *et al.*, 2013, Lefebvre *et al.*, 2015, Talbot Poulin *et al.*, 2013) ne tiennent compte que des épaisseurs et des conductivités hydrauliques des couches sus-jacentes à l'aquifère. Le degré de confinement peut être également complété par l'analyse qualitative des hydrogrammes de puits (Ladevèze *et al.*, 2016, Raynauld, 2014). Toutefois, comme le précise Ladevèze (2017a), ces deux méthodes conventionnelles sont subjectives puisque basées sur des critères propres à chaque territoire et dont l'interprétation dépend fortement de l'utilisateur. Il apparaît donc intéressant d'y associer un troisième outil utilisant uniquement des données piézométriques et barométriques : la fonction de réponse barométrique ou FRB. Cette approche apporte des informations complémentaires importantes pour la définition du confinement de l'aquifère de manière fiable et objective. Ainsi, en utilisant les deux méthodes conventionnelles, le degré de confinement est déduit de manière indirecte tandis que l'approche physique (FRB) permet de l'estimer plus directement.

Dans la présente étude, les conditions de confinement de l'aquifère rocheux ont ainsi été estimées sur chaque puits grâce à la complémentarité de ces trois méthodes : 1) les hydrofaciès des sédiments superficiels (Section 5.4.1), 2) les fluctuations piézométriques de la nappe (Section 5.4.2) et 3) la réponse barométrique des puits (Section 5.4.3).

#### 5.4.1 Analyse basée sur les hydrofaciès

Cette méthode est basée sur la définition des épaisseurs et les lithologies (Rahi et Halihan, 2013) d'après les descriptions de forages (Annexe IX). Les lithologies présentant des propriétés hydrauliques similaires sont regroupées en hydrofaciès tels que définis dans la section 5.1.2. Le principe est de définir un seuil minimal d'épaisseur au-delà duquel une couche peu perméable constituée de dépôts argileux (HF1) va confiner l'aquifère sous-jacent (Tableau 5.13).

L'une des principales limitations de cette approche réside dans la définition relativement arbitraire de ce seuil. Cette méthode ayant tendance à sous-estimer le confinement des aquifères, Ladevèze (2017a) a utilisé les critères définis lors des PACES (Carrier *et al.*, 2013, Lefebvre *et al.*, 2015), mais a également ajouté une analyse réalisée avec des critères plus restrictifs.

Cette méthode présente l'avantage de pouvoir être extrapolée à une échelle régionale si la distribution spatiale des puits est représentative des diverses conditions de confinement d'un territoire donné. Cette extrapolation nécessite néanmoins de disposer d'une description détaillée des dépôts meubles permettant un classement des dépôts superficiels en hydrofaciès sur l'ensemble du territoire visé. Si c'est le cas, les conditions de confinement peuvent être alors assez simplement et rapidement spatialisées sur le territoire.

Tableau 5.13 – Critères de définition des conditions de confinement selon la méthode des hydrofaciès.

Conditions de	Épaisseur seuil pour chaque hydrofaciès			
confinement de la nappe	Littérature <sup>1</sup>	Critères restrictifs <sup>2</sup>		
Captive	HF1 > 5 m	HF1 > 1 m		
Semi-captive	Conditions intermédiaires	Conditions intermédiaires		
Libre	HF1 < 1 m et HF1 + HF2 < 3 m	HF1 < 0.5 m et HF1 + HF2 < 1 m		

<sup>1</sup>D'après les critères des PACES de Montérégie-Est (Carrier et al., 2013) et de Chaudières-Appalaches (Lefebvre et al., 2015).

<sup>2</sup>D'après les critères restrictifs de Ladevèze (2017a).

D'après les descriptions stratigraphiques des logs de forages corrigées des analyses granulométriques, les hydrofaciès perméables (HF3, HF4 et HF5) sont majoritairement rencontrés au-dessus de l'aquifère rocheux (Figure 5.15). Ceci concorde avec la carte de distribution des hydrofaciès sur l'ensemble de la région d'étude (Carte 6). Seuls deux hydrofaciès peu perméables (HF1) sont présents localement dans les puits PO-02 et PO-03 sur une épaisseur atteignant un maximum de 2 m.


# Figure 5.15 – Définition des conditions de confinement sur les puits selon la méthode des hydrofaciès.

Selon les critères communément utilisés dans les études de caractérisation hydrogéologiques régionales, les dépôts meubles généralement perméables présents dans la zone d'étude n'induisent pas de confinement de la nappe (Tableau 5.14). Toutefois, en se basant sur des critères plus restrictifs, les puits PO-02 et PO-03 sont alors classés en conditions captives.

Duite	Conditions de confinement de la nappe selon la méthode des hydrofaciès					
Fuits	Littérature <sup>1</sup>	Critères restrictifs <sup>2</sup>				
PO-01	Libre	Libre				
PO-02	Libre	Captive				
PO-03	Libre	Captive				
PO-04	Libre	Libre				
PO-05	Libre	Libre				
PO-06	Libre	Libre				
PO-07	Libre	Libre				
PO-08	Libre	Libre				
PO-09	Libre	Libre				
PO-10	Libre	Libre				

Tableau 5.14 – Conditions de confinement des puits selon la méthode des hydrofaciès.

<sup>1</sup>D'après les critères des projets du PACES de Montérégie-Est (Carrier et al., 2013) et de Chaudières-Appalaches (Lefebvre et al., 2015).

<sup>2</sup>D'après les critères restrictifs de Ladevèze (2017a).

# 5.4.2 Analyse basée sur les fluctuations piézométriques

Cette méthode repose sur l'analyse des fluctuations piézométriques dans les puits et plus particulièrement sur l'allure de ces variations renseignant alors sur le degré de confinement de la nappe. En effet, le niveau d'eau dans un puits libre est directement relié aux évènements pluvieux induisant une recharge rapide de la nappe (Healy et Cook, 2002). Dans ce cas, l'hydrogramme de ce puits est caractérisé par des battements importants (généralement supérieur à 1 m), des variations saisonnières marquées et une forte corrélation avec les épisodes pluvieux (Tableau 5.15).

À l'inverse, les fluctuations piézométriques d'un puits en condition captive auront tendance à être amorties et peu sensibles aux précipitations. L'hydrogramme d'un tel puits est généralement bruité en raison de la transmission relativement rapide des variations de pression barométrique par l'intermédiaire de la structure solide de la couche confinante (Hussein *et al.*, 2013).

Les critères définis par Ladevèze *et al.* (2016) permettent de minimiser les erreurs d'interprétation liées au caractère subjectif de cette approche. Néanmoins, un certain jugement professionnel est nécessaire face à la grande variabilité des hydrogrammes rencontrés. Le diagnostic est donc subjectif et pourrait induire une certaine ambiguïté dans la définition des conditions de confinement des puits par rapport aux autres méthodes.

Tableau	5.15 -	Critères	de	définition	des	conditions	de	confinement	selon	la	méthode	des
fluctuations piézométriques.												

Conditions de	Définition du degré de confinement selon l'allure des hydrogrammes de puits <sup>1</sup>							
confinement de la nappe	Amplitude annuelle maximale des variations piézométriques > 1 m	Variations saisonnières marquées	Corrélation significative de la piézométrie p/r aux précipitations	Aspect lisse des variations piézométriques				
Captive								
Semi-captive	Situatio							
Libre	"Non" aux 4 critères							

<sup>1</sup>D'après Ladevèze et al. (2016).

Dans le cas présent, les conditions de confinement ont été définies à partir du suivi des niveaux piézométriques sur une année hydrologique et de leur lien avec les précipitations enregistrées à la station météorologique de Sussex Four Corners gérée par le Gouvernement du Canada (2018a) (Figure 5.16). Les critères, basés sur l'allure des courbes, ont permis de distinguer des conditions de nappe semi-captive ou libre pour les neuf puits d'observation étudiés (Figure 5.16). Sur l'ensemble des puits d'observation, les battements de nappe sont bel et bien supérieurs à 1 m sur la période de suivi (Tableau 5.16).



Figure 5.16 – Définition des conditions de confinement sur les puits selon la méthode des fluctuations piézométriques, pour une meilleure visualisation des hydrogrammes, une translation a été effectuée pour certains puits : les puits PO-06 et PO-09 sont à -14 m, PO-03 à +2 m et PO-05 à +3 m p/r au niveau de nappe réel.

Les hydrogrammes des puits PO-03, PO-05, PO-06, PO-09 et PO-10 répondent à l'intégralité des critères définissant un aquifère libre (Tableau 5.16) : 1) des amplitudes importantes généralement supérieures à 3 m, 2) des épisodes de recharge et d'étiage de la nappe plutôt marqués, 3) une réponse rapide suite aux évènements pluvieux et 4) l'absence de bruit de faible amplitude.

Selon ces mêmes critères, les puits PO-01, PO-04 et PO-07 seraient localisés sur des sites en conditions intermédiaires. Toutefois, sur ces puits considérés comme semi-captifs selon cette méthode, les variations de la nappe sont fortement contrôlées et atténuées par la proximité de la rivière Kennebecasis. Ce contrôle de la nappe par le niveau des rivières peut alors induire une surestimation du degré de confinement sur ces sites.

Bien que jaillissant, le puits PO-02 présente un hydrogramme dont l'allure est proche des conditions libres même si le lien avec les précipitations est moins évident. Ce cas spécifique de contrôle topographique sur ce puits jaillissant est détaillé dans la section 5.4.4.

		Définitio	on du degré d	_		
Puits	Amplitude annuelle maximale des variations	piézométriques > 1 m	Variations saisonnières marquées	Corrélation significative de la piézométrie p/r aux précipitations	Aspect lisse des variations piézométriques	Conditions de confinement selon la méthode des fluctuations piézométriques
PO-01	1.23	Oui	Non	Oui	Non	Semi-Captive
PO-02	4.29	Oui	Oui	Non	Oui	Semi-Captive
PO-03	6.38	Oui	Oui	Oui	Oui	Libre
PO-04	1.64	Oui	Non	Oui	Non	Semi-Captive
PO-05	5.17	Oui	Oui	Oui	Oui	Libre
PO-06	2.95	Oui	Oui	Oui	Oui	Libre
PO-07	1.77	Oui	Non	Oui	Non	Semi-Captive
PO-08	Puit	s non inst	rumenté pour	le suivi piézo	métrique	
PO-09	2.94	Oui	Oui	Oui	Oui	Libre
PO-10	3.17	Oui	Oui	Oui	Oui	Libre

Tableau	5.16	_	Conditions	de	confinement	des	puits	selon	la	méthode	des	fluctuations
piézomét	rique	s.										

<sup>1</sup>D'après Ladevèze et al. (2016).

#### 5.4.3 Analyse basée sur la réponse barométrique cumulative

Cet outil, habituellement peu utilisé dans un cadre de caractérisation hydrogéologique régionale, repose sur la relation inverse entre les fluctuations de pression atmosphérique en surface et les variations de niveau de nappe enregistrées dans les puits (Ladevèze, 2017a). L'efficacité barométrique (EB) permet alors de quantifier si un changement instantané de pression est plutôt supporté par l'eau (EB proche de 0) ou par la matrice solide de l'aquifère (EB proche de 1) (Freeze et Cherry, 1979). Afin de représenter le caractère transitoire d'une variation de pression atmosphérique donnée sur le niveau de nappe, la fonction de réponse barométrique (FRB) a alors été définie (Rasmussen et Crawford, 1997).

L'allure des courbes de réponse barométrique présente l'avantage de directement renseigner sur les caractéristiques du système puits-aquifère telles que le degré de confinement et l'effet d'emmagasinement dans le puits. Ces courbes peuvent également fournir des informations sur les propriétés physiques de l'aquifère et identifier des problèmes de scellement du puits (Ladevèze, 2017a). Cette méthode est plus objective que les deux autres puisqu'elle est uniquement basée sur des courbes de données mesurées.

Dans le cas d'un aquifère captif idéal, le niveau d'eau dans le puits va répondre de façon instantanée à un changement de pression barométrique (Figure 5.17.a). Cette modification de la pression est transmise rapidement vers l'aquifère à travers les grains de la couche confinante (Butler *et al.*, 2011, Spane, 2002). Pour un aquifère parfaitement libre (Figure 5.17.b), une variation de pression atmosphérique est transmise vers l'aquifère via la zone non saturée selon un délai relié aux propriétés de la zone vadose et à la profondeur de la nappe (Butler *et al.*, 2011, Rasmussen et Crawford, 1997, Spane, 2002). Quant à l'emmagasinement dans le puits (Figure 5.17.c), il se traduit par un certain retard dans la réponse barométrique suite à une variation de pression en surface (Rasmussen et Crawford, 1997). Dans la pratique, l'allure des courbes de réponse résulte généralement de la combinaison de ces courbes théoriques.





Le principe est de calculer la réponse barométrique cumulative (FRB) pour chaque puits et de la comparer aux modèles théoriques (Figure 5.17). Les fonctions de réponse barométrique sont calculées avec le programme KGS BRF (Bohling *et al.*, 2011) intégré dans le logiciel GWHAT (Gosselin *et al.*, 2017). Le calcul tient compte des variations temporelles des forces de marée déduites du programme TSoft sur chaque site (Van Camp et Vauterin, 2005).

Le délai de réponse (*lag*) et la période de temps utilisés s'avèrent être cruciaux pour obtenir une fonction de réponse barométrique représentative du système puits-aquifère. Le choix de ces paramètres est primordial pour éviter des résultats incohérents tels que 1) des courbes oscillantes, 2) des efficacités barométriques supérieures à 1, ou 3) des réponses barométriques négatives.

Le choix du délai (*lag*) temporel utilisé est rarement justifié, mais généralement court : 24 à 48 heures pour Rasmussen et Crawford (1997), 24 heures pour Butler *et al.* (2011) et 12 heures pour Spane (2002). Plusieurs délais de réponse ont alors été testés avec nos données afin de vérifier l'influence du délai temporel sur l'allure des courbes de réponse (Tableau 5.17). Dans le cas d'un puits supposé en nappe libre dont le niveau d'eau est proche de la surface, les variations de pression barométrique peuvent être transmises rapidement vers l'aquifère. Ce délai de réponse est d'autant plus court que l'aquifère est perméable et que la zone non saturée est peu épaisse et perméable. Il faut donc observer la réponse est instantané.

Tel que souligné par Ladevèze (2017a), la période de l'année sur laquelle l'analyse est réalisée est également un paramètre important pour l'analyse de la réponse barométrique cumulative (Tableau 5.17). En effet, dans le cas d'aquifères libres perméables, les épisodes de recharge influent sur le comportement des courbes de réponse. Il est donc nécessaire de sélectionner une période de récession assez longue afin de réduire l'influence de la recharge.

Délai (jours)	Période	Justification	Dates
1/4	Automne	Période de recharge moyenne	22-Sep-2016 au 21-Déc-2016
1/2	Hiver	Période de gel	21-Déc-2016 au 20-Mar-2017
1	Printemps	Période de recharge élevée	20-Mar-2017 au 21-Jun-2017
3	Été	Période de recharge faible	21-Jun-2017 au 22-Sep-2017
7	Février	Mois avec peu de recharge	01-Fév-2017 au 28-Fév-2017
	Juin	Mois avec recharge importante	01-Jun-2017 au 30-Jun-2017
	Globale	Prise en compte de toutes les données	-
	Récession	Période de récession de la nappe	-

Tableau 5.17 – Tests du délai de réponse et de la période d'extraction des données pour l'obtention d'une fonction de réponse barométrique représentative du système puits-aquifère.



Figure 5.18 – Réponse barométrique cumulative typique d'un puits en condition libre : cas du puits d'observation PO-01.



Figure 5.19 – Réponse barométrique cumulative typique d'un puits en condition captive : cas du puits d'observation PO-02.

Selon la réponse attendue déduite des méthodes de diagnostic conventionnelles et les propriétés de l'aquifère, il a donc été décidé de choisir un délai temporel de 24 heures et de sélectionner des périodes de temps suffisamment longues sans évènement de recharge dans les hydrogrammes de puits. Dans le cas de puits présentant un comportement de type libre (Figure 5.18), une stabilisation rapide (quelques heures) est constatée.

Sur l'ensemble des résultats disponibles (Figures I.22 à I.30), deux types de comportements ont été observés (Tableau 5.18) : 1) un comportement apparemment captif précédé par un effet de stockage pour le puits PO-02 et 2) une réponse libre pour le reste des puits.

Pour le puits PO-01 par exemple (Figure 5.18), la décroissance de l'efficacité barométrique avec le temps est reliée au délai nécessaire au changement de pression pour se propager dans la zone non saturée (Rasmussen et Crawford, 1997). Sur l'ensemble des puits en condition libre, la zone non saturée, généralement perméable, ne semble pas entraîner de retard significatif du signal barométrique. Ce retard est en effet toujours inférieur à 9 heures, quel que soit le puits.

Le comportement captif du puits jaillissant PO-02, localisé en zone d'émergence (Figure 5.19), s'expliquerait par la présence d'une couche d'argile de 1.5 m d'épaisseur, mais pourrait aussi être lié à l'atteinte, en profondeur, d'une charge de pression supérieure au sol. Le léger accroissement constaté à l'amorce de la courbe de réponse pourrait être dû à un effet de stockage dans le puits relié aux caractéristiques de construction du puits, tel que son diamètre de 6 pouces (152 mm).

PO-01Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.90) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.27) après 8 heuresLibrePO-02Effet de stockage quasi négligeable avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.34)CaptivePO-03Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.64) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.34) après 6 heuresLibrePO-04Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.97) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.34) après 6 heuresLibrePO-04Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.97) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.40) après 8 heuresLibrePO-05Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.85) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.26) après 6 heuresLibrePO-06Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.80) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.26) après 6 heuresLibrePO-07Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 1.00) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.26) après 8 heuresLibrePO-07Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.79) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.20) après 6 heuresLibrePO-08Puits non instrumenté pour l'étude de la FRBPO-09Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.79) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.20) après 6 heuresLibrePO-10Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.20) après 6 heuresLibreLibre	Puits	Allure de la courbe de réponse	Définition du degré de confinement selon la FRB <sup>1</sup>
PO-02Effet de stockage quasi négligeable avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.34)CaptivePO-03Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.64) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.34) après 6 heuresLibrePO-04Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.97) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.40) après 8 heuresLibrePO-05Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.85) avant 	PO-01	Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.90) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.27) après 8 heures	Libre
PO-03Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.64) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.34) après 6 heuresLibrePO-04Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.97) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.40) après 8 heuresLibrePO-05Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.85) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.26) après 6 heuresLibrePO-06Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.80) avant 	PO-02	Effet de stockage quasi négligeable avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.34)	Captive
PO-04Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.97) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.40) après 8 heuresLibrePO-05Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.85) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.26) après 6 heuresLibrePO-06Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.80) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.21) après 6 heuresLibrePO-07Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 1.00) avant 	PO-03	Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.64) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.34) après 6 heures	Libre
PO-05Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.85) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.26) après 6 heuresLibrePO-06Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.80) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.21) après 6 heuresLibrePO-07Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 1.00) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.26) après 8 heuresLibrePO-07Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 1.00) avant 	PO-04	Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.97) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.40) après 8 heures	Libre
$\begin{array}{c c} PO-06 & \begin{array}{c} Décroissance de l'EB initiale (EB \sim 0.80) avant \\ \mathbf{d'atteindre un palier (EB \sim 0.21) après 6 heures} \\ \end{array} & \begin{array}{c} Libre \\ \hline PO-07 & \begin{array}{c} Décroissance de l'EB initiale (EB \sim 1.00) avant \\ \mathbf{d'atteindre un palier (EB \sim 0.26) après 8 heures} \\ \hline PO-08 & \begin{array}{c} Puits non instrumenté pour l'étude de la FRB \\ \hline PO-09 & \begin{array}{c} Décroissance de l'EB initiale (EB \sim 0.79) avant \\ \mathbf{d'atteindre un palier (EB \sim 0.20) après 6 heures} \\ \hline PO-10 & \begin{array}{c} Décroissance de l'EB initiale (EB \sim 0.80) avant \\ \mathbf{d'atteindre un palier (EB \sim 0.20) après 6 heures} \\ \hline PO-10 & \begin{array}{c} Décroissance de l'EB initiale (EB \sim 0.80) avant \\ \mathbf{d'atteindre un palier (EB \sim 0.20) après 9 heures} \end{array} \end{array} \end{array}$	PO-05	Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.85) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.26) après 6 heures	Libre
PO-07Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 1.00) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.26) après 8 heuresLibrePO-08Puits non instrumenté pour l'étude de la FRBPO-09Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.79) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.20) après 6 heuresPO-10Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.86) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.20) après 9 heures	PO-06	Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.80) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.21) après 6 heures	Libre
PO-08Puits non instrumenté pour l'étude de la FRBPO-09Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.79) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.20) après 6 heuresPO-10Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.86) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.20) après 9 heures	PO-07	Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 1.00) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.26) après 8 heures	Libre
PO-09Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.79) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.20) après 6 heuresLibrePO-10Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.86) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.20) après 9 heuresLibre	PO-08	Puits non instrumenté pour l'étude de la FRB	
PO-10Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.86) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.20) après 9 heuresLibre	PO-09	Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.79) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.20) après 6 heures	Libre
	PO-10	Décroissance de l'EB initiale (EB ~ 0.86) avant d'atteindre un palier (EB ~ 0.20) après 9 heures	Libre

D'apres Ladeveze et al. (2016).

#### 5.4.4 Synthèse sur les conditions de confinement

Le confinement des puits a donc été défini à partir de trois méthodes distinctes : 1) les hydrofaciès des sédiments superficiels, selon deux séries de critères, 2) les fluctuations piézométriques et 3) la fonction de réponse barométrique. En tenant compte des deux gammes de critères de la méthode des hydrofaciès, ce sont donc quatre techniques différentes qui ont été utilisées pour définir les conditions de confinement de chaque puits d'observation. Un type d'aquifère a été attribué à chaque puits selon la tendance dominante. Lorsque les approches fournissaient des résultats divergents, les conditions de confinement ont alors été justifiées par jugement professionnel.

Pour quatre des puits d'observation (PO-5, PO-6, PO-9 et PO-10), les quatre techniques fournissent le même résultat, soit une condition de nappe libre, et pour 8 des 10 puits, trois des quatre techniques fournissent ce résultat (Tableau 5.19). Toutefois, trois contextes particuliers ressortent de cette analyse de confinement :

1) Pour les puits clairement en condition de nappe libre (PO-03, PO-05, PO-06, PO-09 et PO-10) : quelle que soit la méthode employée, les résultats sont similaires et indiquent un aquifère à nappe libre, hormis pour le puits PO-03. La méthode des hydrofaciès attribut à ce puits des conditions captives lorsque des critères restrictifs sont utilisés. Toutefois, cette approche se base sur des critères subjectifs particulièrement limitatifs pour les couches imperméables. Ainsi la petite couche d'argile de 2 m rencontrée dans le puits PO-3 a induit ce résultat. Toutefois, l'étendue de cette couche et son épaisseur ailleurs qu'au puits même ne sont pas connues. Cet exemple montre l'intérêt d'utiliser plusieurs méthodes complémentaires pour définir les conditions de confinement puisque le puits PO-03 affiche un hydrogramme et une fonction de réponse barométrique typique de conditions de nappe libre ;

2) Pour les puits en conditions de nappe libre proche d'une zone d'émergence (PO-01, PO-04 et PO-07) : les méthodes des hydrofaciès et de la fonction de réponse barométrique classent ces puits en conditions de nappe libre. Toutefois, leurs hydrogrammes présentent des amplitudes très atténuées, inférieures à 2 m sur une année, et des variations saisonnières peu marquées. Ces fluctuations très amorties du niveau de nappe traduisent l'influence de la proximité de la rivière Kennebecasis et de la zone d'émergence associée ;

3) Pour le puits jaillissant en conditions de nappe libre (PO-02) : les méthodes utilisées fournissent des résultats ambigus qui ne permettent pas de conclure hors de tout doute le type de confinement de ce cas spécifique. La méthode des hydrofaciès classe ce puits en conditions de nappe libre ou captive selon les critères utilisés et son hydrogramme reflète plutôt un comportement de nappe libre. Selon la fonction de réponse barométrique, le puits serait captif avec un effet de stockage. Dans les zones d'émergence proches des rivières, la topographie peut contrôler les conditions hydrogéologiques et ainsi produire de l'artésianisme. Dans le cas d'un aquifère libre, le comportement jaillissant d'un puits peut se produire quand la partie ouverte au roc intercepte une zone où la charge hydraulique est plus élevée que la surface du sol (Freeze et Cherry, 1979) (Figure 5.20).

Le comportement particulier du puits PO-02, situé en condition de confinement libre, s'explique vraisemblablement par 1) la présence d'une couche d'argile entre 10.7 et 12.2 m de profondeur induisant un comportement légèrement captif dans l'environnement proche du puits à une échelle de temps courte, 2) l'existence d'une zone de recharge à proximité induisant des variations piézométriques importantes sur l'hydrogramme du puits (fluctuations atteignant 4.29 m sur la période de suivi) et traduisant une condition de nappe libre à une échelle plus large et 3) sa localisation en fond de vallée encaissée qui lui confère un comportement de puits jaillissant.







Figure 5.20 – (a) Puits jaillissant PO-02 et (b) schéma d'un puits jaillissant contrôlé topographiquement, inspiré de Freeze et Cherry (1979).

Comme démontré par Ladevèze (2017a), l'utilisation conjointe de plusieurs méthodes est utile sinon nécessaire dans la définition des conditions de confinement de la nappe et apporte un certain niveau de confiance à l'analyse. L'utilisation de la fonction de réponse barométrique réduit les erreurs d'interprétation liées à l'aspect subjectif des méthodes de diagnostics conventionnelles (hydrofaciès et fluctuations barométriques). Ces approches locales peuvent être ensuite généralisées à l'échelle du territoire visé selon les propriétés hydrauliques et la distribution des dépôts meubles. De par la nature relativement perméable des dépôts meubles (Section 5.1.4) et leur épaisseur non significative sur les bassins étudiés (Section 5.2.6), il est raisonnable de considérer l'aquifère comme étant libre sur l'ensemble de la région d'étude.

<b>.</b>	Hydrof	faciès	Fluctuations	Fonction	Bilan sur les
Puits	Littérature	Critères restrictifs	piézométriques	de reponse barométrique	conditions de confinement
PO-01	Libre	Libre	Semi-Captive	Libre	Puits en condition libre proche d'une zone d'émergence
PO-02	Libre	Captive	Semi-Captive	Captive	Puits jaillissant en condition libre en zone d'émergence
PO-03	Libre	Captive	Libre	Libre	Puits en condition libre
PO-04	Libre	Libre	Semi-Captive	Libre	Puits en condition libre proche d'une zone d'émergence
PO-05	Libre	Libre	Libre	Libre	Puits en condition libre
PO-06	Libre	Libre	Libre	Libre	Puits en condition libre
PO-07	Libre	Libre	Semi-Captive	Libre	Puits en condition libre proche d'une zone d'émergence
PO-08	Libre	Libre	Pas de données	Pas de données	Confinement non confirmé par manque de données
PO-09	Libre	Libre	Libre	Libre	Puits en condition libre
PO-10	Libre	Libre	Libre	Libre	Puits en condition libre

Tableau 5.19 – Conditions de confinement des puits selon les approches employées.

# 5.5 Piézométrie

Le développement de la carte piézométrique est un élément essentiel à toute étude de caractérisation hydrogéologique. Cette carte permet notamment 1) d'identifier les directions de l'écoulement de l'eau souterraine à l'échelle régionale, 2) de définir les zones préférentielles de résurgence de la nappe et 3) d'évaluer le lien entre les eaux souterraines et les eaux de surface (USGS, 1980).

La carte piézométrique représente la distribution des charges hydrauliques d'un aquifère sur un territoire donné. Au sein de cet aquifère, l'écoulement de l'eau souterraine se fait des charges hydrauliques les plus élevées vers les plus faibles. Dans le cas d'un aquifère libre, les hauteurs de charge hydraulique représentent l'élévation du niveau de nappe par rapport à un niveau de référence, habituellement égal au niveau moyen de la mer (NMM).

Sur la région d'étude, l'objectif est donc de représenter spatialement la piézométrie de l'aquifère régional du roc fracturé à partir de données ponctuelles de mesure du niveau de nappe dans des puits. Afin de réaliser cette carte piézométrique, la procédure consistait à 1) recueillir les données piézométriques dans la base de données des puits domestiques de la province (Section 5.5.1), 2) effectuer un tri des données brutes de niveau de nappe afin de conserver les valeurs avec un bon niveau de confiance (Section 5.5.2), 3) vérifier les corrélations potentielles avec la topographie et les cours d'eau (Section 5.5.3), 4) procéder à l'interpolation de la surface piézométrique selon des méthodes variées (Section 5.5.4), puis 5) sélectionner la méthode d'interpolation la plus représentative et justifier ce choix (Section 5.5.5).

Ce cheminement logique suit globalement les procédures auparavant mises en pratique lors des PACES sur plusieurs bassins du Québec (Carrier *et al.*, 2013, Cloutier *et al.*, 2013, Lefebvre *et al.*, 2015, Talbot Poulin *et al.*, 2013) et notamment d'un protocole développé dans le cadre de ces projets par Lefebvre *et al.* (2012). La méthodologie classique consiste en une comparaison détaillée des méthodes d'interpolation applicables aux données piézométriques, à savoir : un krigeage ordinaire, un krigeage ordinaire utilisant l'élévation des rivières et quelques points de contrôle, ainsi qu'un krigeage avec dérive externe basé sur la topographie. Cette analyse s'inspire des travaux de Desbarats *et al.* (2002), Carrier (2008), Comeau (2009) et Guekie Simo *et al.* (2015).

La procédure suivie pour établir la carte de la surface piézométrique de l'aquifère rocheux (Carte 9) est récapitulée dans le diagramme décisionnel de la figure 5.21.



Figure 5.21 – Diagramme décisionnel du processus d'interpolation de la piézométrie de la nappe.

# 5.5.1 Collecte des données d'entrée

Les niveaux de nappe proviennent essentiellement de la base de données provinciale des puits résidentiels. En complément, les 10 puits d'observation de la CGC et un puits de la compagnie Corridor Resources Inc. (ID-39528) situé à proximité du puits d'observation PO-03 fournissent des valeurs de la surface de la nappe (Tableau 5.20).

#### Tableau 5.20 – Source des données.

Source	Nombre de puits	Proportion (%)
BD provinciale des puits domestiques	2 603	99.58
Puits de la CGC	10	0.38
Puits ID-39528	1	0.04
Total des données	2 614	100.00

# 5.5.2 Tri et traitement des données initiales

Afin de produire une carte fiable de la piézométrie de l'aquifère rocheux, une étape de traitement et de validation des données de piézométrie a été appliquée. Cette procédure de sélection des valeurs les plus pertinentes visait à traiter ou supprimer les incohérences identifiées dans la base de données provinciale :

- Phase 1 : puits avec des identifiants différents, mais des coordonnées identiques ;
- Phase 2 : puits avec le même identifiant, mais des coordonnées différentes ;
- Phase 3 : puits situés en dehors de la zone couverte par le MNT et donc hors du territoire ;
- Phase 4 : puits sans indication de localisation ;
- Phase 5 : puits considéré comme jaillissant dans la base de données, mais avec un niveau piézométrique inférieur à la surface du sol ;
- Phase 6 : puits considéré comme non jaillissant dans la base de données, mais avec un niveau piézométrique supérieur à la surface du sol ;
- Phase 7 : donnée aberrante repérée visuellement après le premier krigeage ordinaire.

La base de données provinciale se révèle être une source potentielle d'erreur majeure puisque jusqu'à 18 puits peuvent être localisés au même endroit avec des identifiants différents. Il s'agissait donc d'apporter une attention toute particulière au traitement de ces données d'entrée en amont de l'interpolation. Ainsi, la première phase de traitement était consacrée au traitement des puits ayant le même identifiant et des coordonnées différentes (phase 1).

Dans ce cas, un puits virtuel a alors été créé au barycentre des puits initiaux en considérant la médiane du niveau piézométrique et les doublons ont alors été supprimés (Tableau 5.21). Lors de la campagne de terrain de l'été 2016, les plaques d'identification de puits ont permis de confirmer la localisation de deux ouvrages et donc de corriger six doublons.

Source des données	Doublons identifiés	Puits exclus	Puits virtuels créés
BD provinciale	465	284	181
Campagne de terrain	6	4	2
Total des données	471	288	183

Tableau 5.21	- Traitement de	s doublons	de la phase 1	
--------------	-----------------	------------	---------------	--

Pour les autres phases de traitement (phases 2 à 7), la procédure a simplement consisté à écarter définitivement les données aberrantes (Tableau 5.22).

Phase de tri	Incohérence constatée	Traitement appliqué
		1) Suppression du/des doublon(s)
Phase 1	Doublon de coordonnées d'un puits	2) Création d'un puits virtuel au barycentre
		3) Calcul de la médiane de la piézométrie
Phase 2	Doublon d'identifiants des puits	Suppression définitive
Phase 3	Données en dehors du territoire	Suppression définitive
Phase 4	Coordonnées indisponibles	Suppression définitive
Phase 5	Puits jaillissant avec piézométrie < sol	Suppression définitive
Phase 6	Puits non jaillissant avec piézométrie > sol	Suppression définitive
Phase 7	Donnée aberrante après inspection visuelle	Suppression définitive

À partir des 2 603 puits extraits de la base de données provinciale, 1 223 puits ont été exclus ou corrigés pour finalement retenir 1 380 données de niveau piézométrique (Tableau 5.23).

Phases de tri	Nombre de puits exclus	Nombre de puits conservés
Phase 1	288	2 315
Phase 2	523	1 792
Phase 3	7	1 785
Phase 4	1	1 784
Phase 5	280	1 504
Phase 6	122	1 382
Phase 7	2	1 380
Total des données	1 223	1 380

Après traitement, les données de niveau de nappe comprenaient un total de 1 390 valeurs (Tableau 5.24). Il a également été décidé d'écarter le puits d'observation PO-08 du processus puisque la contamination de ce puits y a empêché la mesure précise du niveau de nappe.

Source	Nombre de puits	Proportion (%)	Couverture temporelle
BD provinciale des puits domestiques	1 380	99.28	1994-2016
Puits de la CGC	9	0.65	2015-2017
Puits ID-39528	1	0.07	2016
Total des données	1 390	100.00	1994-2017

Tableau 5.24 – Nombre de données de niveau de nappe après traitement.

#### 5.5.3 Hypothèses impliquées dans l'approche d'interpolation

Afin d'obtenir une carte piézométrique réaliste des conditions d'écoulement, plusieurs hypothèses ont été émises et vérifiées dans la présente section. Elles impliquent 1) la connexion hydraulique avec les cours d'eau puisque les puits sont à surface libre (Section 5.4), 2) un contrôle topographique important, 3) des gradients verticaux négligeables vis-à-vis des gradients horizontaux et 4) des variations spatiales dominantes par rapport aux variations temporelles.

Le lien hydraulique entre les cours d'eau et la nappe est vérifié selon deux méthodes distinctes :

a) Le krigeage ordinaire préliminaire utilisant uniquement les données extraites des puits (Tableau 5.24) indique que les rivières majeures drainent la nappe sur le territoire ;

b) En considérant le lit des rivières comme assimilable à la surface libre de l'eau (puisque les cours d'eau sont peu profonds), une comparaison entre l'élévation des rivières et le niveau de la nappe dans les puits localisés dans une zone tampon de 100 m de part et d'autre des dites rivières a été effectuée. Les 198 données extraites traduisent alors une forte corrélation (R = 0.9761) entre les niveaux d'eau de surface et les niveaux d'eau souterraine (Figure 5.22).



Figure 5.22 – Corrélation entre l'élévation du niveau piézométrique et l'altitude du lit des rivières pour les 198 puits situés dans la zone tampon.

Dans le cas supposé d'une nappe libre sur le territoire (Section 5.4.4) où l'écoulement est contrôlé par la gravité, la surface de la nappe est la quasi-réplique de la topographie (Domenico et Schwartz, 1990).

L'écoulement de l'eau souterraine est donc directement contrôlé par la topographie depuis les zones de charge hydraulique élevée vers les rivières constituant les exutoires de la nappe. Ceci est notamment vérifié sur la région d'étude avec une excellente corrélation (R = 0.9788) entre les niveaux de nappe mesurés dans les 1 390 puits traités de la base de données de la province et l'altitude de la surface du sol au droit de ces puits extraite du MNT (Figure 5.23).



Figure 5.23 – Corrélation entre l'élévation du niveau piézométrique et la topographie.

La procédure d'interpolation des données ponctuelles du niveau de la nappe présume que la composante dominante de l'écoulement est horizontale. Cette supposition implique donc que les gradients hydrauliques verticaux soient négligeables par rapport aux gradients hydrauliques horizontaux. Dans le cas présent, les gradients hydrauliques verticaux n'ont pas été quantifiés sur les puits du secteur d'étude. Toutefois, les diagraphies de flux réalisées par Crow *et al.* (2017) indiquent l'existence d'un écoulement vertical dans les six puits investigués (Tableau 2.7). Hormis dans deux puits localisés proches de la zone d'émergence (PO-02 et PO-07), le flux vertical est jugé non significatif vis-à-vis de la composante horizontale de l'écoulement sur les bassins.

La dernière hypothèse traite de la représentativité des données ponctuelles par rapport aux variations des niveaux de nappe dans le temps. Entre décembre 2015 et octobre 2017, l'amplitude maximale mesurée sur les puits d'observation de la CGC approche les 7 m pour une variation moyenne de l'ordre de 3.5 m (Section 5.3.4). Les variations temporelles de piézométrie semblent donc négligeables par rapport aux variations spatiales puisque l'élévation de la nappe varie de 0 à 405 m/NMM selon les puits sur la région d'étude. Bien que les données ponctuelles de niveau de nappe mesurées dans les puits couvrent une large période de temps de près de 22 ans (Tableau 5.24), il apparaît donc raisonnable d'utiliser conjointement des données ponctuelles de piézométrie mesurées à différentes périodes de l'année.

#### 5.5.4 Interpolation de la surface piézométrique par diverses méthodes

La carte de distribution des charges hydrauliques a été réalisée en comparant les résultats de trois méthodes d'interpolation (Tableau 5.25) utilisant les données d'entrée du tableau 5.26 :

1) Un krigeage ordinaire utilisant seulement les données de niveaux de la nappe validés ( $KO_{po}$ ) : cette interpolation initiale a permis d'éliminer plusieurs anomalies par inspection visuelle en identifiant les points dont l'élévation était incohérente avec le contexte environnant (Section 5.5.2) tout en révélant le fort lien hydraulique entre eaux souterraines et eaux de surface (Section 5.5.3);

2) Un krigeage ordinaire utilisant les données de niveaux de la nappe validés, des niveaux de rivières et quelques points de contrôle synthétiques (KO<sub>popips</sub>) : ce krigeage ordinaire combine à la fois des données issues des puits, des points imposés représentant les eaux de surface et des points de contrôle dans les zones sous-échantillonnées. La prise en compte des rivières pérennes dans le processus d'interpolation est basée sur la forte corrélation entre les cours d'eau et les niveaux de nappe dans les puits (Figure 5.22). L'élévation du lit des rivières a ainsi été extraite sur 1 183 points à partir de la grille du MNT. Ce nombre limité de points imposés a délibérément été choisi pour représenter moins de 50 % de l'ensemble des variables primaires afin de ne pas trop contraindre l'interpolation. Suite au krigeage ordinaire initial (KO<sub>po</sub>), la distribution spatiale des points d'observation a mis en évidence quelques lacunes sur des secteurs de relief important. Il a alors été décidé d'ajouter 28 points de forçage sur ces secteurs sous-échantillonnés en leur attribuant une valeur basée sur la relation entre la topographie et la piézométrie (Figure 5.23). Ces points de contrôle représentent seulement 1 % des variables primaires et assurent une meilleure représentation de la surface piézométrique sur ces zones de relief important;

3) Un krigeage avec dérive externe basée sur la topographie utilisant l'ensemble des données primaires, incluant les niveaux de la nappe validés, les niveaux de rivières et quelques points de contrôle synthétiques (KDE<sub>popips</sub>) : ce krigeage utilise la topographie comme variable secondaire puisque le contrôle topographique sur les niveaux de nappe est important sur le territoire (Section 5.5.3). L'élévation de la surface du sol a ainsi été extraite d'une grille d'interpolation de 70 m par 70 m à partir du MNT dont la précision verticale absolue est de 2.5 m (GeoNB, 2002).

Variable	Type de données Processus		ssus de l	us de krigeage	
	Points d'observation	KO <sub>po</sub>			
Primaire	Points imposés		KO <sub>popips</sub>	<b>KDE</b> <sub>popips</sub>	
	Points synthétiques				
Secondaire	Extraction de la topographie (MNT) sur la grille d'interpolation				

Tableau 5.25 – Types de variables considérées selon le processus de krigeage mis en œuvre.

Catégorie	Source	Nombre de points	Proportion (%)
	BD provinciale des puits domestiques	1 380	53.05
Eau souterraine	Puits de la CGC	9	0.35
	Puits ID-39528	1	0.04
Total des données «	eau souterraine »	1 390	53.44
Eau de surface (points imposés)	Extraction ponctuelle de l'élévation du lit des rivières tous les 2 km	1 183	45.48
Total des données «	eau de surface »	1 183	45.48
Points de contrôle (points synthétiques)	Projection de la piézométrie dans les zones sans donnée, principalement dans les hauts topographiques	28	1.08
Total des données «	points de contrôle »	28	1.08
Total des données p	rimaires	2 601	100.00

Tableau 5.26 – Données d'entrée primaires utilisées lors de l'interpolation de la surface piézométrique.

Les trois types d'interpolation ont été réalisés avec le programme *SGeMS* (Remy, 2004) sur une grille régulière de 70 m par 70 m afin d'être en accord avec la résolution du MNT. Les limites de la zone interpolée ont été définies pour inclure l'ensemble des données d'entrée (Tableaux V.1, V.3 et V.5) ainsi qu'une zone tampon de près de 1 km de distance par rapport aux limites des bassins pour éviter les effets de bordure liés au processus d'interpolation. L'analyse géostatistique, effectuée sur *SGeMS* (Remy *et al.*, 2009), consistait à ajuster un modèle théorique sur chaque semi-variogramme expérimental omnidirectionnel (Figures V.1, V.3 et V.5) avant de procéder aux diverses interpolations en définissant des paramètres de recherche (Tableaux V.2, V.4 et V.6).

# 5.5.5 Analyse comparative des procédures d'interpolation

Cette analyse comparative a pour but de sélectionner la méthode d'interpolation représentant le plus fidèlement possible les conditions d'écoulement du territoire tout en minimisant les erreurs associées au processus d'interpolation. La stratégie mise en place pour évaluer les incertitudes de chaque méthode d'interpolation (Figure 5.21) s'inspire de la logique développée par Guekie Simo *et al.* (2015) et des travaux de Carrier (2008) et de Comeau (2009).

La procédure comprenait trois volets distincts : 1) évaluation de la performance du modèle par validation croisée en reproduisant l'interpolation avec 95 % des points d'observation et en comparant les estimations de l'élévation du niveau de nappe avec les 5 % de points d'observation restants, 2) visualisation de l'allure de la surface piézométrique sur la coupe AA' recoupant les deux bassins sur une longueur de 35 km (Carte 2) et 3) estimation des erreurs sur la profondeur de la nappe selon le type de krigeage utilisé.

La validation croisée a permis de minimiser les erreurs de chaque interpolation et de comparer leurs niveaux de performance respectifs (Figures V.2, V.4 et V.6). La corrélation entre les niveaux de nappe estimés et mesurés sur 65 puits est élevée, quelle que soit la méthode de krigeage, avec un coefficient de corrélation supérieur à 0.929. Le krigeage ordinaire classique (KO<sub>po</sub>) affiche néanmoins des erreurs significatives (Tableau 5.27), reproduisant ainsi les niveaux d'eau au droit des puits analysés avec une précision de 12.9 m en plus de sous-estimer grandement le niveau de la nappe dans les hauts topographiques lorsque peu de données sont disponibles.

Les modèles intégrant l'élévation du sol et des rivières (KO<sub>popips</sub> et KDE<sub>popips</sub>) améliorent le degré de corrélation alors supérieur à 0.988. L'apport de données conjointes augmente la performance de l'interpolation des modèles (KO<sub>popips</sub> et KDE<sub>popips</sub>) en offrant une meilleure distribution spatiale de l'information par rapport au krigeage ordinaire classique (KO<sub>po</sub>). Pour ces deux modèles, les erreurs sont très largement réduites puisque les niveaux de nappe des 65 puits examinés sont reproduits avec une différence (erreur moyenne absolue) inférieure à 4.73 m et, dans le cas du krigeage avec dérive externe, une erreur quadratique moyenne inférieure à 10 % de la différence d'altitude maximale dans la zone d'étude (10 % de 405 m = 40.5 m > 39.8 m) (Tableau 5.27).

Tableau 5.27	<ul> <li>Statistiques</li> </ul>	issues du	processus de	validation	croisée s	selon le t	ype de	krigeage.
--------------	----------------------------------	-----------	--------------	------------	-----------	------------	--------	-----------

Type d'erreur	KO <sub>po</sub>	KOpopips	<b>KDE</b> popips
Erreur moyenne – ME (m)	2.104	0.103	2.857
Erreur moyenne absolue – MAE (m)	12.877	3.937	4.723
Erreur quadratique moyenne – MSE (m <sup>2</sup> )	567.510	42.901	39.849
Erreur type – RMSE (m)	23.823	6.550	6.313
Coefficient de corrélation – R	0.929	0.993	0.988

La comparaison des algorithmes d'interpolation passe également par l'analyse du comportement de la surface piézométrique par rapport à la topographie et aux cours d'eau permanents (Figure 5.24). À première vue, le krigeage ordinaire initial (KO<sub>po</sub>) ne correspond pas au comportement attendu de la piézométrie. En effet, la plupart des rivières sont déconnectées de la nappe, ce qui va à l'encontre de la corrélation précédemment établie (Figure 5.22). De plus, la profondeur de la nappe est trop importante sous les hauts topographiques où elle atteint notamment près de 197 m sous la surface au centre du profil. Ce constat n'est pas en adéquation avec la corrélation admise entre topographie et surface piézométrique et avec les observations de terrain (Figure 5.23).

L'ajout de points de contrôle sous les hauts topographiques et de points imposés le long des rivières permanentes n'améliore pas significativement l'allure du toit de la nappe (KO<sub>popips</sub>). Les rivières secondaires semblent toujours perchées et la profondeur de la nappe sous les reliefs est surestimée par rapport à ce qui est observé dans les puits (Figure 5.24 et Figures V.7 à V.9).



Figure 5.24 – Coupe AA' de la surface piézométrique interpolée selon les trois différentes méthodes d'interpolation testées, coupe localisée sur la carte 2.

Bien que le krigeage ordinaire utilisant les niveaux de rivières et quelques points de contrôle synthétiques (KO<sub>popips</sub>) semble parfois être légèrement plus robuste que le krigeage avec dérive externe (KDE<sub>popips</sub>) selon les statistiques du tableau 5.27, l'utilisation de la topographie comme variable secondaire permet de beaucoup mieux représenter la surface piézométrique (Figure 5.24), particulièrement dans les hauts topographiques où peu de données sont disponibles. Le niveau de nappe se comporte alors de manière plus réaliste en suivant globalement la topographie tout en étant en conformité avec les niveaux d'eau mesurés dans les puits sous les reliefs. En effet, sur le territoire d'étude, en considérant uniquement les 61 puits localisés à plus de 200 m/NMM, le niveau de nappe mesuré est de l'ordre de 21 m de profondeur tandis qu'il atteint un maximum de 31 m/sol au centre de la coupe (Figure 5.24). De plus, la contrainte imposée par la topographie assure une connexion complète des rivières pérennes avec la nappe et réduit les erreurs d'interpolation du niveau de nappe sur les secteurs d'émergence. En effet, avec les deux krigeages ordinaires (KOpo et KOpopips), la surface piézométrique pouvait atteindre une cote de plus de 11 m au-dessus du sol au droit de certains cours d'eau du profil AA' (Figure 5.24). Dans le cas du krigeage avec dérive externe (KDE<sub>popips</sub>), les erreurs sont très largement réduites avec un maximum de près de 2 m au-dessus du sol sur des secteurs très limités.

En analysant les erreurs d'interpolation à l'échelle de la zone interpolée, le constat est similaire. En effet, en considérant la résolution du MNT égale à 2.5 m (GeoNB, 2002), les secteurs où la nappe excède la topographie représentent 16.7 % du territoire suite au krigeage ordinaire initial (KO<sub>po</sub>). En intégrant l'élévation des rivières dans le krigeage ordinaire (KO<sub>popips</sub>), ces étendues sont réduites et les secteurs incohérents correspondent alors à 3.8 % de la surface des bassins.

Quel que soit le krigeage ordinaire (KO<sub>po</sub> et KO<sub>popips</sub>), la profondeur de la nappe affiche une grande variabilité traduite par des niveaux de nappe pouvant dépasser les 250 m de profondeur ou bien largement excéder la surface du sol. Dans le cas du krigeage avec dérive externe (KDE<sub>popips</sub>), le système adopte un comportement plus réaliste avec une nappe généralement proche de la surface du sol (Figure 5.25).



Figure 5.25 – Statistiques de profondeur de la nappe sur chaque maille de la grille d'interpolation selon la méthode d'interpolation utilisée.

#### 5.5.6 Incertitudes recensées

Bien que limités sur le territoire, les secteurs anormaux observés suite au processus de krigeage avec dérive externe peuvent être expliqués par diverses sources d'incertitudes : 1) la fiabilité de la base de données provinciale des puits résidentiels, 2) la distribution spatiale des données primaires, 3) le degré de précision du MNT utilisé comme variable secondaire et 4) l'utilisation de données ponctuelles négligeant les variations temporelles de la surface de la nappe.

L'utilisation d'une base de données provinciale représentant la majorité des données d'entrée (Tableau 5.26) constitue l'élément d'incertitude majeur. En effet, il est probable que la plupart des relevés piézométriques proviennent de rapports de forage où la mesure manuelle du niveau de nappe a potentiellement été prise 1) de manière approximative avec la sonde rubanée, 2) sans considérer de repère précis entraînant un mauvais calage en altitude et 3) directement après les travaux de développement du forage avec un niveau de nappe perturbé et donc en dehors des conditions statiques. De la même façon, des doutes peuvent être émis concernant la localisation de certains puits puisque la phase initiale de tri du jeu de données a mis en évidence la présence de nombreux doublons (Section 5.5.2).

Sur le territoire, les quelques centres urbains et les nombreux développements ruraux sont généralement concentrés à proximité directe des cours d'eau. La distribution spatiale des puits domestiques est donc contrôlée par le réseau hydrique de surface. Par conséquent, la précision attendue de la carte piézométrique aux alentours des cours d'eau est de ce fait supérieure à celle des hauts topographiques.

Une autre source d'erreur potentielle est liée à l'utilisation d'une donnée indirecte, en l'occurrence la topographie. Bien que l'apport de cette variable secondaire permette de contourner le manque de données dans les zones sous-échantillonnées, il implique néanmoins une autre source d'erreur potentielle en raison de la précision verticale des mesures avoisinant les 2.5 m (GeoNB, 2002).

Enfin, la carte piézométrique est un portrait instantané du toit de la nappe sur le territoire d'étude ce qui amène également une autre source d'erreur potentielle. D'une part, cette représentation néglige les variations temporelles de la nappe sur chaque puits, qui peuvent atteindre plusieurs mètres en conditions de nappe libre (Section 5.3.4). D'autre part, elle se base sur des mesures très largement espacées dans le temps, couvrant une période de près de 22 ans (Section 5.5.2).

115

## 5.5.7 Synthèse et résultats

Le krigeage avec dérive externe est donc l'approche représentant le plus fidèlement la surface piézométrique à l'échelle régionale (Carte 9). Cette méthode s'est déjà révélée très adaptée à la réalisation de cartes piézométriques sur des territoires où la topographie présente une grande variabilité et contrôle les niveaux de nappe (Desbarats *et al.*, 2002, Guekie Simo *et al.*, 2015, Raynauld, 2014). L'apport de données complémentaires, telles que l'altitude des rivières et la topographie, a permis 1) d'améliorer la distribution spatiale des données, 2) de réduire les erreurs liées à l'interpolation et 3) de diminuer l'incertitude du modèle.

D'un point de vue régional (Carte 9), la distribution des charges hydrauliques met en évidence un fort contrôle topographique sur les écoulements : la surface piézométrique est par conséquent la quasi-reproduction de la topographie. L'écoulement gravitaire de la nappe se fait depuis les zones de reliefs vers les rivières constituant les exutoires des eaux souterraines. Sur le territoire, la surface de la nappe est peu profonde puisque généralement comprise entre 2 et 13 m p/r au sol (Figure 5.25) ; traduisant alors un écoulement plutôt superficiel au sein de l'aquifère rocheux. Sous les hauts topographiques, les quelques puits recensés semblent indiquer qu'elle atteint en moyenne une profondeur de l'ordre de 21 m.

Lors de la construction de cette carte piézométrique, l'impact du dénoyage de la mine souterraine de Penobsquis sur les niveaux de nappe n'a pas été vérifié (Section 3.6.3). Il est donc primordial de préciser que cette carte a été réalisée à partir de 1 390 relevés du niveau de nappe entre 1994 et 2016 dont 170 ont été collectés avant le dénoyage de la mine soit avant 1998. Sur les 1 220 mesures restantes, 109 proviennent de puis localisés dans un rayon de 5 km autour de l'extension souterraine de la mine et donc potentiellement influencées par les opérations souterraines de pompage des galeries. La carte piézométrique représente donc une approximation de l'élévation moyenne de la nappe sur une période de 22 ans potentiellement perturbée à l'échelle locale par le dénoyage des galeries souterraines de la mine de Penobsquis.

Malgré la présence d'incertitudes (Section 5.5.6), la carte piézométrique finale devrait fournir un portrait représentatif des conditions d'écoulement au sein de l'aquifère rocheux à nappe libre. À l'échelle des bassins, la carte piézométrique obtenue fournit une précision verticale de l'ordre de 5 m. Elle peut donc être utilisée pour des considérations d'ordre régional, mais des investigations complémentaires sont nécessaires pour les études locales.

# 5.6 Évaluation de la recharge de l'aquifère rocheux

La connaissance du taux de recharge est indispensable à une gestion raisonnée de la ressource en eau souterraine (Healy, 2010, Scanlon *et al.*, 2002). La recharge intervient notamment dans l'estimation du degré de vulnérabilité des aquifères (Section 5.7) et constitue un paramètre important dans la conceptualisation de tout modèle numérique d'écoulement permettant de représenter le comportement des aquifères (Section 0).

La recharge se définit comme le flux d'eau s'écoulant au travers de la zone non saturée et atteignant la surface de la nappe (Freeze et Cherry, 1979, Healy, 2010). Dans ce document, les différentes approches employées estiment la recharge diffuse à l'aquifère, c'est-à-dire la quantité d'eau issue des précipitations distribuées sur une grande superficie (Healy, 2010). Plus spécifiquement, cette étude visait à estimer la recharge à l'aquifère rocheux.

Afin de pallier les défauts et incertitudes propres à chaque méthode, plusieurs auteurs font état de la nécessité d'utiliser plusieurs techniques pour estimer le taux de recharge (Healy, 2010, Healy et Cook, 2002, Scanlon *et al.*, 2002). Il est généralement difficile de mesurer la recharge de manière in situ et par conséquent de comparer les estimations avec une valeur de référence permettant alors de quantifier le degré d'incertitude associé aux méthodes employées (Gosselin, 2016). La complémentarité de techniques variées assure ainsi un certain degré de confiance sur les estimations obtenues (Healy et Cook, 2002, Rivard *et al.*, 2014b).

Sur le territoire, le taux de recharge est estimé grâce à trois techniques : 1) la séparation des hydrogrammes de rivières (Section 5.6.3), 2) un modèle d'infiltration produisant un bilan hydrologique de surface (Section 5.6.4) et 3) l'exploitation des hydrogrammes de puits en combinaison avec des bilans hydrologiques (Section 5.6.5).

Afin de garantir une bonne fiabilité des estimations, le choix de ces trois approches s'est basé sur 1) la disponibilité et la qualité des données d'entrée, 2) la diversité des zones hydrologiques concernées (eau de surface, zone vadose et zone saturée) et donc la variabilité des processus en jeu ainsi que sur 3) la large gamme d'échelles temporelles et spatiales pour lesquelles ces méthodes sont applicables (Tableau 5.28).

Tableau 5.28 – Caractéristiques des diverses techniques d'estimation du taux de recharge utilisées dans le cadre du projet, adapté de (Healy, 2010).

Máthada	Madàla	Cotémorio	Quantité	Échelle		Ressources humaines	Comployitá	Besoin
wethode	wodele	Categorie	estimée	Spatiale	Temporelle	& Temps passé	Complexite	en intrants
	PART <sup>1</sup>							
Séparation des hydrogrammes	HYSEP <sup>2</sup>	Eau de	Débit de base (recharge potentielle)	Bassin versant	Annuelle à pluriannuelle	Faible	Facile	Faible
	BFI <sup>3</sup>	surface						
	Filtres <sup>4</sup>							
Bilan	Modèle d'infiltration	Zone	Recharge potentielle	Ponctuelle	Journalière	Modéré	Modérée	Élevé
de surface	quasi-2D HELP⁵	vadose	Recharge nette	à régionale	pluriannuelle	Wodere	Moderee	LICVC
Hydrogrammes		Zone		Locale (dépend des	lournaliàra			
de puits et bilans	Modèle	vadose	- Recharge nette	conditions et de	3 a	Modárá	Modérée	Faihle
hydrologiques	GWHAT <sup>6</sup>	Zone	Recharge helle	l'environnement	a nluriannuelle	wodere	MODELEE	
combinés		saturée		autour du puits)	plunalituelle			

<sup>1</sup>PART pour « streamflow PARTitioning » est un programme de séparation des hydrogrammes de rivières développé par Rutledge (1998).

<sup>2</sup>HYSEP ou « HYdrograph-SEParation program » est un programme de séparation des hydrogrammes de rivières développé par Sloto et Crouse (1996).

<sup>3</sup>BFI pour « Base-Flow Index » est un programme de séparation des hydrogrammes de rivières développé par Wahl et Wahl (1988).

<sup>4</sup>Les filtres utilisés sont ceux de Chapman (Chapman, 1999) et de Furey et Gupta (Furey et Gupta, 2001).

<sup>5</sup>Dans le cadre d'études régionales, le modèle HELP (Schroeder et al., 1994), habituellement utilisé à l'échelle d'une cellule unique, est alors appliqué à l'échelle du bassin en combinant une multitude de cellules (Croteau et al., 2010, Rivard et al., 2014b).

<sup>6</sup>Cette approche combine un bilan hydrologique de surface et la méthode des fluctuations de la nappe (Gosselin, 2016).

#### 5.6.1 Définition des termes intégrés dans le bilan hydrologique

L'objectif des méthodes utilisées est de fournir une estimation de la recharge de l'aquifère rocheux à l'échelle du territoire en considérant l'équation générale intégrant les différentes composantes du bilan en eau d'un bassin (Healy, 2010, Rushton, 2003, Rushton *et al.*, 2006) :

$$P = R + RS + RH + ETR + \Delta RAS + \Delta N \tag{5}$$

	•
-	
•••	
-	•

Ρ

: précipitations,

R	:	recharge nette,
RS	:	ruissellement de surface,
RH	:	ruissellement hypodermique,
ETR	:	évapotranspiration réelle,
ΔRAS	:	variations de stockage dans le sol,

 $\Delta N$  : autres transferts vers ou en dehors du bassin (irrigation, aqueduc...)

Cette équation générale (Équation 5) permet alors de différencier la recharge nette (R) de l'infiltration (I) et de la recharge potentielle (RP). Ces concepts sont définis ci-dessous :

$$RP = I - ETR - \Delta RAS - \Delta N = P - RS - ETR - \Delta RAS - \Delta N$$
(6)

$$R = RP - RH = P - RH - RS - ETR - \Delta RAS - \Delta N$$
<sup>(7)</sup>

оù

L

RP : recharge potentielle.

Suite à un épisode pluvieux ou lors de la fonte progressive du manteau neigeux (P), l'infiltration (I) correspond à la quantité d'eau entrant dans le sol au-dessus de la zone racinaire déduite du ruissellement de surface (RS) (Rivard *et al.*, 2014b). Cette quantité d'eau peut alors être retournée en totalité ou en partie vers l'atmosphère par évapotranspiration réelle (ETR) ou bien être emmagasinée dans la zone vadose ( $\Delta$ RAS) (Équation 6) (Healy, 2010). La recharge potentielle (RP) correspond à la percolation de l'eau sous la zone racinaire, soit généralement en dessous du plan d'écoulement nul (Healy, 2010) (Figure 5.26). Des changements de stock d'eau dans le sol ( $\Delta$ RAS) peuvent aussi moduler cette recharge potentielle (RP). Enfin, la recharge nette (R) correspond à la recharge potentielle (RP) déduite du ruissellement hypodermique (RH) (Équation 7) ; c'est-à-dire du ruissellement se produisant en sous-surface (Rivard *et al.*, 2014b).



Figure 5.26 – Composantes du bilan hydrologique utilisées dans les diverses approches d'estimation de la recharge : adapté de Rivard *et al.* (2014b) et de Gosselin (2016).

La plupart des méthodes ne font pas la distinction entre recharge potentielle (RP) et recharge nette (R). Il est donc nécessaire de différencier ces termes (Tableau 5.28) afin de pouvoir comparer les estimations de la recharge basées sur différentes composantes du bilan hydrologique (Figure 5.26). La séparation des hydrogrammes de rivière donne le débit de base du cours d'eau ( $Q_B$ ) à partir de données continues du débit de la rivière ( $Q_R$ ) dont la quantité d'eau ruisselée (RS) est extraite. Ce débit de base (Q<sub>B</sub>) combine la recharge nette (R) et le ruissellement hypodermique (RH). Le modèle d'infiltration HELP, estime, quant à lui, chacune des composantes du bilan hydrologique de l'équation 5 en considérant les variations d'emmagasinement dans le sol ( $\Delta RAS$ ) et les transferts d'eau d'origine anthropique ( $\Delta N$ ) comme négligeables, lorsque calculés sur une longue période de temps. Dans le modèle HELP, le bilan hydrologique est calculé indépendamment sur chaque maille du bassin avant d'être cumulé pour obtenir un bilan global à l'échelle du bassin étudié. Cette seconde approche estime la part de ruissellement hypodermique (RH) et permet donc de faire la distinction entre la recharge potentielle (RP) et la recharge nette (R). Sur un bassin donné, les résultats de HELP peuvent alors être comparés aux estimations du débit de base (Q<sub>B</sub>). Quant au modèle GWHAT, il fait intervenir plusieurs paramètres afin de reproduire le comportement de la nappe libre suite à la recharge. Cette troisième approche ne distingue pas le ruissellement (RS) de l'écoulement hypodermique (RH). Le taux de recharge obtenu au puits peut être néanmoins comparé aux valeurs de HELP en sélectionnant les quelques mailles situées dans l'environnement proche du puits investigué.

#### 5.6.2 Procédure de traitement des données météorologiques

Pour effectuer une estimation complète des diverses composantes du bilan hydrologique, seules deux stations météorologiques ont été considérées comme représentatives du bassin versant de la rivière Kennebecasis : les stations de Sussex et Sussex Four Corners (Carte 1). Le bassin de la rivière Pollett dispose d'une unique station, celle de Mechanic Settlement (Tableau 5.29).

Tableau 5.29 – Caractéristiques des stations météorologiques, données issues du Gouvernement du Canada (2018a).

Station	Idontifiont	Élévation	Donnéco	Valeurs manquantes entre 1980 et 2017					
Station	iuentinant	(m)	Donnees	T <sub>max</sub>	T <sub>min</sub>	T <sub>moy</sub>	P <sub>tot</sub>		
Succov	8105200	21.3	1807 2000	239	239	239	239		
Sussex	0103200	21.5	1097-2009	(2.2 %)	(2.2 %)	(2.2 %)	(2.2 %)		
Sussex Four	9105210	47.0	2015 2017	290	284	291	291		
Corners	0105210	47.0	2015-2017	(26.5 %)	(25.9 %)	(26.6 %)	(26.6 %)		
Mechanic	0100040	402.0	2006 2017	273	246	279	287		
Settlement	0102040	403.0	2006-2017	(6.2 %)	(5.6 %)	(6.4 %)	(6.5 %)		

Afin d'obtenir une série météorologique quotidienne complète entre 1980 et 2017 sur le bassin de la rivière Kennebecasis (Figure I.6 et Tableau I.1), deux étapes de traitement ont été réalisées avec le logiciel *GWHAT* (Gosselin *et al.*, 2017) :

1) En raison de leur proximité (1.1 km) et de leur faible différence d'altitude (12.8 m), les séries météorologiques quotidiennes des stations de Sussex et de Sussex Four Corners affichent une parfaite corrélation (R = 1.00). Cette étape a donc consisté à assembler les deux jeux de données pour couvrir l'étendue temporelle désirée en créant une station virtuelle nommée « Sussex Bis » ;

2) Les données manquantes restantes ont été comblées à l'aide d'un algorithme automatisé utilisant la méthode des moindres déviations absolues (Gosselin, 2016). Il permet de prédire les valeurs de température atmosphérique et de précipitations à partir de stations voisines selon des critères de sélection prédéfinis. Dans le cas de cette étude, les paramètres suivants ont été utilisés : 1) une distance maximale de 100 km par rapport à la station de référence et 2) une différence d'élévation entre les deux stations inférieure à 300 m (Tableau 5.30). Le degré de corrélation entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées de précipitations et de températures est alors vérifié par validation croisée (Figures I.1 à I.4) même si les précipitations paraissent légèrement surestimées (Figure I.5).

Tableau 5.30 – Caractéristiques des stations météorologiques voisines à la station « Sussex Bis » dans le bassin versant de la rivière Kennebecasis, données extraites de *GWHAT* (Gosselin *et al.*, 2017).

			Données .	Station « Sussex Bis »							
Station	Identifiant	Élévation (m)		Écart		Coefficient de corrélation					
				ΔAlt. (m)	∆Dist. (km)	T <sub>max</sub>	T <sub>min</sub>	T <sub>moy</sub>	P <sub>tot</sub>		
Alma	8100200	42.7	1950-2011	8.6	47.3	0.979	0.965	0.984	0.790		
Fundy Park (Alma) CS	8101746	42.7	1993-2017	8.6	47.3	0.981	0.976	0.987	0.794		

Cette deuxième étape de traitement a également été utilisée sur le bassin de la rivière Pollett afin d'obtenir une série météorologique continue entre 1980 et 2017 (Figure I.12 et Tableau I.2) avec des stations proches du site de Mechanic Settlement affichant de bonnes corrélations (Tableau 5.31) vérifiées par validation croisée (Figures I.7 à I.10) bien que la quantité de précipitations semble quelque peu sous-estimée (Figure I.11).

Tableau 5.31 – Caractéristiques des stations météorologiques voisines à la station de Mechanic Settlement dans le bassin versant de la rivière Pollett, données extraites de *GWHAT* (Gosselin *et al.*, 2017).

			Données	Station de Mechanic Settlement							
Station	Identifiant	Élévation (m)		Éc	cart	Coefficient de corrélation					
				ΔAlt. (m)	ΔDist. (km)	T <sub>max</sub>	T <sub>min</sub>	T <sub>moy</sub>	P <sub>tot</sub>		
Wolfe Lake CS	8105597	304.8	1993-2007	-98.2	2.7	0.996	0.960	0.990	0.951		
Moncton INTL A	8103201	70.7	2012-2017	-332.3	60.2	0.991	0.979	0.991	0.802		
Parkindale	8103828	152.7	1983-2013	-250.3	21.5	0.987	0.964	0.989	0.740		
Moncton A	8103200	70.7	1980-2012	-332.3	60.2	0.989	0.977	0.991	0.802		

## 5.6.3 Estimation du débit de base par séparation des hydrogrammes de rivières

Les approches de séparation d'hydrogrammes de rivières assument que le débit total d'une rivière peut être divisé en deux composantes : le ruissellement de surface (RS) et la contribution de l'aquifère correspondant au débit de base (Q<sub>B</sub>) (Healy, 2010). Cet apport de l'aquifère peut être raisonnablement considéré comme une mesure indirecte du taux de recharge (Figure 5.26).

En effet, ces méthodes d'estimation du débit de base sont appropriées dans le cas d'un aquifère caractérisé par une recharge diffuse, et applicables dans le cas d'une rivière pérenne (Barlow *et al.*, 2015, Healy, 2010, Rutledge, 1998). Ces techniques assument également comme négligeables : 1) l'évapotranspiration aux abords des cours d'eau, 2) les précipitations tombant directement dans le lit de la rivière et 3) les transferts d'eau interbassins (Combalicer *et al.*, 2008, Rivard *et al.*, 2003). Divers facteurs d'erreurs peuvent être identifiés lors de l'emploi de ces techniques : 1) le ruissellement lent issu de la fonte des neiges peut être confondu avec le débit de base (Rutledge, 1998), 2) les facteurs anthropiques induisant une modification des conditions d'écoulement naturel des eaux de surface (barrage, écluse, vidange de bassins, pompages dans la rivière...) (Barlow *et al.*, 2015, Sloto et Crouse, 1996) et 3) la présence de lacs ou de zones humides entraînant un drainage différé des eaux (Rutledge, 1998).

Afin d'estimer le débit de base de la rivière Kennebecasis, plusieurs outils graphiques ont été utilisés : PART (Rutledge, 1998), HYSEP (Sloto et Crouse, 1996) et BFI (Wahl et Wahl, 1988). Ces algorithmes supposent que le débit de base est égal au débit total du cours d'eau entre deux évènements pluvieux. Ces techniques sont donc basées sur la définition d'une durée de ruissellement de surface approchée par la relation suivante (Linsley *et al.*, 1982) :

$$N = A^{0.2} \tag{8}$$

où N : nombre de jours après lesquels le ruissellement cesse,

A : aire du bassin versant en mi<sup>2</sup> (1 km<sup>2</sup> =  $0.386 \text{ mi}^2$ ).

Ces approches présentent l'avantage d'être automatisées, mais peuvent être problématiques quand deux évènements pluvieux se superposent (Linsley *et al.*, 1982) et approximatives dans la définition de la durée de ruissellement déduite de l'aire du bassin (Sloto et Crouse, 1996). Afin d'appliquer ces méthodes graphiques, deux conditions suggérées par Rutledge (1998) devaient être respectées ; en l'occurrence une superficie du bassin versant comprise entre 3 et 1 300 km<sup>2</sup> et un relief marqué avec une pente supérieure à 1 % (Tableau 5.32).

En complément, les filtres de Chapman (Chapman, 1999) et de Furey et Gupta (Furey et Gupta, 2001) ont été appliqués sur la série quotidienne de débits de la station d'Apohaqui. Ces méthodes consistent à apposer manuellement un filtre passe-bas sur les données quotidiennes de débits afin d'extraire la composante basse fréquence du débit de la rivière associée au débit de base (Nathan et McMahon, 1990). Ces filtres sont rapides d'emploi et paraissent plus rigoureux que les approches graphiques (Furey et Gupta, 2001), mais le débit de base peut parfois être supérieur au débit de la rivière avec le filtre de Furey et Gupta (Rivard *et al.*, 2003).

Les diverses approches utilisées, bien que subjectives puisqu'elles ne sont pas basées sur la physique, offrent néanmoins une estimation du taux de recharge potentielle plutôt réaliste, lorsqu'appliquées sur une longue période de temps (Barlow *et al.*, 2015, Furey et Gupta, 2001, Rivard *et al.*, 2003, Rutledge, 1998). Healy (2010) précise toutefois que ces méthodes doivent être combinées à d'autres outils pour fournir une fourchette de valeurs afin d'augmenter le degré de confiance sur un bassin donné.

Le débit de base moyen de la rivière Kennebecasis a donc été approché en analysant les données de la station hydrométrique d'Apohaqui située à l'exutoire du bassin (Carte 1). Ce site offre une série continue du débit de la rivière depuis 1961 (Gouvernement du Canada, 2018b). Seules les données validées depuis 1980 ont été considérées afin de pouvoir procéder à une analyse comparative des diverses méthodes d'estimation du taux de recharge (Tableau 5.32).

Tableau 5.32 – Caractéristiques du bassin versant et débits enregistrés à la station hydrométrique d'Apohaqui, d'après les données du Gouvernement du Canada (2018b).

Station	Identifiant	Bassin versant			Donnáco	Débit (m³/s)				
		A (km <sup>2</sup> )	S <sub>moy</sub> <sup>1</sup> (%)	N (jrs)	Donnees	Min	Q1	Méd	Q3	Max
Apohaqui	01AP004	1 103	8.7	3.4	1962-2016	1.0	6.5	14.3	31.7	563.0
					1980-2016	1.1	6.2	14.6	32.3	563.0

<sup>1</sup>Pente moyenne du bassin versant.

En se référant à l'allure des courbes d'estimation du débit de base sur l'année hydrologique 2015-2016 (Figure 5.27), les méthodes graphiques mettent en évidence les éléments suivants :

1) PART : vis-à-vis des autres méthodes graphiques, ce modèle apparaît surestimer l'apport de l'aquifère en considérant le débit de base équivalent au débit total de la rivière sur une portion importante de la courbe de récession ;

2) BFI : par rapport aux autres méthodes graphiques, les deux algorithmes semblent sous-estimer le débit de base en identifiant moins de points sur l'hydrogramme ; ce qui est d'ailleurs aussi observé par Combalicer *et al.* (2008) ;

3) HYSEP : cette approche paraît être un bon compromis puisque définissant un débit de base intermédiaire lorsque comparé aux autres méthodes graphiques. L'algorithme du minimum local est d'ailleurs largement utilisé par la communauté scientifique (Rivard *et al.*, 2003).



Figure 5.27 – Comparaison des approches graphiques et par filtre utilisées dans l'estimation du débit de base sur l'année hydrologique 2015-2016.

L'analyse graphique des approches par filtre met en exergue les points suivants (Figure 5.27) :

1) Furey et Gupta : avec ce filtre, le débit de base excède le débit total de la rivière sur 28.7 % des données entre 1980 et 2016. Ce décalage des courbes s'explique probablement par l'emploi d'un facteur de retard de 3 jours des eaux souterraines par rapport au ruissellement (Rivard *et al.*, 2003). Afin d'appliquer ce filtre sur la série temporelle de débit de la rivière, le filtre de Furey et Gupta (2001) fait intervenir deux constantes pouvant être variables selon les caractéristiques du bassin. Dans le cas présent, les valeurs utilisées par Rivard *et al.* (2003) sur un bassin de 557 km<sup>2</sup> (1- $\gamma$  = 0.97 et C<sub>3</sub>/C<sub>1</sub> = 1.1), également proposées par Furey et Gupta (2001) pour une aire de drainage de 44.5 km<sup>2</sup>, ont été appliquées sur le bassin de la rivière Kennebecasis (1 100 km<sup>2</sup>). En utilisant les autres valeurs proposées par Furey et Gupta (2001) pour les deux constantes, l'allure de la courbe du débit de base dépassait à de nombreuses reprises l'enveloppe du débit total de la rivière et ne reproduisait pas le comportement « basse fréquence » attendu lié à la contribution des eaux souterraines. Par conséquent, le débit de base estimé représentait plus de 85 % du débit total de la rivière, une valeur peu probable au regard des caractéristiques du bassin telles que les pentes (Carte 10) et le coefficient de ruissellement (Carte 14) ;

2) Chapman : avec ce filtre, le débit de base n'excède jamais le débit total de la rivière. De plus, l'allure des courbes indique une meilleure représentation de la contribution de l'aquifère que ce soit lors des périodes de ruissellement ou pendant les périodes de récession. La constante de récession utilisée sur le bassin versant de la rivière Kennebecasis (k = 0.925) est celle proposée et mise en application par Chapman (1999) sur un bassin de 2 500 km<sup>2</sup> et conseillée par Nathan et McMahon (1990) sur des bassins de 4.2 à 102 km<sup>2</sup>. En testant deux autres constantes utilisées par Nathan et McMahon (1990), c'est-à-dire 0.900 et 0.950, le débit de base varie respectivement entre 370 et 377 mm/an. Le peu de variations constatées entre ces valeurs confirme donc le choix de la valeur intermédiaire de 0.925 comme constante de récession.

Finalement, en comparant les débits de base moyens estimés par ces deux dernières méthodes entre 1980 et 2017 (Figure 5.28, Figures VI.1 à VI.12 et Tableaux VI.1 et VI.2), les observations déduites de l'analyse graphique précédente se confirment. Selon les méthodes, le débit de base médian estimé est élevé, variant de 355 à 494 mm/an pour un débit total de la rivière égal à 753 mm/an. La méthode graphique HYSEP utilisant le minimum local fournit une valeur intermédiaire à 419 mm/an par rapport aux autres méthodes graphiques. Les valeurs déduites des filtres de Chapman et Furey et Gupta sont d'ailleurs similaires aux résultats issus de la méthode HYSEP du minimum local puisque respectivement égales à 377 et 388 mm/an.



Figure 5.28 – Comparaison des méthodes utilisées pour le calcul du débit de base de la rivière entre 1980 et 2016.

La contribution de l'aquifère au débit de la rivière peut être approchée en calculant l'indice du débit de base (BFI) représentant la proportion du débit de base ( $Q_B$ ) par rapport au débit total de la rivière ( $Q_R$ ). Cet indice varie de 0.477 à 0.677 et indique donc un écart potentiel de 20 % selon les approches (Tableau 5.33). Les filtres et la méthode du minimum local du modèle HYSEP offrent les résultats intermédiaires les plus probables avec une contribution de l'aquifère comprise entre 50 et 62 % du débit total du cours d'eau.

Tableau 5.33 – Résultats des estimations du débit de base (Q <sub>B</sub> ) et de l'indice du débit de base (BFI	)
sur le bassin de la rivière Kennebecasis entre 1980 et 2016.	

Paramètre			Filtres						
		HYSEP			BF	:I		Eurov of	
	PART	Intervalle Fixe	Minimum Local	Intervalle Glissant	Standard	Modifié	Chapman	Gupta	
Q <sub>B</sub> <sup>1</sup> (mm/an)	504	460	416	462	359	355	371	390	
BFI <sup>2</sup>	0.677	0.617	0.558	0.620	0.482	0.477	0.498	0.523	

<sup>1</sup>Débits initiaux (m<sup>3</sup>/s) convertis en débits annuels rapportés à la surface du bassin (mm/an).

<sup>2</sup>Calculé à partir du débit total moyen de la rivière égal à 745 mm/an.

Les trois approches sélectionnées (HYSEP-Minimum Local, filtres de Chapman et de Furey et Gupta) fournissent des résultats semblables (Tableau 5.33). Bien qu'il soit difficile d'évaluer la performance de telle ou telle méthode et de choisir l'approche appropriée selon les caractéristiques morphologiques du bassin versant (Nathan et McMahon, 1990), un choix basé sur le jugement professionnel a dû être fait. Le filtre de Chapman a finalement été retenu en se basant sur plusieurs éléments : 1) l'allure de la courbe du débit de base semble mieux représenter la contribution « basse fréquence » de l'aquifère (Figure 5.27), 2) il fournit une valeur intermédiaire du débit de base entre 1980 et 2016 vis-à-vis des autres méthodes testées (Figure 5.28), 3) ce filtre est en effet plus rigoureux que le filtre de Furey et Gupta, notamment lors des périodes de récession, 4) il est également plus simple d'utilisation que la méthode graphique HYSEP et enfin 5) il est très largement utilisé par la communauté scientifique. De plus, en se basant sur des analyses comparatives similaires (Benhamanne, 2002, Rivard *et al.*, 2003), cette approche s'avère être la plus représentative du système aquifère à l'échelle du bassin. Ce filtre a donc été utilisé pour caler le modèle d'infiltration quasi-2D HELP (Section 5.6.4).

En se basant sur les variations annuelles des composantes du bilan hydrologique (Tableau 5.34), la part attribuable au débit de base ( $Q_B$ ) est équivalente à celle du ruissellement de surface (RS) et similaire à l'évapotranspiration (ETR). Les variations pluriannuelles (Figure 5.29) suggèrent qu'il est primordial d'évaluer la contribution de l'aquifère sur une longue période de temps pour mieux contraindre les estimations du débit de base. Dans tous les cas, cette méthode surévalue la recharge de l'aquifère rocheux, car elle ne permet pas de calculer la part de ruissellement hypodermique (RH).

Tableau 5.34 – Composantes moyennes annuelles du bilan hydrologique obtenues avec le filtre de Chapman sur le bassin de la rivière Kennebecasis entre 1980 et 2016, leur contribution est fournie entre parenthèses.

Station	P <sub>tot</sub> (mm/an)	ETR (mm/an)	Q <sub>R</sub> (mm/an)	Q <sub>B</sub> (mm/an)	R	RS (mm/an)	RH
Sussex Bis	1 155 (100 %)	417 (36 %)	745	371 (32 %)	-	374 (32 %)	-

Sur la figure 5.29, les faibles et étonnantes valeurs d'évapotranspiration (ETR) à partir de l'année 2009 proviendraient des données climatiques disponibles. En effet, la collecte des données pluviométriques à la station de Sussex s'arrête en 2009 et ne reprend qu'en 2015 à la station de Sussex Four Corners (Tableau 5.29). Entre 2009 et 2015, les données ont été comblées à partir de stations proches de la Baie de Fundy (Tableau 5.30), sans doute moins représentatives des conditions localement rencontrées sur le secteur d'étude.


Figure 5.29 – Bilan hydrologique annuel avec le filtre de Chapman entre 1980 et 2016.

Les variations mensuelles du débit de base (Figure 5.30) sont très marquées durant l'année. Le débit de base est maximal en mai, bien que sans doute exagéré par le processus lent de la fonte des neiges. La principale période de recharge survient entre mars et, mai, mais une recharge importante s'effectue également entre octobre et janvier. Cette recharge hivernale est possible à cause des redoux fréquents et du climat adouci par la présence de grands plans d'eau dans cette région. La recharge potentielle décroit très largement entre juillet et septembre, principalement à cause de l'évapotranspiration qui est maximale entre juin et septembre, mais également en raison de la faible quantité de précipitations en juillet et août (Section 3.3).



Figure 5.30 – Débit de base mensuel estimé avec le filtre de Chapman entre 1980 et 2016.

#### 5.6.4 Distribution spatiale de la recharge avec le modèle quasi-2D HELP

Afin d'obtenir une estimation de la recharge distribuée sur le territoire, le modèle *HELP* (*Hydrological Evaluation of Landfill Performance*) développé par Schroeder *et al.* (1994) a été utilisé. Il s'agit d'un modèle hydrologique quasi-2D basé sur la physique (Schroeder *et al.*, 1994) et largement employé dans le cadre d'études régionales de caractérisation hydrogéologique dans des contextes climatiques similaires au Québec et en Nouvelle-Écosse (Croteau *et al.*, 2010, Pratte, 2008, Rivard *et al.*, 2014c).

Le principe est de simuler le mouvement de l'eau vers la nappe pour fournir un bilan hydrologique quotidien comprenant : 1) le ruissellement de surface (RS), 2) l'évapotranspiration réelle (ETR), 3) le ruissellement hypodermique (RH) et 4) la recharge (R) à partir des précipitations (P) (Figure 5.26). Ce modèle déterministe tient compte de nombreux processus : 1) l'accumulation de neige en surface, 2) la fonte de la neige, 3) le ruissellement de surface, 4) l'infiltration, 5) l'évapotranspiration potentielle, 6) la transpiration des plantes, 7), l'évapotranspiration des sols, 8) le stockage d'eau dans le sol, 9) le ruissellement de sous-surface, 10) la percolation sous la zone racinaire et 11) le drainage latéral saturé (Schroeder *et al.*, 1994).

À l'origine, le programme *HELP* fonctionne à l'échelle d'une cellule unique. Un programme auxiliaire a permis de l'utiliser sur un large territoire en considérant une multitude de cellules présentant des propriétés distinctes. Les deux bassins ont donc été divisés en mailles de 250 x 250 m soit 49 011 mailles sur le bassin de la rivière Kennebecasis et 13 953 mailles sur le bassin de la rivière Pollett.

L'utilisation de ce modèle d'infiltration présente de nombreux avantages : 1) il utilise des données climatiques réelles, 2) il permet d'obtenir une distribution spatiale et temporelle de la recharge, 3) il est généralement fiable puisque basé sur les propriétés physiques des sols, 4) les résultats peuvent être calés à la fois sur le débit de base et le débit total d'un cours d'eau permettant ainsi de s'assurer de la cohérence du bilan hydrologique global et de l'obtention de valeurs représentatives de l'évapotranspiration (ETR) et du ruissellement de surface (RS), et finalement 5) ces résultats sont facilement exportables vers des outils de visualisation tels que les SIG.

130

Néanmoins, chaque cellule est considérée de façon indépendante dans l'estimation du bilan hydrologique et donc les écoulements entre les cellules voisines ne sont pas pris en compte. Il est alors impossible de reproduire des hydrogrammes de rivière, car le temps de parcours des diverses composantes vers le cours d'eau n'est pas considéré. Le calage avec le débit de la rivière est donc seulement possible sur une échelle de temps plus large, en général une année hydrologique. Le modèle présente également plusieurs autres limitations puisqu'il ne considère pas : 1) les facteurs anthropiques tels que les pompages et 2) les changements d'occupation des sols et de pratiques culturales durant la période d'analyse, ici de 1980 à 2016 (Croteau, 2006). De plus, il est reconnu qu'il surestime souvent la recharge (Rivard et al., 2014b) puisqu'une fois l'eau infiltrée sous la zone racinaire, celle-ci est difficilement évacuée hors de la cellule à moins d'avoir de forts contrastes de conductivités hydrauliques (supérieurs à deux ordres de grandeur). Une couche peu perméable a ainsi dû être intégrée dans le modèle conceptuel (Figure 5.31) afin de pouvoir générer du ruissellement hypodermique et limiter la percolation de l'eau sous les racines. De plus, le programme HELP reproduit difficilement certains processus comme la fonte des neiges. Sachant que les paramètres contrôlant le modèle de fonte sont inaccessibles aux usagers de HELP; il pourrait être utile de le programmer de nouveau afin d'optimiser les résultats.

En réalisant une estimation de la recharge de l'aquifère au roc sur une période de 37 années, les variations d'emmagasinement d'eau dans le sol sont faibles et peuvent donc être négligées dans le bilan hydrologique final (Croteau, 2006). La principale source d'erreur du modèle *HELP* réside dans la précision des nombreuses données d'entrée du modèle. Il est ainsi particulièrement important de caler les paramètres du modèle afin que ce dernier soit représentatif du système.

Le modèle d'infiltration *HELP* considère chaque cellule du maillage comme un profil vertical de sol divisé en couches ayant des propriétés spécifiques. Trois types de couches sont modélisés dans le programme : 1) une couche de percolation verticale (type 1), 2) une couche de drainage latéral (type 2) et 3) une couche barrière (type 3) (Schroeder *et al.*, 1994).

Dans un premier temps, un modèle conceptuel de recharge a été défini afin de distinguer : 1) les unités de sol, 2) les dépôts meubles et 3) le roc. La base de la cellule est représentée par le niveau de nappe en condition libre (Figure 5.31). Sur le territoire, 13 profils verticaux distincts sont rencontrés ; allant d'une unique couche lorsque le roc affleure à six couches quand la séquence stratigraphique est complète (Tableaux VII.1 et VII.2). Deux simplifications ont été faites sur le bassin : 1) l'épaisseur de sol a été limitée à 1 m selon le profil type défini par Aalund et Wicklund (1950) (Figure 3.11) et 2) les mailles avec une épaisseur de dépôts superficiels inférieure à 1 m ont été assimilées à du roc affleurant comme suggéré par Croteau (2006) (Figure 5.32).

Ensuite, les mailles sans recharge ont été identifiées sur le territoire selon une approche similaire à Croteau (2006). Elles sont définies 1) par des étendues majoritairement constituées d'eau exclues du bilan hydrologique (ex. : rivières, étangs ou lacs) ou 2) par des zones de résurgence où la recharge est convertie en ruissellement hypodermique (Tableau 5.35) puisque la recharge ne peut pas se rendre à l'aquifère au roc dans les secteurs de résurgence.

Zone de Bassins versant		Kei	Kennebecasis			Poll	ett	Action		
recharge nulle	Km <sup>2</sup>	%	Mailles	Km <sup>2</sup>	%	Mailles	Km <sup>2</sup>	%	Mailles	Action
Plan d'eau <sup>1</sup>	91	6	4 113	77	7	3 492	14	4	621	Exclus du bilan
Résurgence	143	10	6 363	107	10	4 734	37	12	1 629	Inclus dans le bilan
Total	234	17	10 476	184	17	8 226	51	16	2 250	

Tableau 5.35 – Définition des zones de recharge nulle.

<sup>1</sup>Les cours d'eau considérés comprennent les rivières Kennebecasis, Millstream, Pollett et Bras Sud ainsi que les principaux ruisseaux McLoed, Smiths et Trout.

Ainsi, les mailles localisées à l'intérieur 1) des lacs de plus de 25 000 m<sup>2</sup>, 2) dans une zone tampon de 10 m autour des cours d'eau principaux ou 3) sur les secteurs où la nappe est supérieure à la surface du sol sont exclues du bilan hydrologique. Pour les 4 113 mailles caractérisées par de l'eau, aucun bilan hydrologique n'a été estimé avec *HELP*. Quant aux zones caractérisées par un gradient d'écoulement vertical ascendant, elles sont définies par les mailles incluses 1) dans une zone tampon de 350 m autour des principaux cours d'eau ou 2) sur les secteurs où la nappe est relativement proche de la surface du sol. Ces zones de résurgence représentent 6 363 mailles sur le territoire. Au total, 10 476 mailles sur 62 964 soit environ 17 % des cellules sont donc considérées comme des zones sans recharge.

La procédure d'estimation de la recharge avec le modèle *HELP* s'inspire fortement des travaux de Croteau (2006) (Figure 5.32). Le modèle considère plusieurs types de données d'entrée : 1) les données climatiques quotidiennes, 2) les propriétés liées au processus de drainage, 3) les paramètres influençant l'évapotranspiration et finalement 4) les caractéristiques du sol intégrées dans le modèle conceptuel.

Les données climatiques quotidiennes utilisées sur les 37 années de simulation sont issues de la station « Sussex Bis » (Figure I.8 et Tableau I.1) et comprennent les précipitations journalières et les températures moyennes quotidiennes.

Le rayonnement solaire a été généré sur une base quotidienne entre 1980 et 2016 avec *HELP*. Ces données synthétiques ont alors été comparées à d'autres outils (Tableau 5.36 et Figure VII.1).





Données	Туре	Période	Commentaire
CWEEDS	Terrestre	1953-2005	Station terrestre localisée à Moncton
SUNY	Satellite	2002-2008	Extraction des données à Moncton
NASA POWER	Satellite	1983-2017	Extraction des données à Moncton
HELP	Synthétique	1980-2016	Données synthétiques générées à Sussex

Tableau 5.36 – Données utilisées pour le calcul du rayonnement solaire.

Comme attendu, le rayonnement solaire est maximal en été quand le couvert nuageux est faible et ce, quelle que soit la source (Figures VII.2 à VII.5). Aucune méthode ne permet de prédire la valeur du rayonnement solaire en fonction de l'intensité des précipitations (Figure VII.6). Toutefois, en considérant l'ensemble des précipitations, les droites de corrélation sont semblables entre les divers outils. Bien que 70 km séparent les villes de Sussex et Moncton, la distribution en cloche du rayonnement solaire au cours de l'année est similaire entre les données réelles et synthétiques (Figure VII.7). De plus, l'histogramme combiné de fréquence indique également une certaine similitude entre les sources de données (Figure VII.8). Par conséquent, les données synthétiques générées par HELP sont considérées fiables à l'échelle du territoire.

Les trois dernières données climatiques comprises dans *HELP* incluent : 1) la vitesse moyenne annuelle du vent (Tableau VII.3), 2) l'humidité relative trimestrielle (Tableau VII.4) et 3) les périodes sans gel (Tableau VII.5) utiles à la définition de la saison de croissance des végétaux. Ces données sont basées sur les normales climatiques à la station de Moncton A entre 1981 et 2010 fournies par le Gouvernement du Canada (2018a).

Les paramètres influençant le processus de drainage incluent : 1) le coefficient de ruissellement, 2) la pente de drainage et 3) la distance de drainage (Figure 5.32).

Le ruissellement est approché par la méthode développée par le Service de Conservation des Sols (SCS) du Ministère de l'Agriculture des États-Unis (USDA). Cette méthode a ensuite été modifiée par Monfet (1979) pour l'appliquer au contexte québécois, et par extension aux conditions rencontrées au Nouveau-Brunswick, puis adaptée par Croteau (2006) afin de ne pas tenir compte de la condition hydrologique. Elle a pour objectif de prédire le volume ruisselé suite à un évènement pluvieux donné en déterminant le numéro de courbe défini par 1) la pente du sol, 2) son utilisation et 3) sa texture (Figure 5.33).

La carte des pentes de la surface du sol (Carte 10) a été établie à partir du Modèle Numérique de Terrain (GeoNB, 2002) puis divisée en trois classes selon Monfet (1979) (Tableau VII.6 et Figure VII.9).





Ensuite, la couverture du sol a été utilisée (GéoBase, 2009) puis simplifiée afin de produire 5 classes d'utilisation du sol (Tableau VII.7). Cette carte d'utilisation du sol (Carte 12) constitue un instantané de l'occupation du sol en 2009 (Tableau VII.8 et Figure VII.10) que le modèle *HELP* considère inchangé entre 1980 et 2016.

Enfin, la définition du numéro de courbe considère également la texture du sol basée sur les unités pédologiques (Carte 5) comme suggérée par Monfet (1979). Les descriptions des sols fournies par le Département provincial de l'Agriculture du Nouveau-Brunswick (Provincial Department of Agriculture, 1948a, Provincial Department of Agriculture, 1948b, Provincial Department of Agriculture, 1949) ont alors permis de classer les sols en quatre groupes (Tableau VII.9) selon la classification de Monfet (1979) (Tableau 5.37). La carte des groupes hydrologiques (Carte 13) indique essentiellement la présence des groupes hydrologiques B et C sur le territoire (Tableau VII.10 et Figure VII.11).

Tableau 5.37 – Groupes hydrologiques des différents types de sols, d'après Monfet (1979).	

Groupe hydrologique	Description	Teneur en argile	Teneur en sable
A	Graviers et sables grossiers	Argile < 10 %	Sables + Graviers > 90 %
В	Sables moyens à fins	10 < Argile < 20 %	50 < Sables < 90 %
С	Sables fins mal drainés, sols limoneux et argiles perméables	20 < Argile < 40 %	Sables < 50 %
D	Argiles lourdes et sols minces	Argile > 40 %	Sables < 50 %

La compilation des trois paramètres précédents permet d'estimer le numéro de courbe à partir des indications de Monfet (1979) adaptée par Croteau (2006) (Tableau 5.38). La distribution du numéro de courbe sur les bassins (Carte 14) a permis de définir un coefficient de ruissellement de 71 % sur le territoire étudié (Tableau VII.11 et Figure VII.12).

Tableau 5.38 – Détermination du numéro de courbe en fonction de l'utilisation du sol, de la pente et du groupe hydrologique, d'après la classification de Monfet (1979) adaptée par Croteau (2006).

Litilization du col	Donto	G	Groupe hydrologique				
ounsation du soi	Pente	Α	В	С	D		
	< 3 %	62	72	79	82		
Culture intensive	3 - 8 %	64	76	84	88		
	> 8 %	70	80	87	90		
	< 3 %	32	51	72	79		
Culture extensive	3 - 8 %	44	65	77	82		
	> 8 %	59	74	83	87		
	< 3 %	24	54	68	76		
Boisé	3 - 8 %	33	59	73	79		
	> 8 %	44	66	78	83		
Résidentielle, commerciale c	73	83	88	90			
Résidentielle, commerciale peu	59	74	82	86			



Figure 5.33 – Procédure de production du coefficient de ruissellement à partir de la méthode du numéro de courbe et statistiques associées sur les bassins visés utilisée pour le bassin versant Kennebecasis.

En plus du coefficient de ruissellement, le drainage latéral intégré dans les couches de type 2 de *HELP* est contrôlé par deux facteurs : 1) la pente du drain et 2) la distance jusqu'au système collecteur (Schroeder *et al.*, 1994). Le premier est défini grâce à la topographie (Carte 10) bien que légèrement contraint par les limitations de HELP qui tient seulement compte des pentes comprises entre 0.50 et 50 % (Tableau VII.12 et Figure VII.13). Quant à la distance de drainage, elle est variable selon le type d'occupation des sols (Tableau 5.39). Ces simplifications permettent alors de définir la carte de la distance au drain (Carte 15) comprise entre 5 et 25 m selon l'utilisation du sol (Tableau VII.13 et Figure VII.14).

Tableau 5.39 – Attribution de la distance de drainage selon le type d'utilisation du sol, d'après Croteau (2006).

Utilisation du sol	Distance de drainage (m)		
Résidentielle, commerciale dense	5		
Résidentielle, commerciale peu dense	5		
Culture intensive	10		
Boisé	20		
Culture extensive	25		

L'évapotranspiration est contrôlée par plusieurs éléments dans le modèle d'infiltration : 1) le couvert végétal pouvant intercepter une partie des précipitations, 2) la profondeur racinaire définissant la limite maximale à laquelle l'eau peut être soutirée par évapotranspiration et 3) la période de croissance des végétaux (Schroeder *et al.*, 1994).

Le couvert végétal est défini par l'indice de surface foliaire (LAI) représentant la densité du couvert végétal au sol (Schroeder *et al.*, 1994). Cet indice a été approché à partir de la distribution de la végétation extraite de la couverture du sol (Tableau VII.14 et Figure VII.15) en utilisant des valeurs références issues de la bibliographie pour chaque espèce végétale (Tableau VII.15). La carte obtenue (Carte 17) représente la distribution du LAI sur le territoire (Tableau VII.16 et Figure VII.16) sachant que HELP ne considère pas les indices de surface foliaire supérieurs à cinq. De plus, en se basant sur la carte d'épaisseur des dépôts meubles (Carte 7), l'indice de surface foliaire a été considéré comme nul pour les secteurs de roc affleurant. En effet, ces zones sont généralement dépourvues de végétation.

Afin de pouvoir modéliser le processus d'évapotranspiration dans le profil de sol, la zone d'évapotranspiration a été assimilée à la profondeur de pénétration des racines (Croteau *et al.*, 2010). Le programme HELP impose une profondeur minimale d'un centimètre et limite cette zone d'évapotranspiration au toit de la première couche étanche de type 3 rencontrée (Schroeder *et al.*, 1994), soit généralement 50 cm dans le cadre de la présente étude (Figure 5.31). Cette « barrière étanche » a été intégrée dans la succession typique des couches du territoire en se référant à la coupe pédologique de sol de Aalund et Wicklund (1950) (Figure 3.11) dans laquelle l'horizon de sol dit « horizon C » est généralement plus compacté et moins affecté par les phénomènes érosifs sus-jacents. La profondeur des racines a été déterminée à partir de la répartition des diverses cultures sur le territoire (Tableau VII.17, Figure VII.17 et Carte 16) en se basant sur des valeurs typiques extraites de la littérature existante (Tableau VII.18). La carte finale obtenue (Carte 18) représente la distribution de la profondeur des racines sur la région d'étude (Tableau VII.19 et Figure VII.18). La profondeur des racines est limitée à 1 cm sur les secteurs de roc affleurant, définis à partir de la carte d'épaisseur des dépôts meubles (Carte 7). En effet, sur ces zones, l'absence de sol limite généralement le développement des racines.

La période de croissance des végétaux a été déterminée à partir des données climatiques du Gouvernement du Canada (2018a) et plus particulièrement de la période moyenne sans gel (Tableau VII.5). L'indice de surface foliaire (LAI) est directement relié à la saison de croissance des végétaux. En effet, le LAI est seulement considéré dans HELP sur l'intervalle de temps où la croissance de la végétation est possible (Croteau, 2006).

Chaque couche de la colonne stratigraphique verticale a ensuite été décrite selon 1) son épaisseur totale et 2) ses propriétés hydrauliques.

L'épaisseur des horizons de sol a été limitée à 1 m pour qu'elle soit représentative du profil de sol généralement rencontré sur la région d'étude (Aalund et Wicklund, 1950) tandis que l'épaisseur des sédiments quaternaires a été définie à partir de la carte d'épaisseur des dépôts meubles obtenue par krigeage ordinaire (Carte 7).

Les propriétés des couches incluses dans la séquence stratigraphique comprenaient 1) la porosité totale (n), 2) la capacité au champ ( $\theta_{FC}$ ), 3) le point de flétrissement ( $\theta_{WP}$ ) et 4) la conductivité hydraulique saturée (K<sub>s</sub>) (Tableaux 5.40 et 5.41). Les trois premières sont basées sur les valeurs fournies par *HELP* (Schroeder et al., 1994), excepté pour le roc dont la porosité provient des analyses sur les carottes (Section 4.3.4) et les valeurs de capacité au champ et du point de flétrissement sont issues d'une étude réalisée également dans les Maritimes sur une formation similaire (Rivard *et al.*, 2014c).

139

Unité	n	θ <sub>FC</sub>	θωρ	K <sub>s</sub> (m/s)
Alluvions	0.397	0.032	0.013	3.00x10 <sup>-3</sup>
Colluvions	0.417	0.045	0.018	8.00x10 <sup>-6</sup>
Dépôts de contact glaciaire	0.397	0.032	0.013	3.00x10 <sup>-3</sup>
Dépôts fluvio-glaciaires	0.397	0.032	0.013	3.00x10 <sup>-3</sup>
Roc	0.060	0.090	0.050	1.80x10⁻⁵
Till	0.417	0.045	0.018	8.00x10 <sup>-6</sup>
Till d'ablation	0.397	0.032	0.013	3.00x10 <sup>-3</sup>

Tableau 5.40 – Propriétés des dépôts meubles et du roc intégrées dans HELP.

Tableau 5.41 – Propriétés des unités pédologiques intégrées dans HELP.

Unité	n	θες	θωρ	K₅ théorique¹ (m/s)	K <sub>s</sub> équivalente <sup>2</sup> (m/s)
Argile	0.475	0.378	0.265	1.70x10 <sup>-7</sup>	4.46x10 <sup>-8</sup>
Argile silteuse	0.479	0.371	0.251	2.50x10 <sup>-7</sup>	6.56x10 <sup>-8</sup>
Limon argileux	0.464	0.310	0.187	6.40x10 <sup>-7</sup>	1.68x10 <sup>-7</sup>
Silt	0.398	0.244	0.136	1.20x10 <sup>-6</sup>	3.15x10 <sup>-7</sup>
Limon silteux	0.501	0.284	0.135	1.90x10 <sup>-6</sup>	4.99x10 <sup>-7</sup>
Limon	0.463	0.232	0.116	3.70x10 <sup>-6</sup>	9.72x10 <sup>-7</sup>
Limon sableux	0.453	0.190	0.085	7.20x10 <sup>-6</sup>	1.89x10 <sup>-6</sup>
Sable limoneux	0.437	0.105	0.047	1.70x10 <sup>-5</sup>	4.46x10 <sup>-6</sup>
Sable	0.437	0.062	0.024	5.80x10 <sup>-5</sup>	1.52x10⁻⁵

<sup>1</sup>Extrait de HELP.

<sup>2</sup>Calculée après calage.

La valeur de la conductivité hydraulique saturée a été fixée suite aux essais de perméabilité réalisés sur les tills (Section 5.1.3) et le roc (Section 5.3.2). Pour les autres types de dépôts meubles, les données sont issues des valeurs suggérées par Domenico et Schwartz (1990) (Tableau VII.20). Quant à la conductivité hydraulique saturée des unités de sol, une valeur théorique basée sur les valeurs extraites de *HELP* (Schroeder et al., 1994) a été attribuée dans un premier temps (Tableau VII.21) afin de procéder à l'analyse de sensibilité (Figure 5.32).

Cette analyse de sensibilité a été réalisée en considérant les 13 combinaisons stratigraphiques possibles sur le territoire afin de prioriser les paramètres à mesurer et mieux quantifier pour le calage (Figures VII.19 à VII.36). Les caractéristiques physiques faisant varier le plus le taux de recharge de l'aquifère au roc sont : 1) les conductivités hydrauliques des horizons de sol, 2) la profondeur d'évapotranspiration, 3) la période de croissance végétale et 4) l'indice de surface foliaire (LAI) (Tableau 5.42)..

Paramètre	Intervalle de variation	Valeurs extrêmes de recharge (mm)	Écart maximal de recharge (mm)	Écart maximal de recharge par rapport aux précipitations (%)
Épaisseur de la couche de sol 3 (barrière)	5 - 50 cm	443 - 447	4	0
Pente du drain	0.8 - 49.9 %	443 - 447	4	0
Distance au drain	0 - 800 m	442 - 447	5	0
Épaisseur de la couche de till basal 5 (percolation verticale)	5 - 200 cm	443 - 448	5	0
$K_s$ de la couche de till basal 5 (percolation verticale)	2.0x10 <sup>-7</sup> - 9.0x10 <sup>-5</sup> m/s	438 - 447	9	1
Vitesse moyenne annuelle du vent	13 - 19 km/h	437 - 451	14	1
Latitude de la station météorologique	45.59 - 45.95 °	432 - 456	24	2
Moyenne de l'humidité relative sur l'année	64.5 - 87 %	418 - 447	28	2
Coefficient de ruissellement (CN)	24 - 90	424 - 456	31	3
Épaisseur totale des couches de sol	10 - 100 cm	101 - 139	37	3
Fin de la période de croissance végétale	256 <sup>ème</sup> au 282 <sup>ème</sup> jour	427 - 475	47	4
Début de la période de croissance végétale	127 <sup>ème</sup> au 160 <sup>ème</sup> jour	433 - 577	125	11
Épaisseur de la couche de sol 2 (drainage latéral)	1 - 40 cm	446 - 578	132	11
Épaisseur de la couche de sol 1 (percolation verticale)	1 - 10 cm	443 - 592	150	13
Indice de surface foliaire (LAI)	0 - 5	432 - 705	272	24
Période de croissance végétale	96 - 155 jours	427 - 730	303	26
Profondeur d'évapotranspiration	1 - 100 cm	367 - 729	362	31
K <sub>s</sub> de la couche de sol 3 (barrière) <sup>1</sup>	1.0x10 <sup>-11</sup> - 6.0x10 <sup>-3</sup> m/s	5 - 456	451	39
K <sub>s</sub> de la couche de sol 2 (drainage latéral) <sup>1</sup>	1.0x10 <sup>-11</sup> - 6.0x10 <sup>-3</sup> m/s	5 - 529	525	45
$K_s$ de la couche de sol 1 (percolation verticale) <sup>1</sup>	1.0x10 <sup>-11</sup> - 6.0x10 <sup>-3</sup> m/s	0 - 551	551	48
<sup>1</sup> Paramètres de calage.				

## Tableau 5.42 – Sensibilité à la recharge pour les paramètres testés.

Le taux de recharge est particulièrement sensible à la conductivité hydraulique du sol (couche pédologique) qui a donc été utilisée comme paramètre principal pour le calage. Les paramètres secondaires considérés lors du processus de calage comprenaient l'indice de surface foliaire et la profondeur de la zone d'évapotranspiration, puisque la période de croissance des plantes ne peut pas être significativement modifiée. De plus, les trois paramètres physiques considérés s'avèrent être les plus incertains puisqu'uniquement basés sur des informations issues de la littérature. En effet, lors des essais au perméamètre de Guelph, le matériel parent, soit les tills, a été atteint dans la mesure du possible tout en évitant au maximum de rester dans la zone racinaire et dans les horizons de sol. L'ensemble des autres paramètres d'entrée a été fixé dans *HELP*.

Les paramètres physiques d'entrée du modèle *HELP* ont été calés à partir des composantes du bilan hydrologique obtenues par la séparation des hydrogrammes de rivières (Section 5.6.3) afin de s'assurer que le taux d'infiltration annuel, c'est-à-dire le ruissellement hypodermique et la recharge au roc, soit cohérent avec le débit de base. En parallèle, la comparaison avec le débit total de la rivière permet ensuite de vérifier les estimations annuelles de l'évapotranspiration obtenues avec *HELP* et de garantir une certaine indépendance des résultats. Le calage a donc seulement concerné le bassin de la rivière Kennebecasis puisqu'étant l'unique bassin disposant d'une station hydrométrique. Ce calage a permis de définir les valeurs d'indice de surface foliaire (Carte 17) et de profondeur d'évapotranspiration (Carte 18) à imposer sur le territoire. La conductivité hydraulique saturée des horizons de sol a été calée afin d'obtenir des composantes du bilan hydrologique approchant celles obtenues à partir du filtre de Chapman. Une conductivité hydraulique équivalente du sol a alors été déterminée en se basant sur la moyenne harmonique des conductivités hydrauliques de chaque horizon (Jang *et al.*, 2011). Les valeurs obtenues selon le type de sol s'approchent d'ailleurs des valeurs théoriques extraites de *HELP* (Tableau 5.41).

Les résultats du calage sont satisfaisants au regard des incertitudes liées aux nombreuses simplifications et hypothèses du modèle d'infiltration (Figure 5.34). Quelle que soit la composante du bilan hydrologique, le modèle *HELP* reproduit bien les variations interannuelles, mais semble atténuer les valeurs extrêmes et surestimer l'évapotranspiration. Deux facteurs peuvent expliquer cette surestimation : 1) les changements temporels des pratiques culturales ne sont pas pris en compte et 2) les paramètres utilisés ici dans le calcul de l'évapotranspiration proviennent uniquement des données issues de la littérature. L'intensité et la durée des précipitations peuvent expliquer forte pluie de courte durée aura un impact plus rapide sur le débit de la rivière, mais sera atténuée dans *HELP*, car ce dernier utilise les données climatiques sur une base quotidienne.



Figure 5.34 – Variations des composantes du bilan hydrologique avec le filtre de Chapman et le modèle HELP entre 1980 et 2009 en utilisant les données climatiques continues de la station de Sussex et les débits de la rivière Kennebecasis enregistrés à la station hydrométrique d'Apohaqui.

Le taux de recharge à l'aquifère rocheux est cohérent avec les variations du débit de la rivière puisque toujours inférieur à ce dernier. Des valeurs du même ordre de grandeur que les débits de la rivière ont été reproduites à la station de jaugeage (Figure 5.34). La reproduction du débit total de la rivière indique une bonne cohérence dans les estimations de *HELP* avec toutefois une légère sous-estimation sûrement reliée à la surévaluation de l'évapotranspiration. Toutefois, les variations interannuelles de débit total du cours d'eau entre 1980 et 2009 sont bien modélisées, confirmant alors que le modèle d'infiltration *HELP* devrait donc assez bien reproduire la réponse du système hydrologique. Le décalage observé à partir de 2009 est vraisemblablement dû aux données climatiques disponibles puisque les enregistrements à la station de Sussex s'arrêtent en 2009 avant de reprendre en 2015 à la station de Sussex Four Corners (Section 5.6.2). Les six années manquantes ont été comblées à partir de données climatiques de stations proches de la Baie de Fundy ne reproduisant pas exactement les conditions réellement rencontrées sur le bassin (Figure 1.5).

Ainsi, entre 1980 et 2009, le débit de base et le débit total annuels calculés avec HELP ont été comparés au débit total mesuré à la station de jaugeage d'Apohagui et au débit de base avec le filtre estimé de Chapman. Sur la figure 5.35, la corrélation est généralement satisfaisante entre les estimations et les données réelles. Le modèle d'infiltration semble toutefois légèrement sous-estimer les débits en raison d'une évapotranspiration quelque peu surestimée.



Figure 5.35 – Comparaison entre les débits de base et les débits totaux estimés avec HELP et ceux mesurés à la station hydrométrique d'Apohaqui entre 1980 et 2009 sur la rivière Kennebecasis ; le débit de base étant calculé avec le filtre de Chapman (Section 5.6.3).

Une fois le calage jugé satisfaisant, les composantes du bilan hydrologique ont été estimées à partir des données de la station « Sussex Bis » entre 1980 et 2016 (Tableau 5.43). Sur le bassin de la rivière Kennebecasis, la recharge représente 27 % des précipitations totales, soit 305 mm/an. Ce taux de recharge s'explique notamment par une pluviométrie importante combinée à la perméabilité élevée des tills et du roc. La recharge varie beaucoup sur le bassin et peut atteindre plus de 800 mm/an là où le roc affleure (Carte 19). L'évapotranspiration, composante majeure du bilan hydrologique, représente 47 % des précipitations (Carte 20), vraisemblablement à cause de l'occupation des sols du territoire où les boisés et les cultures sont majoritaires. Le ruissellement de surface, largement contrôlé par les paramètres du numéro de courbe, représente 22 % des précipitations totales (Carte 21). Finalement, le ruissellement hypodermique est minime sur le territoire représentant 4 % des précipitations (Carte 22).

Tableau 5.43 – Composantes moyennes annuelles du bilan hydrologique obtenues avec le modèle d'infiltration quasi-2D HELP sur le bassin de la rivière Kennebecasis entre 1980 et 2016.

Station	P <sub>tot</sub> (mm/an)	ETR (mm/an)	$\mathbf{Q}_{R}$	RP (mm/an)	R (mm/an)	RS (mm/an)	RH (mm/an)
Sussex Bis	1 155 (100 %)	544 (47 %)	-	354 (31 %)	305 (27 %)	253 (22 %)	49 (4 %)

Le taux de recharge a également été estimé sur le bassin de la rivière Pollett en se basant sur les mêmes paramètres physiques. Ce travail a été réalisé afin de tenir compte des données climatiques de l'unique station météorologique localisée sur ce bassin secondaire, celle de Mechanic Settlement. Toutefois, pour assurer une continuité entre les deux bassins, il a été décidé de conserver les estimations des composantes du bilan hydrologique déduites des données climatiques de la station « Sussex Bis ». En utilisant l'un ou l'autre des jeux de données, les résultats sont semblables (Tableau 5.44). Le bilan hydrologique présente toutefois quelques différences lorsque comparé avec le bassin de la rivière Kennebecasis. En effet, la recharge représente seulement 21 % des précipitations totales (Carte 23), principalement à cause du ruissellement important (34 % des précipitations totales) dû à la topographie accidentée de ce bassin versant (Carte 25). L'évapotranspiration (Carte 24) et le ruissellement de sous-surface (Carte 26) sont similaires à ceux estimés sur le bassin voisin puisqu'ils représentent respectivement 42 et 3 % des précipitations.

Tableau 5.44 – Composantes moyennes annuelles du bilan hydrologique obtenues avec le modèle d'infiltration quasi-2D HELP sur le bassin de la rivière Pollett entre 1980 et 2016.

Station	P <sub>tot</sub> (mm/an)	ETR (mm/an)	$\mathbf{Q}_{R}$	RP (mm/an)	R (mm/an)	RS (mm/an)	RH (mm/an)
Sussex Bis	1 155 (100 %)	481 (42 %)	-	281 (24 %)	242 (21 %)	390 (34 %)	39 (3 %)
Mechanic Settlement	1 245 (100 %)	565 (45 %)	-	248 (20 %)	216 (17 %)	429 (35 %)	32 (3 %)

#### 5.6.5 Bilan en eau de surface et calage d'hydrogrammes de puits (modèle GWHAT)

Cette méthode d'estimation de la recharge combine un bilan hydrologique de surface ou « Soil Moisture Balance » (SMB) avec un bilan en eau d'un aquifère libre autrement appelé « Aquifer Water Budget » (AWB) (Figure 5.26). Cette approche a d'abord été appliquée par Baalousha (2005) puis adaptée aux conditions climatiques humides par Lefebvre *et al.* (2011) et enfin automatisée avec *GWHAT* par Gosselin *et al.* (2017).

Le principe est donc 1) d'estimer le taux quotidien de recharge potentielle avec un bilan hydrologique de surface simplifié, puis 2) de calculer les fluctuations du niveau de nappe avec la porosité de drainage (S<sub>y</sub>) de l'aquifère libre tout en tenant compte des périodes de récession du niveau de nappe lorsque la recharge est considérée négligeable (Gosselin, 2016). Le taux de recharge est finalement calculé en comparant les fluctuations observées de la nappe avec celles prédites par la courbe maîtresse de récession (CMR) (Lefebvre *et al.*, 2011).

Durant la procédure, trois paramètres hydrologiques sont optimisés en calant l'hydrogramme simulé avec l'hydrogramme mesuré : 1) la réserve en eau utile maximale ( $RAS_{max}$ ), 2) le coefficient de ruissellement ( $C_{RO}$ ) et 3) la porosité de drainage ( $S_y$ ). L'optimisation du modèle est réalisée avec la méthode GLUE pour « Generalized Likelihood Uncertainty Estimation » permettant également d'évaluer les incertitudes sur chaque hydrogramme synthétique produit (Gosselin, 2016).

Le couplage de ces deux méthodes classiques d'estimation de la recharge présente de nombreux avantages. Cette technique permet de mieux reproduire la recharge diffuse par rapport à l'utilisation de la méthode des fluctuations de la nappe seule (WTF), qui la sous-estime généralement (Lefebvre *et al.*, 2011), notamment en contraignant mieux la valeur de porosité de drainage, généralement inconnue. Le programme *GWHAT* définit la courbe maîtresse de récession (CMR) de façon automatique, minimisant ainsi le temps d'analyse des hydrogrammes par les méthodes graphiques classiques (Gosselin, 2016). De même, l'utilisation d'une procédure d'optimisation automatisée réduit la subjectivité des procédures de validation graphiques habituelles (Gosselin, 2016). En plus, cette méthode nécessite peu de données d'entrée puisqu'elle se base seulement sur des données climatiques quotidiennes, incluant les précipitations totales et les températures de l'air, et sur un suivi des niveaux de nappe journalier, ce qui réduit considérablement les incertitudes (Baalousha, 2005). Dans l'ensemble, cette approche est donc simple d'utilisation, peu coûteuse, rapide et efficace (Gosselin, 2016, Lefebvre *et al.*, 2011).

Lefebvre *et al.* (2011) et Gosselin (2016) précisent toutefois la nécessité d'appliquer cette approche sur une longue période temps (si possible, quelques années) afin d'obtenir un taux de recharge représentatif. Dans la méthode classique utilisant les hydrogrammes de puits, l'incertitude provient essentiellement de la détermination d'une valeur représentative de la porosité de drainage ( $S_y$ ) pour un aquifère donné. En effet, il est souvent difficile d'obtenir une valeur de  $S_y$  permettant de bien reproduire les fluctuations du niveau de la nappe dans un bilan d'eau théorique puisque ce paramètre varie en profondeur et dans le temps (Delin *et al.*, 2007). Crosbie *et al.* (2005) tiennent compte de la variabilité verticale de  $S_y$  selon la profondeur en la déterminant à partir de trois méthodes distinctes : 1) des essais en laboratoire, 2) l'analyse de la réponse de la nappe après une pluie et 3) les données d'un essai de pompage historique. La porosité de drainage reste toutefois constante pour l'instant dans *GWHAT*. La réserve en eau utile maximale dans le sol (RAS<sub>max</sub>) et le coefficient de ruissellement (C<sub>RO</sub>) sont également deux paramètres difficiles à estimer de façon représentative. La distance de la station météorologique par rapport au puits peut aussi induire certains écarts entre l'hydrogramme synthétique et les mesures continues du niveau de nappe (Gosselin, 2016).

Dans un premier temps, les intervalles de récession ont été sélectionnés à partir des hydrogrammes de puits mesurés (Figures I.13 à I.21) afin de calculer l'équation définissant la CMR de chaque puits (Tableau I.3). Ensuite, la production des hydrogrammes synthétiques a nécessité la définition de valeurs plausibles pour les composantes du bilan hydrologiques (Tableau I.3). Ainsi, la distribution de la réserve en eau utile maximale dans le sol (RAS<sub>max</sub>) a été calculée sur chaque maille du territoire (Carte 27) à partir de la relation suivante (Rushton, 2003) :

$$RAS_{max} = 1000 * (\theta_{FC} - \theta_{WP}) * P_r$$
(9)

où	RAS <sub>max</sub>	:	réserve en eau utile maximale dans le sol (mm),
	$\theta_{FC}$	:	capacité au champ,
	$\theta_{WP}$	:	point de flétrissement,
	Pr	:	profondeur des racines (m).

La profondeur des racines a été estimée à partir de la distribution des cultures sur le territoire (Carte 16) en se basant sur les valeurs issues de la littérature (Tableau VII.18). La capacité au champ ( $\theta_{FC}$ ) et le point de flétrissement ( $\theta_{WP}$ ) ont été définis à partir de la distribution des unités de sol (Carte 5) en utilisant des valeurs références extraites de Rushton (2003). Les gammes de valeurs plausibles de RAS<sub>max</sub> et de C<sub>RO</sub> utilisées dans le processus de calage ont donc été extraites dans un rayon de 1 km autour des puits à partir des cartes 27 et 14.

147

Le modèle *GWHAT* teste ensuite toutes les combinaisons possibles pour ces deux paramètres et calcule les valeurs de S<sub>y</sub> permettant de minimiser l'erreur entre l'hydrogramme synthétique et l'hydrogramme mesuré (Gosselin, 2016).

Après le processus automatisé d'optimisation, les plages de valeurs prises par l'ensemble des paramètres hydrologiques sont généralement en adéquation avec la plage de valeurs plausibles (Tableau 5.45). Toutefois, le RAS<sub>max</sub> après calage (Tableau I.4) apparaît sous-estimé par rapport aux valeurs plausibles (Tableau I.3) calculées à partir de l'équation 9 et extraites dans un rayon de 1 km autour de chaque puits. Ce décalage peut s'expliquer par plusieurs facteurs : 1) le rayon d'extraction des valeurs probables de RAS<sub>max</sub> est vraisemblablement trop grand et englobe un nombre important d'unités boisées surestimant alors le RAS<sub>max</sub>, 2) le RAS<sub>max</sub> considéré dans *GWHAT* est constant et ne tient donc pas compte des récoltes après lesquelles le sol est nu avec un RAS<sub>max</sub> beaucoup plus faible, 3) le cycle de croissance des plantes n'est pas intégré dans le calcul de l'évapotranspiration potentielle, et l'utilisation d'un RAS<sub>max</sub> élevé entraîne alors un excès d'évapotranspiration durant l'été, provoquant un déficit d'eau trop important dans le sol au début de l'automne ne permettant pas de reproduire convenablement la recharge automnale.

Tableau 5.45 – Plages de valeurs utilisées pour caler les paramètres hydrologiques afin de produire les hydrogrammes de puits synthétiques du modèle GWHAT pour l'ensemble des puits analysés.

Paramètre	Description	Gamme de calage
Sy	Porosité de drainage de l'aquifère	0.010 - 0.072
RAS <sub>max</sub> (mm)	Volume maximal d'eau accessible pour les plantes	0 – 85
CRO	Coefficient de ruissellement	0.260 – 0.555
T <sub>crit</sub> (°C)	Température critique pour la partition neige-pluie	0
T <sub>melt</sub> (°C)	Température de base pour la fonte de la neige	0
C <sub>M</sub> (mm/°C)	Coefficient de fonte de la neige	4.5 – 5.0
ΔT (jours)	Délai de réponse de la nappe	0

Les hydrogrammes simulés (Figures I.31 à I.38) représentent plutôt bien les fluctuations de nappe mesurées sur le long terme, bien qu'il soit difficile de reproduire chaque pic individuellement comme le montre la chronique du puits PO-01 (Figure 5.36). Les différences sont probablement dues 1) à l'utilisation des données climatiques de la station « Sussex Bis » dont l'éloignement par rapport au puits varie de 6.9 à 38.5 km ou 2) à la précision des paramètres d'entrée.

Les intervalles de confiance définis par la méthode GLUE sont généralement resserrés autour de la valeur moyenne (Figure 5.37 et Figures I.39 à I.46). Le calage permet donc de reproduire de manière satisfaisante les variations annuelles de la recharge sur chaque puits entre 1980 et 2017 (Figures I.47 à I.54) et de contraindre efficacement l'estimation moyenne du taux de recharge dans l'environnement proche des puits (Tableau I.4).



Figure 5.36 – Niveaux d'eau estimés avec le modèle GWHAT selon l'intervalle de confiance GLUE de 5 à 95 % représenté en gris par rapport aux niveaux d'eau mesurés en bleu pour le puits PO-01.



Figure 5.37 – Recharge annuelle estimée avec le modèle GWHAT pour le puits PO-01 selon les années hydrologiques, la courbe enveloppe rouge représente l'intervalle de confiance GLUE entre 25 et 75 % tandis que les moustaches correspondent aux limites d'incertitude pour l'intervalle de confiance GLUE entre 5 et 95 %.

Les composantes du bilan en eau estimées sur chaque puits (Figures I.55 à I.62) suggèrent que les conditions locales peuvent être très variables d'un puits à l'autre et donc que la zone d'étude présente une grande variabilité spatiale du taux de recharge malgré le fait que les dépôts meubles soient perméables et généralement minces. Par exemple, le ruissellement peut représenter 30 à 52 % des précipitations totales mesurées à la station « Sussex Bis » selon les puits. Toutefois, l'évapotranspiration ne varie que de 21 et 27 % des précipitations totales. Ainsi, la recharge calculée par cette approche varie de 284 mm/an au puits PO-10 à 538 mm/an au puits PO-01. En moyennant les valeurs de recharge obtenues pour l'ensemble des puits, le taux recharge est alors égal à 393 mm/an et représente alors 35 % des précipitations totales (Tableau 5.46).

Tableau 5.46 – Composantes moyennes annuelles du bilan en eau obtenues avec la méthode des bilans combinés sur chaque puits d'observation entre 1980 et 2017 avec les données climatiques de la station « Sussex Bis ».

Puits	P <sub>tot</sub> (mm/an)	ETR (mm/an)	$\mathbf{Q}_{R}$	RP (mm/an)	R (mm/an)	RS (mm/an)	RH (mm/an)
PO-01	1 132 (100 %)	243 (22 %)	-	-	538 (48 %)	341 (30 %)	-
PO-03	1 132 (100 %)	252 (22 %)	-	-	419 (37 %)	459 (41 %)	-
PO-04	1 132 (100 %)	232 (21 %)	-	-	484 (43 %)	408 (36 %)	-
PO-05	1 132 (100 %)	238 (21 %)	-	-	307 (27 %)	582 (52 %)	-
PO-06	1 132 (100 %)	308 (27 %)	-	-	342 (30 %)	479 (43 %)	-
PO-07	1 132 (100 %)	237 (21 %)	-	-	439 (39 %)	450 (40 %)	-
PO-09	1 132 (100 %)	285 (25 %)	-	-	334 (30 %)	511 (45 %)	-
PO-10	1 132 (100 %)	283 (25 %)	-	_	284 (25 %)	561 (50 %)	_

La figure 5.38 présente les composantes du bilan hydrologique estimées au puits PO-03, considéré représentatif du bilan global calculé avec l'ensemble des puits d'observation. En se penchant sur les variations saisonnières des composantes du bilan en eau observées sur ce puits, des tendances sont observées (Figure 5.39). L'évapotranspiration est maximale durant l'été soit durant la période où le couvert végétal est le plus important et les températures maximales, et affiche une croissance progressive au printemps avant de décroître également progressivement à l'automne. Le ruissellement de surface, associé à l'intensité des précipitations et à la période de dégel, est donc très élevé lors de la période fonte de la neige pendant les mois de mars et avril. Il est plus faible et montre des valeurs relativement similaires durant le reste de l'année excepté à l'automne où les précipitations sont importantes. La recharge présente une allure relativement similaire au ruissellement de surface avec des variations légèrement plus marquées. En effet, quel que soit le puits (Figures I.63 à I.70), deux épisodes de recharge sont observés : 1) le premier, soudain, est induit par la fonte du couvert nival à la fin de l'hiver et 2) le deuxième, moins intense, mais plus long, marque l'infiltration de l'eau issue des nombreux évènements pluvieux de la saison automnale lorsque l'évapotranspiration est réduite.

À noter que la recharge se poursuit durant l'hiver en raison des fréquents épisodes de redoux typiques des provinces Maritimes, notamment visibles sur les figures I.13 à I.21. Ces redoux ponctuels, combinés à la température plus élevée de l'air sous le couvert nival du fait de l'effet isolant de la neige, induisent alors une recharge hivernale.



Figure 5.38 – Bilan en eau annuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-03.



Figure 5.39 – Bilan en eau mensuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-03.

#### 5.6.6 Synthèse et comparaison des diverses méthodes

La recharge est un paramètre difficile à estimer à cause des nombreuses incertitudes associées à chaque méthode et de l'échelle spatiale considérée selon l'approche utilisée. Il est conseillé d'évaluer les taux de recharge à partir de plusieurs méthodes afin de contraindre les estimations (Delin *et al.*, 2007, Scanlon *et al.*, 2002). L'estimation des taux de recharge à l'échelle régionale ou d'un bassin versant est particulièrement complexe à cause des différentes échelles spatiales considérées par les diverses approches utilisées et les nombreuses incertitudes associées aux paramètres et aux hypothèses de chacune.

Le débit de base à l'exutoire du bassin versant de la rivière Kennebecasis a été estimé avec divers outils (Section 5.6.3). À l'issue de cette analyse comparative, le filtre de Chapman s'est avéré être celui reproduisant probablement le mieux la contribution de l'aquifère. La principale incertitude liée au filtrage est la surestimation du débit de base durant la fonte de la neige à la fin de l'hiver (Figure 5.40). Ce biais a notamment été mis en évidence lors d'une précédente étude menée par Rivard *et al.* (2014b) et constitue une des limitations majeures des techniques de séparation des hydrogrammes de rivières (Rutledge, 1998), en plus de leur subjectivité.

Contrairement à la méthode de séparation des hydrogrammes de rivières qui fournit une valeur globale pour l'ensemble du bassin versant, le modèle HELP évalue le taux de recharge sur chaque maille (150 m x 150 m) du bassin en les considérant de façon indépendante. En faisant le calcul sur les 49 011 cellules reproduisant l'ensemble du bassin de la rivière Kennebecasis, il a été possible de calculer chaque composante du bilan hydrologique à l'échelle du bassin versant. Les résultats du modèle d'infiltration ont pu être calés à partir de l'hydrogramme de la rivière de façon à obtenir un taux de recharge jugé représentatif du territoire (Section 5.6.4). Le modèle HELP souffre essentiellement des imprécisions liées aux nombreux paramètres d'entrée et d'une difficulté à « évacuer » l'eau une fois la zone racinaire traversée, et ce malgré la présence de couches moins perméables. Cette dernière limitation du modèle HELP est renforcée par l'absence de transfert d'eau entre cellules. De plus, quand il est utilisé sur une longue période temps, en l'occurrence 37 années, il ne tient pas compte des variations dans le temps et dans l'espace de l'occupation des sols et des pratiques culturales. Ceci représente alors une source d'erreur importante puisque ces deux paramètres sont impliqués dans le calcul du ruissellement et de l'évapotranspiration. Le modèle HELP semble bien représenter les variations de recharge mensuelles, excepté pendant la période de fonte de la neige (Figure 5.40). Ceci s'explique notamment par une représentation inadéquate de ce processus dans le modèle d'infiltration, surtout lors des redoux, mais aussi par une surévaluation de la recharge par le filtre de Chapman.

152



Figure 5.40 – Comparaison des débits de base mensuels calculés avec le filtre de Chapman et les taux mensuels de recharge potentielle et nette estimés avec le modèle HELP entre 1980 et 2016.

Afin de mieux contraindre les taux de recharge, le modèle *GWHAT* a été utilisé en se basant sur des données climatiques et les fluctuations de la nappe enregistrées dans les puits de la CGC.

Les hydrogrammes synthétiques ont été calés sur les mesures du niveau de nappe en utilisant des paramètres de calage basés sur des gammes de valeurs réalistes extraites dans un rayon proche des puits d'observation de la CGC (Section 5.6.5). La confiance accordée aux taux de recharge calculés avec cette méthode est renforcée par la bonne corrélation avec la recharge moyenne estimée avec le modèle d'infiltration *HELP* dans un secteur de 1 km<sup>2</sup> autour des huit puits analysés (Figure 5.41).



Figure 5.41 – Comparaison des estimations du taux de recharge entre les modèles HELP (données de 1980 à 2016) et GWHAT (données de 1980 à 2017).

Comme la distribution de la recharge à l'échelle du territoire est variable (Carte 19) et dépend de nombreux facteurs, il serait hasardeux d'extrapoler les résultats du modèle *GWHAT* sur le bassin et de les considérer comme représentatifs à l'échelle régionale (Healy, 2010). Néanmoins, la concordance entre ces estimations de recharge à l'échelle locale et les résultats du modèle *HELP* suggère que les paramètres d'entrée utilisés dans ces deux modèles sont plutôt réalistes et les valeurs de recharge vraisemblablement représentatives.

De plus, cette bonne corrélation implique que les paramètres d'entrée du modèle développé pour le bassin de la rivière Kennebecasis sont vraisemblablement applicables au bassin de la rivière Pollett pour lequel aucune station de jaugeage n'était disponible (Carte 23).

Ainsi, l'utilisation combinée de ces trois méthodes a permis de contraindre les estimations du taux de recharge de l'aquifère au roc à l'échelle du territoire (Tableau 5.47). Un taux de recharge moyen de 300 mm/an est jugé représentatif des apports de l'aquifère au roc sur le bassin de la rivière Kennebecasis. Cette estimation déduite du modèle d'infiltration *HELP* a d'ailleurs été utilisée comme paramètre d'entrée dans le modèle numérique d'écoulement (Section 0).

Tableau 5.47 – Composantes moyennes annuelles du bilan hydrologique obtenues avec les trois outils d'estimation de la recharge sur le bassin de la rivière Kennebecasis en utilisant les données climatiques de la station « Sussex Bis ».

Méthode utilisée		Composantes du bilan hydrologique (mm/an)								
		P <sub>tot</sub>	ETR	Q <sub>R</sub>	RP	R	RS	RH		
F Ch	iltre de apman <sup>1</sup>	1 155 (100 %)	417 (36 %)	745 (64 %)	371 (32 %)	-	374 (32 %)	-		
Mode	èle HELP <sup>1</sup>	1 155 (100 %)	544 (47 %)	-	354 (31 %)	305 (27 %)	253 (22 %)	49 (4 %)		
	PO-01	1 132 (100 %)	243 (22 %)	-	-	538 (48 %)	341 (30 %)	-		
<sub>™</sub> F	PO-03	1 132 (100 %)	252 (22 %)	-	-	419 (37 %)	459 (41 %)	-		
ΗĂ	PO-04	1 132 (100 %)	232 (21 %)	-	-	484 (43 %)	408 (36 %)	-		
Ň	PO-05	1 132 (100 %)	238 (21 %)	-	-	307 (27 %)	582 (52 %)	-		
<u>e</u>	PO-06	1 132 (100 %)	308 (27 %)	-	-	342 (30 %)	479 (43 %)	-		
odè	PO-07	1 132 (100 %)	237 (21 %)	-	-	439 (39 %)	450 (40 %)	-		
Š	PO-09	1 132 (100 %)	285 (25 %)	-	-	334 (30 %)	511 (45 %)	-		
	PO-10	1 132 (100 %)	283 (25 %)	-	-	284 (25 %)	561 (50 %)	-		

<sup>1</sup>Données entre 1980 et 2016.

<sup>2</sup>Données entre 1980 et 2017.

Sur le bassin de la rivière Pollett, le taux de recharge moyen estimé entre 1980 et 2016 avec le modèle d'infiltration *HELP* varie de 216 à 242 mm/an selon les données climatiques utilisées (Tableau 5.48). Cette différence avec le bassin voisin de la rivière Kennebecasis est essentiellement due à l'importance du ruissellement sur le bassin de la rivière Pollett, l'évapotranspiration étant semblable sur les deux bassins.

Tableau 5.48 – Composantes moyennes annuelles du bilan hydrologique obtenues avec le modèle d'infiltration quasi-2D HELP sur le bassin de la rivière Pollett entre 1980 et 2016.

Station	Composantes du bilan hydrologique (mm/an)								
météorologique	P <sub>tot</sub>	ETR	$\mathbf{Q}_{R}$	RP	R	RS	RH		
Sussex Bis	1 155 (100 %)	481 (42 %)	-	281 (24 %)	242 (21 %)	390 (34 %)	39 (3 %)		
Mechanic Settlement	1 245 (100 %)	565 (45 %)	-	248 (20 %)	216 (17 %)	429 (35 %)	32 (3 %)		

#### 5.7 Vulnérabilité de l'aquifère rocheux régional

Afin d'évaluer la sensibilité des eaux souterraines à d'éventuelles contaminations de surface, la vulnérabilité de l'aquifère rocheux a été estimée sur le territoire. De multiples approches d'évaluation de la vulnérabilité existent, bien qu'aucune d'elle ne soit idéale (Murat, 2000). En effet, ces méthodes sont 1) généralement sensibles aux paramètres d'entrée, 2) souvent subjectives et 3) basées sur de nombreuses simplifications. Il a donc été décidé d'utiliser deux outils d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque : l'indice DRASTIC (Section 5.7.1) développé par l'Agence de Protection Environnementale des États-Unis (EPA) et le temps de transfert advectif vertical vers la nappe (Downward Advection Time – DAT) (Section 5.7.2) en se basant sur une étude de Ross et al. (2004). Ces méthodes fournissent des informations d'ordre régional sur la vulnérabilité de surface qu'il convient toutefois d'affiner par la suite avec des expertises locales (Aller *et al.*, 1987).

#### 5.7.1 Application de la méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC, décrite par Aller et al. (1987), repose sur la définition de sept paramètres ayant une incidence sur la vulnérabilité (Figure 5.42) : 1) la profondeur de la nappe (Depth to groundwater – D), 2) la recharge nette (R), 3) le type d'aquifère (A), 4) le type de sol (S), 5) la pente de la surface du sol (Topography – T), 6) l'impact de la zone vadose (I) et 7) la conductivité hydraulique de l'aquifère (C). Chaque paramètre est coté puis pondéré par la suite afin d'obtenir l'indice DRASTIC final  $(I_D)$  :

$$I_D = D_C * D_P + R_C * R_P + A_C * A_P + S_C * S_P + T_C * T_P + I_C * I_P + C_C * C_p$$
(10)

оù

: indice DRASTIC, : Xc cote du paramètre X,

: poids du paramètre X. XP

Cette approche présente l'avantage d'être simple et donc très largement utilisée dans les études de caractérisation hydrogéologique à l'échelle régionale. De plus, il s'agit d'une méthode standardisée permettant ainsi d'uniformiser les cartes et de faciliter les comparaisons entre plusieurs territoires (Aller et al., 1987). Les paramètres utilisés, certes nombreux, permettent de tenir compte des principaux mécanismes impliqués dans l'infiltration possible de contaminants à partir de la surface. La méthode souffre néanmoins d'une redondance de certains paramètres (Murat, 2000).

De plus, la définition de cet indice repose sur quatre limitations : 1) la superficie du territoire doit être supérieure à 0.4 km<sup>2</sup>, 2) il ne tient pas compte de la nature du polluant (vulnérabilité intrinsèque), 3) la contamination est supposée provenir uniquement de la surface et 4) le contaminant est présumé s'infiltrer dans le sol avec le processus de recharge (Murat *et al.*, 2003).



# Figure 5.42 – Définition de l'indice de vulnérabilité DRASTIC en fonction des 7 paramètres d'entrée, adapté de Liggett *et al.* (2011).

Le territoire a été divisé en cellules de 150 x 150 m sur lesquelles la cote de chaque paramètre a été déterminée à partir des classes établies par Aller *et al.* (1987) (Tableau 5.49). Les cartes résultantes (Cartes 28 à 34) représentent ainsi la distribution des cotes des paramètres en utilisant la gamme standard de couleurs proposée par Aller *et al.* (1987).

La vulnérabilité n'a pas été estimée pour les cellules localisées en zone de résurgence ni pour celles identifiant des lacs ou des rivières. En effet, la méthode DRASTIC permet uniquement de représenter la vulnérabilité dans les zones de recharge bien que les zones de résurgence peuvent également être sujettes à de potentielles contaminations depuis la surface. Des cellules de vulnérabilité nulle ont donc été définies suite aux travaux d'estimation du taux de recharge distribuée avec *HELP* (Tableau 5.35) et couvrent environ 17 % des deux bassins visés.

Paramètre	D	R	Α	S	т	I	С
Cote	Profondeur de la nappe (m)	Recharge (mm/an)	Type d'aquifère	Type de sol	Pente du sol (%)	Impact de la zone vadose <sup>1</sup>	Conductivité hydraulique de l'aquifère (m/s)
1	> 30.5	0 - 50		Argiles	> 18		$K_{méd}(roc) = 1.8 \times 10^{-5}$
2	22.8 - 30.5			Argiles silteuses			
3	15.2 - 22.8	50 - 102		Silt et silt limoneux argileux	12 - 18		
4				Limons silteux		Socle cristallin	
5	9.1 - 15.2		Socle cristallin	Limons	6 - 12		
6		102 - 178		Limons sableux		Alternance de grès et shales	
7	4.6 - 9.1					Tills et colluvion	
8		178 - 254	Roc sédimentaire fracturé	Sables limoneux		Tills d'ablation, alluvions, contact glaciaire et fluvio-glaciaires	
9	1.5 - 4.6			Sables	2 - 6		
10	0 - 1.5	> 254		Sol mince ou absent	0 - 2		
Poids	5	4	3	2	1	5	3

Tableau 5.49 – Cotes et poids attribués aux paramètres intégrés dans l'indice DRASTIC, traduit et modifié de Aller et al. (1987).

<sup>1</sup>Un calcul d'indice équivalent est réalisé quand la zone vadose est composée de plusieurs couches.

La carte des cotes de la profondeur de la nappe de l'aquifère au roc (Carte 28) a été établie en retranchant l'altitude de la surface piézométrique (Carte 9) à l'élévation du sol (Carte 2). La profondeur de la nappe varie de 0 à 103 m sur la région d'étude. Toutefois, le niveau de nappe atteint très rarement (4 % des mailles) des profondeurs supérieures à 30.5 m (Tableau VIII.1 et Figure VIII.1). La nappe est généralement superficielle et donc vulnérable puisqu'elle fluctue entre 0 et 15.2 m de profondeur sur près du deux tiers (67 %) de la superficie des bassins.

La recharge distribuée calculée avec le modèle *HELP* (Carte 19) a été utilisée pour produire la carte des cotes de ce paramètre (Carte 29). La recharge de l'aquifère rocheux varie de 0 à 1 098 mm/an sur les bassins, mais ne dépasse généralement pas les 618 mm/an (90<sup>e</sup> percentile). Elle est nulle pour 17 % des mailles et inférieure à 50 mm/an pour 8 % d'entre elles (Tableau VIII.2 et Figure VIII.2). La recharge nette dépasse les 265 mm/an sur les deux tiers de la surface des bassins. La recharge étant le principal moteur du transport des contaminants depuis la surface, c'est donc au droit des secteurs de recharge élevée où l'aquifère sera le plus vulnérable.

L'aquifère régional est majoritairement représenté par des unités de grès fracturés même si quelques puits captent des unités du socle cristallin (Section 3.6). Pour les lithologies sédimentaires, une cote de 7 a été choisie en se basant sur la cote moyenne de la classe « grès lité, séquences de calcaire et shale » définie par Aller *et al.* (1987). D'après les quelques données de capacité spécifique estimée (Section 3.6.2), les roches cristallines s'avèrent être légèrement moins productives que les unités du roc sédimentaire. Il a donc été décidé d'attribuer une cote proche du roc fracturé en choisissant la cote maximale de 5 de la classe « métamorphique / ignée » de Aller *et al.* (1987). La carte des cotes du type d'aquifère (Carte 30) montre bien la prédominance des unités sédimentaires sur le territoire vis-à-vis du socle cristallin représentant seulement 17 % de l'aire totale des bassins (Tableau VIII.3 et Figure VIII.3).

La carte des cotes du type de sol (Carte 31) a été établie à partir de la pédologie du territoire (Carte 5) en se référant au modèle stratigraphique conceptuel utilisé dans *HELP* (Figure 5.31). Quelques ajustements mineurs ont été faits par rapport aux classes établies par Aller *et al.* (1987) afin de tenir compte des types de sols rencontrés sur le territoire (Tableau 5.49). Comme suggéré par Aller *et al.* (1987), lorsque l'épaisseur cumulée des horizons de sol était inférieure à 25 cm, le sol a été considéré comme mince ou absent en lui attribuant la cote de vulnérabilité maximale. Les textures de sols plus grossières que les silts couvrent près de 71 % de la zone d'étude tandis que les textures fines représentent seulement 9 % des sols (Tableau VIII.4 et Figure VIII.4). La majorité de la zone d'étude n'offre donc pas de protection efficace dans le transfert éventuel de polluants vers la nappe.

Le modèle numérique de terrain (MNT) a permis d'établir la carte des pentes (Carte 10) utile à la définition de cotes (Carte 32). La topographie est très marquée sur les bassins favorisant alors le ruissellement au détriment de l'infiltration. En effet, les pentes sont supérieures à 2 % dans 76 % des cas et dépassent même les 12 % sur 19 % du territoire (Tableau VIII.5 et Figure VIII.5).

Pour produire la carte des cotes de l'impact de la zone vadose (Carte 33), deux cas de figure se présentaient (Figure 5.43). Lorsque la zone non saturée était constituée d'une unique couche, alors la cote de la lithologie a été attribuée (Tableau 5.49). Pour les systèmes multicouches (Figure 5.43), l'impact de la zone vadose est déterminé à partir de la relation suivante afin de pondérer la cote avec l'épaisseur de chaque lithologie (Li *et al.*, 2017) :

$$I_{eq} = \frac{(C_A * b_A) + (C_B * b_B)}{b_A + b_B}$$
(11)

оù

I<sub>eq</sub> : indice équivalent de l'impact de la zone vadose,

 $C_A$  : cote de la couche A,

 $b_A$  : épaisseur de la couche A,

C<sub>B</sub> : cote de la couche B,

b<sub>B</sub> : épaisseur de la couche B.

Selon les analyses granulométriques (Section 5.1.1), les dépôts meubles sont majoritairement grossiers sur les bassins et favoriseraient donc la percolation de polluant à travers la zone vadose. En se basant sur la gamme de cotes des « sables et graviers » de Aller *et al.* (1987), la cote de 7 a été attribuée aux tills et aux colluvions tandis que la cote de 8 a été choisie pour le reste des dépôts meubles. Une cote moyenne de 6 a été considérée comme représentative du roc sédimentaire fracturé tandis qu'une cote de 4 a été attribuée au socle cristallin.



Figure 5.43 – Détermination de l'impact de la zone vadose a) dans un système monocouche avec une cote unique et b) dans un système multicouche avec le calcul d'un indice équivalent.

Suite à ces calculs, les cotes de 6 à 7 apparaissent être les plus représentatives de l'impact de la zone vadose avec près de 69 % de la superficie des bassins (Tableau VIII.6 et Figure VIII.6).

La carte du paramètre de conductivité hydraulique de l'aquifère (Carte 34) a été produite à partir de la valeur médiane de conductivité hydraulique déduite des essais de perméabilité sur les puits d'observation (Section 5.3.2). En se fiant à la classification de Aller *et al.* (1987), la cote de 1 a été appliquée sur toute la surface des bassins (Tableau VIII.7 et Figure VIII.7). Les variations de lithologies au sein de l'aquifère avaient été considérées dans un premier temps en attribuant la cote de 2 au socle cristallin et la cote de 3 au roc sédimentaire. Toutefois, après analyse des résultats, les différences se sont avérées être non significatives par rapport aux cotes conventionnelles. Il a alors été décidé de conserver une cote unique afin de rester cohérent avec la classification standard Aller *et al.* (1987).

Pour la carte de l'indice DRASTIC (Carte 35), qui permet de déterminer les secteurs les plus sensibles à une potentielle contamination de surface, cinq classes de vulnérabilité ont été définies de façon relative à partir des percentiles afin de mieux visualiser les différences d'indice de vulnérabilité intrinsèque à l'échelle des bassins versants, comme suggéré par Carrier *et al.* (2013). Il s'agit donc d'un indice de vulnérabilité relatif aux caractéristiques du territoire et n'intégrant donc pas les huit classes standards de vulnérabilité suggérées par Aller *et al.* (1987). Cette carte de vulnérabilité de l'aquifère au roc couvre l'ensemble des classes de vulnérabilité (Tableau VIII.8 et Figure VIII.8).

En se fiant aux classes standards, les cotes DRASTIC maximales ne dépassent pas la classe de vulnérabilité très élevée (indice supérieur à 200) et seulement 0.3 % du territoire affiche une vulnérabilité élevée (indice compris entre 180 et 199). De même, les classes de vulnérabilité faible à très faible (indice inférieur à 99) couvrent 3.7 % du territoire, hors secteurs de résurgence. Les classes de vulnérabilité extrême sont donc peu présentes sur les bassins qui sont majoritairement représentés par un indice DRASTIC de vulnérabilité moyenne (indice compris entre 120 et 159) qui couvre environ 46 % de la zone à l'étude. Comme expliqué un peu plus haut, il a donc été nécessaire de redistribuer ces classes de vulnérabilité sur les bassins versants de façon à mieux cibler les zones vulnérabilis sur le secteur d'étude. En se référant aux cinq classes établies à partir des percentiles (Carte 35), les deux bassins versants affichent toujours une étendue importante de vulnérabilité moyenne (indice compris entre 116 et 150) représentant 42 % du territoire. Les secteurs de vulnérabilité très élevée (indice supérieur à 165) représentent 8.8 % des bassins tandis que les zones avec une vulnérabilité très faible (indice inférieur à 106), en excluant les zones de résurgence, sont présentes sur 7.6 % de la région à l'étude.

En superposant la carte d'utilisation des sols (Carte 12) à celle de l'indice de vulnérabilité, les secteurs ayant potentiellement des sources de pollution ont été identifiés. Les parcelles agricoles et les zones urbaines couvrent respectivement 5 % et à peine 1 % des secteurs de vulnérabilité élevée à très élevée (Figure 5.44). Le territoire étant majoritairement forestier, le risque face aux pollutions de surface apparaît modéré à faible bien qu'une attention toute particulière doit être maintenue pour minimiser les risques de pollutions diffuses ou accidentelles.

En se fiant uniquement aux parcelles sur lesquelles sont localisés les forages gaziers du secteur, le constat diffère (Figure 5.45). En effet, un tiers de l'ensemble des forages gaziers répertoriés sont situés au droit des zones de vulnérabilité élevée à très élevée. De même, 53 % des forages de Corridor Resources Inc. sont localisés sur ces secteurs sensibles. Il est donc nécessaire d'être vigilant lors des opérations de surface en lien avec la maintenance de ces sites de production.





Figure 5.44 – Indice DRASTIC selon l'utilisation du sol sur les bassins versants.

Figure 5.45 – Indice DRASTIC au droit des sites des forages gaziers situés sur les bassins versants.

#### 5.7.2 Utilisation du temps de transfert advectif vertical

Afin de pallier le caractère subjectif de la pondération de la méthode paramétrique DRASTIC, une approche analytique complémentaire a été utilisée. Elle est basée sur le calcul du temps de transfert vers l'aquifère (TOT) et correspond donc, dans le cas d'un aquifère libre, au temps que prendrait un contaminant introduit en surface pour atteindre la nappe. Cette méthode conservatrice considère la durée de transfert advectif vertical (*Downward Advection Time –* DAT) d'un contaminant dissous dans l'eau depuis la surface du sol vers l'aquifère (Ross *et al.*, 2004) à partir de la relation suivante :

$$DAT = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^{n} b_i \theta_i \tag{12}$$

où	DAT	:	temps de transfert advectif vertical,
	q	:	taux de recharge (m/s),
	bi	:	épaisseur de la couche i (m),
	θι	:	teneur en eau de la couche i (mL/cm <sup>3</sup> ).

Comme le précisent Ross *et al.* (2004), cette technique est basée sur un modèle conceptuel hydrogéologique impliquant alors une très grande simplification du système hydrogéologique régional. Le modèle stratigraphique utilisé sur chaque maille de 150 x 150 m est similaire à celui utilisé dans l'estimation de la recharge avec *HELP* (Figure 5.31).

Cette approche nécessite seulement trois paramètres, réduisant ainsi les incertitudes associées aux données d'entrée : 1) le taux de recharge déterminé sur chaque cellule, 2) l'épaisseur des couches intégrées dans le modèle conceptuel de recharge et 3) la teneur en eau de chaque couche de la zone vadose. Ici, les valeurs utilisées ont été extraites du modèle *HELP*.

Le temps de transfert advectif vertical (DAT) n'a pas été estimé dans trois situations, ce qui représente 24 % de la surface du territoire. Le calcul excluait les cellules : 1) comprises dans les zones de résurgence, 2) sans données de recharge et 3) avec une recharge nulle ou non significative, c'est-à-dire inférieure à 1 mm/mois.

La carte finale obtenue (Carte 36) montre de fortes similitudes avec la carte de l'indice DRASTIC (Carte 35). En prenant chaque maille du territoire individuellement, ce constat est d'ailleurs confirmé (Figure 5.46) puisque le temps de transfert advectif vertical dans la zone vadose décroît généralement lorsque la vulnérabilité estimée avec l'indice DRASTIC augmente. L'utilisation de cette deuxième méthode renforce ainsi les conclusions émises suite à l'analyse de l'indice DRASTIC.



Figure 5.46 – Distribution du temps de transfert advectif vertical en fonction de l'indice DRASTIC sur les deux bassins versants.

La distribution asymétrique unimodale des fréquences du temps de transfert advectif vertical sur les bassins (Figures VIII.9 et VIII.10) reflète les conditions de confinement de l'aquifère. En effet, les délais de transfert d'un contaminant potentiel vers la nappe à travers la zone non saturée relativement perméable et peu épaisse semblent globalement courts (Tableau VIII.9). En d'autres termes, le caractère libre de l'aquifère au roc associé à la nappe relativement haute le rend sujet à une contamination rapide suite à un épanchement de composés polluants depuis la surface.

En utilisant une échelle de couleurs relative basée sur les percentiles, le territoire apparaît majoritairement représenté par une vulnérabilité moyenne (Figure VIII.11). Toutefois, ce découpage offre une vision quelque peu biaisée du temps de transfert réel rencontré sur les bassins. En effet, la classe de vulnérabilité très faible délimite les secteurs avec un temps de transfert advectif vertical (DAT) de plus de 15.2 années ce qui est déjà très court lorsque comparé aux échelles de temps considérées dans les systèmes hydrogéologiques.

De plus, en considérant le délai de transfert moyen de 6.8 années calculé sur le secteur d'étude, la présence d'une activité polluante potentielle aurait alors un impact rapide sur la qualité des eaux souterraines. Les temps de transfert vers la nappe sont d'ailleurs généralement compris entre 2.29 (1<sup>er</sup> quartile) et 7.49 (3<sup>e</sup> quartile) années sur le territoire, suggérant alors que toute pollution d'origine anthropique aurait des effets visibles sur une période de temps très courte, vraisemblablement de moins de 10 ans.

### 5.7.3 Synthèse et validation avec la géochimie des eaux souterraines

Il est possible de vérifier les informations produites par les diverses méthodes d'estimation de la vulnérabilité de surface en se référant aux analyses géochimiques effectuées sur les eaux souterraines (Section 2.4.6). Le territoire est caractérisé par des eaux jeunes de type Ca-HCO<sub>3</sub> riches en tritium. Ceci est cohérent avec le temps de transfert advectif vertical très court (inférieur à 9 ans) estimé au droit des puits échantillonnés (Figure 5.47). De plus, la présence de tritium dans les puits localisés à proximité des zones de résurgence confirme le renouvellement actif des eaux souterraines.


Figure 5.47 – Comparaison du temps de transfert advectif vertical (DAT) extrait dans une zone de 1 km<sup>2</sup> autour des puits avec les données géochimiques d'unité tritium (TU) issues des échantillonnages d'eau souterraine.

Bien qu'il soit généralement difficile de vérifier l'évaluation de la vulnérabilité d'un aquifère à l'échelle régionale en raison des nombreux paramètres intervenant dans le processus de transfert des polluants vers la nappe et des hétérogénéités du milieu, l'utilisation combinée des deux approches et leur vérification par la géochimie semblent indiquer qu'elles fournissent une estimation réaliste de la vulnérabilité de l'aquifère rocheux face aux éventuelles contaminations de surface.

En définitive, l'aquifère au roc apparaît généralement caractérisé par une vulnérabilité moyenne tout en présentant quelques secteurs sensibles essentiellement concentrés 1) au sud-ouest du bassin de la rivière Kennebecasis, à proximité de Sussex, 2) dans la vallée de la rivière Kennebecasis, 3) aux abords des vallées secondaires du nord du bassin, soit la rivière Millstream et le ruisseau Smiths et 4) au nord-est du village d'Elgin sur le bassin de la rivière Pollett (Carte 35). Ces zones de vulnérabilité élevée à très élevée (indice DRASTIC supérieur à 150) sont d'ailleurs confirmées par un temps de transfert vertical vers l'aquifère au roc souvent compris entre 1.3 (1<sup>er</sup> quartile) et 2.7 (3<sup>e</sup> quartile) années (Carte 36).

Toutefois, en se fiant aux classes standards suggérées par Aller *et al.* (1987), seul 0.3 % du territoire présente des zones de vulnérabilité élevée (indice DRASTIC supérieur à 180). Selon ces classes conventionnelles, les deux bassins affichent une vulnérabilité plutôt moyenne sur 46 % de leur superficie.

## 5.8 Synthèse et développement du modèle conceptuel

L'ensemble des travaux entrepris durant cette étude (Section 5) ont permis la caractérisation du système hydrogéologique de la région. Le développement du modèle conceptuel de la figure 5.48 repose en partie sur les informations déduites de ces travaux (Tableaux 5.50 et 5.51). Ce profil perpendiculaire à la rivière Kennebecasis correspond à la coupe BB' identifiée sur la carte 2 qui a également servi de base au développement du modèle numérique d'écoulement (Section 6).

Ce modèle conceptuel fait ressortir l'essentiel des caractéristiques géologiques (Figure 5.48.a) et les principales conditions hydrogéologiques du territoire (Figure 5.48.b), à savoir :

 Une couverture de dépôts meubles peu épaisse, variant généralement entre 2.1 et 3.8 m d'épaisseur, et en majorité représentée par des tills sableux et grossiers plutôt perméables (K = 8x10<sup>-6</sup> m/s) largement distribués sur la région d'étude (89 % de la surface des bassins) ;

2) Un roc très fracturé dans sa partie sommitale, traduit par une conductivité hydraulique relativement élevée (K =  $2x10^{-5}$  m/s), composé essentiellement par une alternance de grès, de conglomérats et de mudstones, au sein duquel la plupart des puits d'alimentation en eau potable du secteur d'étude sont forés (96 % des puits domestiques) ;

3) L'écoulement actif au sein de l'aquifère rocheux est surtout concentré dans la partie superficielle du roc, là où les réseaux de fractures ouvertes sont denses et bien interconnectés avant que la décroissance progressive de la fracturation s'amorce à partir de 50 m p/r au sol ;

4) L'apport en eaux souterraines assure un certain débit de base utile au maintien des rivières pérennes qui agissent alors comme exutoires principaux du système aquifère ;

5) La surface piézométrique est très largement contrôlée par la topographie et les niveaux de nappe rencontrés sur le territoire sont peu profonds puisque généralement compris entre 2 et 13 m p/r au sol, atteignant au maximum 20 m p/r au sol sous les forts reliefs ;

6) La recharge de l'aquifère au roc (305 et 254 mm/an sur les bassins respectifs des rivières Kennebecasis et Pollett) varie largement sur le territoire selon les conditions rencontrées en surface (occupation des sols, pentes de la surface du sol et propriétés hydrauliques des dépôts meubles et des unités de sol) et peut être localement assez importante (plus de 800 mm/an) à la faveur d'affleurements rocheux ou la présence de sol mince ;

7) La vulnérabilité plutôt moyenne du secteur d'étude, quoique localement élevée, s'explique notamment par le caractère libre de la nappe, associé à la nature et à l'épaisseur relativement faible des dépôts meubles.

Paramètre	Bassin versant de la rivière Kennebecasis	Bassin versant de la rivière Pollett		
	1 103 km <sup>2</sup>	314 km <sup>2</sup>		
Physiographie	Section amont du bassin	Affluent de la rivière Petitcodiac		
_	Orientation est-ouest	Orientation sud-nord		
	Escarpé au sud	Reliefs importants à l'amont		
Topographia	Étendues relativement planes dans les vallées	Secteur peu pentu à l'aval		
ropographie	Pente moyenne = 9 %	Pente moyenne = 7 %		
_	Altitudes comprises entre	8 et 409 m/NMM		
	Débit moyen à l'exutoire du bassin = 15 m³/s			
Hydrographie	Réseau hydrique de surface bien développé	Quelques affluents mineurs		
	Plusieurs cours d'eau de second ordre			
	Surtout boisé (75 %) et aussi agricoles (23 %)	Essentiellement forestier (89 %)		
Occupation du sol	Développement urbain limité (2 %)	Le reste dédié à l'agriculture (9 %)		
_	Principale aire urbaine = Sussex (5 298 hab.)	Milieu très rural		
	Secteur rural = seulement deux sites d'approvisionnement municipaux à Sussex			
l Isane de la	Assèchement de puits à Penobsquis probablement lié au dénoyage de la mine			
ressource	96 % des puits domestiques forés au roc			
en eau	Profondeur des puits entre 20 et 60 m pour 77 % d'entre eux			
	Conditions jaillissantes pour 6 % des puits			
	Succession sédimentaire d'âge carbonifère essentiellement			
Géologie	Socle cristallin surtout présent au sud des bassins			
du roc	Zones d'intérêts pour l'industrie gazière : grès fin et shale de la formation d'Albert			
	Présence d'une unité évaporitique au-dessus des réservoirs (groupe de Windsor)			
Structures et	Plusieurs failles régionales d'orientation nord-est			
topographie	Reflète globalement la topographie de surface			
du roc	Altitude comprise entre -2 et 409 m/NMM			
	Tills sur la majorité du territoire (89 %) : granulométrie de sables grossiers graveleux			
Géologie et propriétés	Présence d'autres dépôts mineurs : sables grossiers très graveleux			
des dépôts meubles	K <sub>médiane</sub> des tills ∼ 8x10 <sup>-6</sup> m/s			
	Perméabilité moyenne à élevée pour l'ensemble des dépôts			

Tableau 5.50 –	Synthèse	des conditions	hydrogéologiques	du territoire d'étud	e (1/2).

Paramètre	Bassin versant de la rivière Kennebecasis Bassin versant de la rivière Pollett			
Épaisseur des dépôts	Épaisseur moyenne des dépôts = 2.8 m et généralement comprise entre 2.1 et 3.8 m			
	Dans les puits : épaisseur médiane des tills = 2.1 m			
meubles	Accumulation surtout au nord de la rivière Couverture plus faible à l'amont			
	Sol de type podzol bien développé			
Pédologie	Sol généralement de texture moyenne à grossière (89 %)			
	Sols fins peu représentés (11 %)			
	Aquifère régional = roc fracturé superficiel			
	Puits en condition de nappe libre			
	Important réseau de fractures interconnectées dans le roc superficiel			
Propriétés de l'aquifère	Diminution avec la profondeur des fractures développées dans les plans de litage			
	K <sub>médiane</sub> du roc ~ 2x10 <sup>-5</sup> m/s			
	Écoulement contrôlé par les fractures ouvertes du roc sommital			
	Relativement faible porosité de drainage			
	Gradients horizontaux importants			
	Fort contrôle de la topographie sur la surface piézométrique			
Patron	Rivières = exutoires du système aquifère			
et piézométrie	Bassin versant de surface correspond au bassin hydrogéologique souterrain			
	Niveau de nappe peu profond et généralement entre 2 et 13 m p/r au sol			
	Niveau de nappe peut atteindre ~ 20 m de profondeur sous les reliefs			
	305 mm/an estimé par HELP242 mm/an estimé par HELP			
Recharge	Principaux facteurs : occupation des sols, pentes et propriétés des dépôts et du sol			
de l'aquifere au roc	Deux épisodes de recharge : surtout à la fonte des neiges et également à l'automne			
	Recharge importante sur les secteurs de sol mince et de roc affleurant			
	Moyenne sur 41 % du territoire Moyenne sur 47 % du territoire			
Vulnérabilité	Secteurs sensibles sur 23 % du bassin Secteurs sensibles sur 17 % du bassin			
rocheux	Quelques parcelles agricoles et zones urbaines situées sur des secteurs sensibles			
	Plusieurs plateformes de forages localisées au droit de secteurs vulnérables			
Eaux	Eaux de type Ca-HCO <sub>3</sub> peu évoluées, typiques d'eaux de recharge			
souterraines	Présence de tritium, marqueur d'eaux jeunes (moins de 50 ans)			

## Tableau 5.51 – Synthèse des conditions hydrogéologiques du territoire d'étude (2/2).



Figure 5.48 – Modèles conceptuels (a) géologique et (b) hydrogéologique selon la coupe BB', coupe localisée sur la carte 2.

# 6 MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU SYSTÈME AQUIFÈRE

La modélisation est utilisée dans le but de définir le comportement général d'un système d'écoulement des eaux souterraines. Bien que la crédibilité des modèles soit souvent critiquée (Oreskes *et al.*, 1994), la simulation numérique est un exercice utile permettant d'augmenter le niveau de confiance du modèle conceptuel (Section 5.8) en testant différentes hypothèses. La conceptualisation d'un système hydrogéologique entraîne nécessairement sa simplification et il est donc préférable, voire nécessaire, de commencer par un modèle bidimensionnel relativement simple plutôt qu'un modèle 3D plus complexe intégrant encore plus d'inconnus (Molson et Frind, 2014, Voss, 2011). Au départ, l'objectif principal est donc de reproduire la dynamique générale d'écoulement des eaux souterraines à l'échelle visée en utilisant un modèle avec un minimum de paramètres, dont les valeurs sont représentatives des propriétés hydrogéologiques du territoire.

## 6.1 Objectifs et défis de la simulation

En se référant spécifiquement au contexte du projet, la modélisation avait pour but de vérifier les liens possibles entre l'aquifère superficiel et les écoulements profonds pouvant éventuellement entraîner la migration de fluides depuis les unités atteintes par les puits gaziers. Il s'agissait donc d'étudier les écoulements locaux (superficiels) et régionaux (plus profonds) et d'évaluer l'apport potentiel d'eau provenant de la zone intermédiaire. Souvent peu caractérisée, cette zone est néanmoins déterminante dans le processus de transport puisqu'elle peut soutenir ou restreindre la migration de fluides vers la surface à partir des réservoirs gaziers profonds (Figure 1.2).

Ce modèle numérique vise à vérifier les hypothèses, les caractéristiques et les valeurs des paramètres utilisées pour développer le modèle conceptuel, notamment les valeurs de conductivité hydraulique et de recharge et la décroissance de la fracturation du roc en profondeur. L'un des buts est de vérifier la validité des valeurs de propriétés hydrauliques acquises sur le terrain (Section 4.3). Le calage devra démontrer si le taux de recharge estimé avec *HELP* (Section 5.6.4) et les conductivités hydrauliques intégrées au modèle sont appropriés et permettent de reproduire les niveaux de nappe interpolés le long de la coupe à partir des observations.

Le temps de résidence des eaux souterraines a également été simulé afin de mieux définir les zones actives d'écoulement déduites des simulations et de déterminer si le patron d'écoulement induit des mélanges entre des eaux évoluées et des eaux récentes. La distribution de l'âge des eaux souterraines peut ainsi être comparée aux analyses géochimiques (Section 2.4.6) afin de vérifier la représentativité du modèle d'écoulement.

## 6.2 Localisation et conceptualisation de la coupe 2D modélisée

Afin de répondre aux objectifs, il a été décidé de modéliser un domaine bidimensionnel traversant le secteur du champ gazier de McCully selon le profil BB' de la carte 2. La géologie du secteur d'étude étant complexe et peu d'informations étant disponibles, cette coupe 2D a été placée de manière à correspondre à une portion de l'une des coupes structurales de Hinds (2008) (Figure 3.5). En raison du fort potentiel en hydrocarbures de la région, plusieurs forages profonds y ont été implantés, apportant alors des informations déterminantes sur les contacts entre les diverses unités intégrées au modèle. Les profondeurs de ces interfaces ont par la suite été précisées par Séjourné (2017) en utilisant les diagraphies de ces mêmes forages gaziers. Les informations fournies par la coupe de Hinds (2008) ont ainsi pu être complétées en se référant spécifiquement aux neuf forages localisés dans un rayon de 1 km par rapport à la coupe 2D (Figure 6.1). Ces forages profonds ont notamment permis de fixer le toit du groupe de Mabou ainsi que le toit et la base du groupe de Windsor puisque le but de ces opérations était alors d'atteindre les réservoirs sous-jacents (Tableau 6.1).

Forage gazier	Profondeur totale mesurée (m)	Unité géologique atteinte à l'issue du forage	Distance à la coupe (m)
O-66	2 556	Mb. du Frederick Brook (Fm. d'Albert – Gr. de Horton)	565
P-66	2 431	Mb. du Frederick Brook (Fm. d'Albert – Gr. de Horton)	503
P-56	3 182	Mb. du Frederick Brook (Fm. d'Albert – Gr. de Horton)	739
C-67	2 475	Mb. du Frederick Brook (Fm. d'Albert – Gr. de Horton)	693
G-67	2 555	Mb. du Frederick Brook (Fm. d'Albert – Gr. de Horton)	702
E-67	4 133	Fm. De McQuade Brook (Gr. de Horton)	713
D-57	2 582	Mb. du Frederick Brook (Fm. d'Albert – Gr. de Horton)	558
J-67	2 658	Mb. du Frederick Brook (Fm. d'Albert – Gr. de Horton)	706
McC-1	2 657	Mb. du Frederick Brook (Fm. d'Albert – Gr. de Horton)	471

Tableau 6.1 – Forages profonds utilisés dans la définition de la géologie du modèle 2D.

Le domaine modélisé correspond donc à une coupe bidimensionnelle transverse à la vallée de la rivière Kennebecasis (Figure 6.1). Il s'agit d'un profil d'orientation NW-SE basé sur les informations de la section 5.8. Afin de représenter de façon optimale le système, le modèle 2D suit le patron d'écoulement régional présumé en tenant compte de la topographie. Son extension horizontale est limitée par la présence de deux reliefs importants distants de 8 850 m associés à des crêtes piézométriques. Dans le but de pouvoir étudier l'écoulement dans la zone intermédiaire, le modèle conceptuel de la figure 5.48 a été étendu en profondeur jusqu'à une élévation minimale de -1 500 m/NMM (Figure 6.1). Les unités géologiques incluses dans le modèle comprennent les groupes de Cumberland, de Mabou et de Windsor (Figure 6.1). Il a été décidé de ne pas poursuivre le modèle au-delà de la base du groupe de Windsor puisqu'il s'agit d'une unité évaporitique très peu perméable, et ce même en surface. De plus, à la profondeur considérée, les conditions de pression ont tendance à entraîner une réduction de la perméabilité, limitant alors très largement les écoulements. Ce choix s'est d'ailleurs révélé adéquat et bien adapté au comportement du système d'écoulement (Section 6.5.1).

Les dépôts superficiels ont également été intégrés au modèle en se basant sur leur distribution le long du profil (Figure 6.1). Sur la coupe, l'épaisseur des unités quaternaires a été extraite à partir de la carte interpolée de l'épaisseur des dépôts meubles (Carte 7). La décroissance de la fracturation du roc en profondeur a aussi été reproduite dans les simulations en diminuant de façon progressive la conductivité hydraulique du roc (Figure 6.1).



Figure 6.1 – Modèle conceptuel de la coupe BB' définissant les conditions géologiques représentées par la simulation numérique.

## 6.3 Développement du modèle numérique

La modélisation a été réalisée avec le simulateur numérique *FLONET/TR2* développé par Molson et Frind (2014). *FLONET/TR2* permet de simuler l'écoulement, le transport advectif-dispersif d'un contaminant dissous et le temps de résidence des eaux souterraines au sein d'un milieu poreux équivalent (Molson et Frind, 2014). Ce simulateur représente uniquement les conditions saturées et le régime permanent tout en assumant un domaine isothermal bidimensionnel (Molson et Frind, 2014). Ce simulateur à éléments finis permet également une déformation des mailles afin d'obtenir une meilleure représentation de la géométrie du toit de la nappe (Molson et Frind, 2014) lors de la procédure de calage du modèle. Cet outil simule le réseau orthogonal d'écoulement en calculant les équipotentielles et les lignes de courant du domaine bidimensionnel modélisé (Molson et Frind, 2014).

## 6.3.1 Hypothèses et limitations du modèle

Afin de simplifier le système hydrogéologique, plusieurs hypothèses ont été faites en amont des simulations. Elles permettent d'éviter les incertitudes liées à une surparamétrisation du domaine modélisé. Ces suppositions concernent 1) la localisation de la coupe 2D et 2) la conceptualisation du système. Les limites du modèle *FLONET* lui-même doivent également être considérées.

Tout d'abord, le modèle 2D a été placé de façon à être parfaitement aligné avec le gradient d'écoulement des eaux souterraines. Cette hypothèse assume que les écoulements transverses sont très largement réduits et donc négligeables au regard de l'échelle considérée. En effet, la coupe étant localisée dans l'axe des gradients topographique et piézométrique régionaux, le profil BB' est considéré comme représentatif de la direction d'écoulement principal. Quant aux limites latérales du domaine (Figure 6.1), elles ont été assimilées à des crêtes piézométriques puisque les reliefs sont associés aux zones de charges hydrauliques élevées. Des écoulements régionaux profonds pourraient potentiellement ne pas être contrôlés par ces hauts topographiques. Cependant, le modèle a montré que cette supposition était valable puisque les écoulements profonds représentent une portion négligeable de l'écoulement.

La simplification du système hydrogéologique implique de négliger les variations latérales des propriétés hydrauliques de la couverture de tills. Il est toutefois admis que les résultats des essais de perméabilité sont représentatifs des dépôts de tills glaciaires sur le territoire et peuvent donc être intégrés sur l'ensemble du modèle.

Les descriptions de forages ont également mis en évidence des variations lithologiques importantes au sein du roc. Au regard de l'échelle du système modélisé et de la complexité du milieu fracturé, seuls les groupes stratigraphiques (Cumberland, Mabou et Windsor) ont été représentés, tout en considérant la décroissance de la fracturation du roc en profondeur (Figure 6.1). Les zones faillées ont également été négligées dans ce modèle, car leur rôle sur la dynamique d'écoulement est très complexe à définir (Gassiat *et al.*, 2013).

Les dernières limitations sont associées aux conditions d'application du modèle *FLONET*. Premièrement, le gradient de température n'est pas pris en compte dans les simulations d'écoulement. Ainsi, les variations de viscosité et de densité des eaux souterraines ne sont pas considérées dans le modèle. Toutefois, comme le remarque Janos (2017), les effets liés à ces deux paramètres sont jugés négligeables face à la diminution rapide de la conductivité hydraulique du roc en profondeur. Le modèle considère également le domaine modélisé comme un milieu poreux équivalent. En milieu fracturé, cette simplification suppose que le réseau de fractures est très développé et les fractures interconnectées, ce qui est représentatif du roc superficiel, mais moins réaliste en profondeur (Nastev *et al.*, 2004). Toutefois, étant donné l'étendue du domaine modélisé et le manque d'informations dans la zone intermédiaire, cette hypothèse est nécessaire et jugée raisonnable. De plus, le simulateur fonctionne en régime permanent et exclut donc les variations saisonnières et interannuelles du taux de recharge. Ces variations influencent directement les écoulements locaux sur une échelle de temps plus petite, mais ne devraient pas contraindre les écoulements lents et profonds d'ordre régional.

#### 6.3.2 Maillage et conditions limites

Le maillage utilisé dans le modèle 2D a été généré avec l'extension *GRID* du logiciel *FLONET*. Dans un système hydrogéologique complexe avec des pendages importants ou des contacts discordants, ce programme auxiliaire génère une grille composée d'éléments déformables (Figure 6.2). Ainsi, les contacts de type « marches d'escalier » sont évités entre les formations et la géologie du domaine modélisé est alors plus réaliste. Toutefois, pour éviter la convergence des mailles et pour correctement représenter le dôme de sel du groupe de Windsor (Figure 6.1), il a été nécessaire d'identifier chaque élément un à un de cette structure particulière. La taille des éléments a été augmentée de manière progressive avec la profondeur pour ne pas avoir un maillage disproportionné et pour éviter les erreurs numériques. La taille des mailles varie de 2 m au sommet du modèle à 50 m à sa base pour une largeur fixe de 50 m (Tableau 6.2).

Toutefois, la déformation des mailles selon l'axe vertical, notamment aux limites entre les unités géologiques, peut entraîner la présence d'éléments plus petits que ceux initialement fixés dans le modèle (Figure 6.2). La taille minimale de ces éléments a été fixée à 0.1 m. Le programme *GRID* offre la possibilité de vérifier la présence d'erreurs dans la définition des éléments de la grille et aucune d'elle n'a été recensée. La grille a donc été discrétisée en 171 éléments horizontaux et 89 verticaux pour un total de 15 219 éléments (Figure 6.2).

Unité	Degré de fracturation	Maillage vertical <sup>1</sup> (m)	Maillage horizontal (m)
Alluvions et contact glaciaire	Dápôte quatornairos	~ 2	50
Till	Depois qualemaires	~ 2	50
Croupe de Cumberland	Roc très fracturé	~ 5	50
	Roc fracturé	10	50
	Roc très fracturé	~ 5	50
Groupe de Mabou	Roc fracturé	10	50
	Roc peu fracturé	~ 50	50
	Roc très fracturé	~ 5	50
Groupe de Windsor	Roc fracturé	10	50
	Roc peu fracturé	~ 50	50

Tableau 6.2 – Définition d	u maillage du modèl	e 2D.
----------------------------	---------------------	-------

<sup>1</sup>Les éléments verticaux peuvent être déformés jusqu'à une épaisseur minimale de 0.1 m.

La définition des conditions limites initiales (Figure 6.2) a été guidée par les caractéristiques du système hydrogéologique. Les limites verticales du modèle correspondent à des points hauts topographiques définissant des lignes de partage des eaux souterraines. Elles marguent une limite physique « imperméable » du système d'écoulement où une condition de type « flux nul » a été attribuée. À la base du modèle, il est assumé qu'aucun flux significatif ne recoupe cette frontière marquant l'interface entre le groupe de Sussex et le groupe de Windsor. En effet, en raison 1) de la nature des lithologies de l'unité évaporitique du groupe de Windsor, 2) de la baisse rapide du degré de fracturation du roc au sein des unités sédimentaires sus-jacentes et 3) de la profondeur atteinte à la base du modèle, une condition de type « flux nul » a été imposée à la base du domaine modélisé. En surface, un taux de recharge constant a été imposé. Dans un souci de simplicité, la recharge reste inchangée le long du profil même si cette dernière peut varier localement (Carte 19). Un taux de recharge moyen de 300 mm/an a été considéré comme représentatif pour l'aquifère rocheux (Section 5.6.6). Finalement, une condition limite de type « charge imposée » a été fixée aux quelques endroits où des cours d'eau et des vallons encaissés ont été identifiés. Sur ces neuf points (Figure 6.2), une charge hydraulique égale à l'élévation topographique a été imposée.



Figure 6.2 – Conditions limites et maillage du modèle d'écoulement de la coupe BB'.

## 6.3.3 Propriétés hydrauliques

Les propriétés hydrauliques considérées dans le modèle d'écoulement et de transport ont été définies à partir de données acquises sur le terrain (Section 4.3), mais également sur la base d'informations extraites de la littérature (Tableau 6.3). La distribution des conductivités hydrauliques horizontales ( $K_h$ ) et des facteurs d'anisotropies associés ( $K_h/K_v$ ) est présentée sur la figure 6.3. Il s'agit d'une représentation des propriétés hydrauliques obtenues après la procédure de calage (Section 6.3.4).

La diminution de la fracturation en profondeur au sein du roc superficiel constitue l'un des éléments majeurs considérés dans le modèle. Cette décroissance a été observée suite aux travaux de diagraphies (Section 2.4.5) puis confirmée lors de l'étude de fracturation sur des affleurements rocheux du secteur (Section 2.4.4). Cette réduction de la fracturation avec la profondeur est d'ailleurs mise en évidence dans des contextes similaires et dans plusieurs études (Section 5.3.1). Elle a été traduite dans le modèle conceptuel en divisant le roc en trois domaines de fracturation distincts (Figure 6.1) puis représentée dans le modèle 2D en diminuant de deux ordres de grandeur la conductivité hydraulique horizontale entre chaque domaine (Figure 6.3).

Les conductivités hydrauliques restent inchangées au sein d'une même unité de roc, ainsi que pour les alluvions et les dépôts de contact glaciaire (Figure 6.3). Seuls les tills présentent des valeurs variant latéralement selon l'unité rencontrée le long du profil. La gamme de conductivités hydrauliques horizontales utilisée pour les tills ( $K_h = 5.0 \times 10^{-6}$  à  $8.0 \times 10^{-5}$  m/s) est conforme aux valeurs obtenues suite aux essais de perméabilité réalisés sur le terrain (Section 5.1.3). Pour le roc superficiel fracturé, la conductivité hydraulique horizontale ( $K_h = 9.0 \times 10^{-7}$  m/s) du groupe de Mabou est aussi cohérente avec les valeurs estimées suite aux essais de perméabilité (Section 5.3.2), mais comprise dans la tranche inférieure des valeurs disponibles. Pour les formations non caractérisées, soit les groupes de Cumberland et Windsor ou encore les dépôts de contact glaciaire et les alluvions, des valeurs issues de la littérature ont été utilisées (Tableau 6.4).



Figure 6.3 – Distribution des conductivités hydrauliques et de l'anisotropie sur le domaine modélisé de la coupe BB'.

Unité	Dépôt ou groupe	Valeur type de K (m/s)	Commentaires
Dépôts meubles	Alluvions	6.8x10 <sup>-4</sup>	Valeur tirée de Broster et Pupek (2001)
	Contact glaciaire	-	
	Tills	2.0x10 <sup>-7</sup> - 9.0x10 <sup>-5</sup>	Essais au perméamètre de Guelph
Dee	Gr. de Cumberland	4.0x10 <sup>-6</sup> - 5.0x10 <sup>-5</sup>	Gamme de valeurs pour la Fm. de Boss Point tirée de Rivard et al. (2008b)
Roc superficiel	Gr. de Mabou	9.0x10 <sup>-7</sup> - 1.5x10 <sup>-4</sup>	Essais de perméabilité à choc hydraulique
	Gr. de Windsor	6.0x10 <sup>-7</sup>	Moyenne sur 5 données de la Fm. de Hillsborough tirée de Rivard et al. (2008b)

Tableau 6.3 – Valeurs types de conductivité hydraulique recensées dans la littérature ou acquises sur le terrain.

Tableau 6.4 – Valeurs de conductivité hydraulique utilisées dans le modèle numérique après calage.

Unité	Dépôt ou groupe	Valeur de K du modèle (m/s)	Commentaires
Dépôts meubles	Alluvions	6.8x10 <sup>-4</sup>	Valeur tirée de Broster et Pupek (2001)
	Contact glaciaire	6.8x10 <sup>-4</sup>	Textures similaires aux alluvions donc K vraisemblablement proches
	Tills	5.0x10 <sup>-6</sup> - 8.0x10 <sup>-5</sup>	Gamme de valeurs cohérente avec les essais de perméabilité
	Gr. de Cumberland	1.0x10⁻6	Proche du minimum pour la Fm. de Boss Point tirée de Rivard et al. (2008b)
Roc superficiel	Gr. de Mabou	9.0x10 <sup>-7</sup>	Valeur minimum des essais de perméabilité à choc hydraulique
	Gr. de Windsor	1.6x10 <sup>-8</sup>	Minimum sur 5 données de la Fm. de Hillsborough tirée de Rivard et al. (2008b)

#### Tableau 6.5 – Valeurs de porosité totale utilisées dans le modèle numérique tirées de la littérature et des analyses des carottes de forages.

Unité	Dépôt ou groupe	Valeur de porosité du modèle	Commentaires
	Alluvions	0.40	Valeur type pour les graviers extraite de HELP (Schroeder et al., 1994)
Dépôts meubles	Contact glaciaire	0.40	Dépôts de contact glaciaire assimilés aux alluvions
	Tills	0.42	Valeur type pour les sables grossiers tirée de HELP (Schroeder et al., 1994)
	Gr. de Cumberland	0.06	Moyenne sur 4 données extraites de Rivard et al. (2008a)
Roc superficiel	Gr. de Mabou	0.06	Valeur moyenne des analyses des carottes de forages
	Gr. de Windsor	0.05	Médiane tirée de Rivard <i>et al.</i> (2008a)

Dans le modèle, une anisotropie de la conductivité hydraulique correspondante à  $K_h/K_v = 1/100$ a été imposée ; basée sur une moyenne géométrique calculée à partir d'essais de perméabilité réalisés sur six puits de l'aquifère fracturé du bassin des Maritimes (Rivard *et al.*, 2008a).

La porosité totale attribuée au groupe de Mabou (n = 6 %) provient de l'analyse des carottes de forage (Section 5.3.3). La porosité de la matrice du roc a été maintenue constante sur le domaine puisqu'aucune tendance particulière n'a été observée sur les carottes entre 0 et 140 m de profondeur (Annexe IV). Pour toutes les autres unités intégrées dans le modèle 2D, une valeur de porosité issue de la littérature a été utilisée (Tableau 6.5). C'est notamment le cas pour les tills dont la granulométrie étalée mise en évidence dans la section 5.1.1, combinée à la compaction des terrains en place, devrait quelque peu réduire la valeur « typique » attribuée dans le modèle.

## 6.3.4 Calage du modèle

L'objectif du calage du modèle d'écoulement est de minimiser les différences entre les charges hydrauliques simulées et les niveaux de nappe observés le long du profil. Le principe est d'obtenir une combinaison réaliste de conductivités hydrauliques et de recharge reproduisant convenablement la surface libre de la nappe.

Sachant que la densité de puits localisés le long de la coupe BB' ou dans un environnement proche était très largement insuffisante pour réaliser un calage optimal, la carte piézométrique obtenue par krigeage avec dérive externe a été utilisée aux fins du calage (Carte 9). Pour ce faire, l'élévation de la surface de la nappe a été extraite tous les 50 m sur les 172 nœuds de la grille. Bien que quelques erreurs puissent être présentes sur cette carte (Section 5.5.6), il s'agit de la meilleure représentation disponible de la surface de la nappe le long du profil. Ces charges hydrauliques basées sur des données observées ont donc été utilisées comme point de comparaison lors de la procédure de calage du modèle d'écoulement (Figure 6.5).

Le calage du modèle a consisté à ajuster manuellement les conductivités hydrauliques des diverses unités tout en conservant un taux de recharge fixe de 300 mm/an et une anisotropie constante du roc égale à 100. Le processus de calage a aussi permis d'identifier les paramètres les plus sensibles du modèle d'écoulement. En effet, la conductivité hydraulique des dépôts meubles et de la partie superficielle du roc, soit la plus fracturée, s'est avérée être le paramètre ayant le plus grand effet sur la réponse du modèle. L'ajustement optimal a finalement été trouvé après avoir testé plus d'une centaine de combinaisons (Figure 6.4). Les propriétés hydrauliques du modèle d'écoulement après calage sont détaillées dans la section 6.3.3.



Figure 6.4 – Charges hydrauliques simulées après calage et comparées aux charges observées extraites de la carte piézométrique le long du profil BB'.

Le long de la coupe BB', les charges hydrauliques varient entre 23 et 205 m soit une amplitude de 182 m. L'erreur moyenne sur les charges est de 3.87 m et représente donc seulement 2.13 % des variations de charges sur le profil. Sur l'ensemble du modèle, l'erreur moyenne est donc largement inférieure au seuil d'acceptabilité de 5 % des fluctuations de la nappe (9.11 m) suggéré par Anderson et Woessner (1992). Le calage est donc jugé acceptable pour représenter le système d'écoulement.



Figure 6.5 – Comparaison entre les charges observées et simulées le long de la coupe BB'.

La distribution des flux le long de la coupe BB' confirme la bonne représentation du système d'écoulement (Figure 6.6). En effet, les secteurs de résurgence correspondent aux cours d'eau où les charges ont été imposées dans le modèle 2D. De plus, la rivière Kennebecasis constitue bien la zone de résurgence principale du système d'écoulement et le taux de recharge imposé en surface (300 mm/an) est également conforme aux flux d'eau entrants dans le domaine.



Figure 6.6 – Visualisation des flux entrants et sortants du domaine après calage des charges hydrauliques le long du profil BB' : les flux positifs correspondent à la recharge tandis que les flux négatifs sont associés aux zones de résurgence.

La convergence du modèle est jugée satisfaisante avec un bilan de masse quasi équilibré présentant une erreur de -0.80 %. Bien qu'un modèle ne peut être validé avec certitude (Oreskes *et al.*, 1994), l'utilisation de propriétés conformes aux données acquises sur le terrain ou de paramètres réalistes issus de la littérature renforce d'autant plus la confiance accordée aux résultats de ce modèle simple qui peut alors être utilisé pour comprendre le comportement du système d'écoulement (De Marsily *et al.*, 1992, Voss, 2011) au droit du champ gazier de McCully.

#### 6.4 Simulation de l'âge moyen des eaux souterraines

La modélisation numérique de l'âge des eaux souterraines est un outil complémentaire utile au modèle d'écoulement permettant de mieux cerner le comportement du système. Le modèle *TR2*, développé par Molson et Frind (2014), offre la possibilité de simuler l'âge moyen des eaux souterraines à partir du modèle de transport d'âge développé par Goode (1996) dans lequel les concentrations sont remplacées par l'âge des eaux souterraines. Cette méthode tient compte des processus d'advection et de dispersion, permettant donc de reproduire de manière réaliste les temps de résidences des eaux souterraines en tenant compte du mélange des âges (Molson et Frind, 2005, Sanford, 2011). Le principe est donc d'atteindre un régime permanent simulant le temps de résidence des eaux souterraines. Cet équilibre est atteint quand l'apport des eaux jeunes de recharge compense le vieillissement progressif des eaux souterraines.

#### 6.4.1 Paramètres et conditions limites

L'âge moyen des eaux souterraines se définit par le temps s'écoulant depuis l'entrée d'une molécule d'eau dans le système (Goode, 1996). Pour obtenir une distribution de l'âge moyen des eaux souterraines, le modèle de transport *TR2* utilise donc le champ de vitesses du modèle d'écoulement calé (Section 6.3). En effet, l'orientation des vecteurs de vitesse permet de définir les conditions limites attribuées aux nœuds en surface puisque les vecteurs pointant à l'extérieur du domaine modélisé définissent les éléments de surface associés aux zones de recharge. Un gradient d'âge nul a donc été appliqué sur ces quelques éléments en surface matérialisant les secteurs de recharge. Un gradient d'âge nul a donc été appliqué sur le reste des éléments en surface matérialisant les secteurs de recharge. Un gradient d'âge nul a également été imposé à la base du modèle et aux limites latérales à flux nul.

La molécule d'eau est définie dans *TR2* comme un composé conservateur, c'est-à-dire sans dégradation, dont le coefficient de diffusion moléculaire (D\*), égal à 10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>/s, est analogue à un traceur. Finalement, la dispersion est définie par quatre composantes de dispersivité : deux longitudinales ( $\alpha_{LH}$  et  $\alpha_{LV}$ ) et deux transversales ( $\alpha_{TH}$  et  $\alpha_{TV}$ ). Plusieurs relations relient la dispersivité longitudinale à l'échelle du domaine modélisé, dont celle de Xu et Eckstein (1995) :

$$\alpha_L = 0.83 * (log_{10}L)^{2.414} \tag{13}$$

Оù

 $\alpha_L$  : dispersivité longitudinale,

L : longueur du domaine modélisé.

Ainsi, la dispersivité longitudinale horizontale utilisée dans le modèle ( $\alpha_{LH}$  = 50 m) est du même ordre que la valeur théorique estimée à partir de cette relation ( $\alpha_{LH}$  = 23 m). Cette valeur est également cohérente à la gamme théorique déduite de la relation de Schulze-Makuch (2005). La valeur de dispersivité longitudinale verticale ( $\alpha_{LV}$ ) choisie était égale à 10 m tandis que les deux composantes transversales ( $\alpha_{TH}$  et  $\alpha_{TV}$ ) étaient égales à 0.05 m.

#### 6.4.2 Vérification de la discrétisation

Afin de s'assurer que le modèle numérique calé ne présente pas d'erreurs numériques, il est nécessaire de s'assurer du respect des critères de précision. En effet, la taille des cellules du maillage est gouvernée par le nombre de Peclet, tandis que le pas de temps utilisé pour les simulations du temps de résidence des eaux souterraine doit respecter le nombre de Courant (Molson et Frind, 2014). Ces deux critères sont susceptibles de ne pas être respectés sur les zones où les vitesses d'écoulement sont les plus importantes (Figure 6.8).

L'écoulement se fait surtout dans le roc très fracturé où les vitesses sont généralement supérieures à 0.5 m/an (Figure 6.7). Elles peuvent même atteindre plus de 10 m/an sur certaines portions sommitales du roc (Figure 6.8). Les vitesses d'écoulement dans le roc diminuent très rapidement vers la base du modèle lorsque la conductivité hydraulique du roc devient très faible (Figure 6.7). En effet, dans le roc peu fracturé, les vitesses des eaux souterraines sont généralement inférieures à 0.1 m/an.



Figure 6.7 – Profil 1D vertical des vitesses des eaux souterraines extrait de la figure 6.8.

Le simulateur *TR2* génère un fichier compilant les critères de Peclet et de Courant pour chaque élément du modèle numérique. Il est donc facile de vérifier le respect de ces deux critères de précision. Il est à noter que la définition du critère de stabilité du nombre de Courant dans le simulateur *TR2* est basée sur les pas de temps utilisés lors des simulations de l'âge moyen des eaux souterraines (20 et 400 jours). Les nombres de Peclet et de Courant dans le modèle développé sont généralement respectés, validant ainsi la discrétisation dans l'espace et dans le temps du modèle numérique. En effet, la discrétisation dans l'espace est conforme au nombre de Peclet puisque ce dernier est inférieur à 2 sur l'ensemble du maillage. Selon l'axe des x, seuls 22 éléments sur 15 219 ne respectent pas le critère de Courant, ce qui est très peu et donc considéré raisonnable au regard de la taille du domaine modélisé. Selon l'axe z, seuls 11 éléments présentent un nombre de Courant supérieur à 0.5 fois le nombre de Peclet ; les pas de temps utilisés sont donc conformes selon cette direction.



Figure 6.8 – Modèle numérique 2D présentant les vitesses des eaux souterraines et les lignes d'écoulement en régime permanent sur la coupe BB' : le flux n'est pas uniforme entre chaque ligne de courant et le profil 1D de vitesses situé à +200 m par rapport à l'origine du modèle (ligne blanche) correspond à la figure 6.7.

#### 6.5 Résultats des simulations

La conceptualisation du système (Section 6.2) a permis de développer un modèle numérique 2D simple permettant de mieux comprendre la dynamique d'écoulement sur le secteur d'étude. Cette étude s'est basée sur l'utilisation combinée d'un modèle d'écoulement et de transport qui inclut le calcul du temps de résidence des eaux souterraines. Le modèle développé reproduit de façon satisfaisante la surface libre de la nappe (Section 6.3.4) et a permis de fournir des vitesses d'écoulement puis des temps de résidence (Section 6.4), afin de mieux cerner le comportement général des eaux souterraines sur le secteur de McCully.

#### 6.5.1 Système d'écoulement de l'eau souterraine

La figure 6.9 illustre le patron d'écoulement en régime permanent obtenu après calage le long de la coupe BB'. La figure est divisée en deux parties avec, à la base, le modèle d'écoulement global (-1 500 à 500 m/NMM) et en haut, un plus grand niveau de détail de la section supérieure du modèle (-100 à 250 m/NMM). Sur cette figure sont représentées les charges hydrauliques et les lignes d'écoulement.

Bien que le modèle numérique bidimensionnel affiche l'existence d'un écoulement profond, la région est dominée par des systèmes intermédiaires et locaux avec un écoulement significatif uniquement dans le roc fracturé peu profond. Sur cette coupe, la rivière Kennebecasis et les cours d'eau majeurs drainent la nappe et agissent comme exutoires des eaux souterraines du système aquifère. Les deux hauts topographiques situés de part et d'autre du profil agissent comme les deux crêtes piézométriques majeures du profil et contribuent aux composantes profondes et intermédiaires de l'écoulement.

La majorité de l'écoulement se concentre dans la partie sommitale de l'aquifère au roc jusqu'à une profondeur de l'ordre de 100 m. Ce constat est à relier au fort contraste de conductivité hydraulique imposé dans le modèle à cet endroit (deux ordres de grandeur).reflétant le degré de fracturation défini selon des données de terrain disponibles et celles trouvées dans la littérature. Des vitesses importantes sont également enregistrées dans le roc fracturé à très fracturé (Figure 6.8). Cet écoulement actif, limité aux 100 premiers mètres sous la surface, est également caractérisé par la présence de plusieurs systèmes locaux entre 0 et 20 m de profondeur. Les cours d'eau mineurs sont les principaux exutoires de ces systèmes d'écoulement superficiels qui semblent alimentés par une recharge issue de quelques reliefs secondaires.

Finalement, le patron d'écoulement suggère également la présence d'une composante profonde de l'écoulement dont la rivière Kennebecasis constitue l'exutoire ultime. L'eau souterraine y circule très lentement à des vitesses très largement inférieures à 0.1 m/an (Figure 6.8).



Figure 6.9 – Modèle numérique 2D présentant les charges hydrauliques et les lignes d'écoulement en régime permanent sur la coupe BB' : le flux n'est pas uniforme entre chaque ligne de courant.

Le choix de faire correspondre la base du modèle 2D à la base du groupe de Windsor (Section 6.2) est donc justifié par la distribution des écoulements en profondeur. En effet, au sein du système modélisé, l'écoulement décroît rapidement en dessous de 200 m de profondeur et est négligeable dans l'unité évaporitique. Considérer l'effet de densité aurait d'autant plus diminué les vitesses d'écoulement vers la base du domaine modélisé.

#### 6.5.2 Temps de résidence

La distribution des âges advectifs-dispersifs est présentée sur la figure 6.10. Le régime permanent a été atteint après 2 Ma à la base du système. Toutefois, dans la partie active de l'écoulement, le système devient beaucoup plus rapidement stable, soit après 50 000 ans.

Les systèmes locaux identifiés dans les 20 premiers mètres du roc sont caractérisés par un renouvellement important des eaux souterraines par les eaux de recharge traduit par des temps de résidence généralement inférieurs à 5 000 ans.

À la base du roc très fracturé, soit à une profondeur de l'ordre de 100 m, des eaux légèrement plus âgées issues des hauts topographiques régionaux peuvent être rencontrées. Dans le secteur d'émergence de la rivière Kennebecasis, des eaux plus évoluées peuvent donc être rencontrées. Les simulations du temps de résidence apportent un nouvel élément dans la compréhension du système par rapport au modèle d'écoulement (Section 6.5.1). En effet, au sud de la rivière Kennebecasis, la composante intermédiaire de l'écoulement peut mener à des eaux souterraines plus évoluées (entre 50 000 et 100 000 ans) que dans la partie nord du profil où les eaux souterraines sont plus jeunes (entre 5 000 et 50 000 ans).

Cette distribution du temps de résidence des eaux souterraines est à mettre en parallèle avec les résultats des analyses géochimiques (Section 2.4.6). Les puits échantillonnés ayant été forés jusqu'à une profondeur maximale de 80 m, ces analyses sont donc représentatives de la partie superficielle du roc fracturé, là où se concentre la partie active de l'écoulement. Sur la plupart des puits, les analyses mettent en évidence la présence d'eaux jeunes peu évoluées de type Ca-HCO<sub>3</sub>. Dans la majorité des puits, la présence de tritium dans les eaux souterraines implique un renouvellement de l'aquifère par des eaux jeunes issues de la recharge. Ces résultats appuient donc la représentativité du modèle d'écoulement puisque la partie sommitale du roc fracturé est généralement caractérisée par des systèmes d'écoulement locaux transportant des eaux relativement jeunes. Seuls les puits PO-01 et PO-02 affichent un comportement différent marqué par l'absence de tritium et la présence d'eaux plus évoluées, respectivement de type Ca-SO<sub>4</sub> et Ca-Cl, vraisemblablement reliées à la présence d'un écoulement ascendant pour PO-2 et d'une composante d'écoulement plus profonde recoupant le dôme de sel du groupe de Windsor. La concordance entre les simulations et les analyses géochimiques confirme donc la représentativité du système d'écoulement modélisé sur le secteur de McCully.



Figure 6.10 – Modèle numérique 2D simulant l'âge advectif-dispersif des eaux souterraines et les lignes d'écoulement sur la coupe BB' : le flux n'est pas uniforme entre chaque ligne d'écoulement.

#### 6.6 Pistes d'amélioration du modèle d'écoulement et de transport

Ce travail de modélisation a impliqué la réalisation de nombreuses simulations permettant de recenser divers points nécessitant des améliorations. Ces derniers sont fondamentaux afin de mieux représenter le comportement du système d'écoulement et de transport le long du profil 2D. Ces nouveaux éléments seront intégrés dans les prochaines modélisations puis incorporés au sein d'une publication.

Les points essentiels à préciser sont énumérés et détaillés ci-dessous :

1) Au sein du roc, trois domaines ont été modélisés dans le but de représenter la décroissance de la fracturation du roc selon la profondeur (Section 6.3.2) afin d'être conforme aux observations de terrain (Section 5.3.1). Toutefois, la réduction de la conductivité hydraulique de deux ordres de grandeur entre ces domaines semble trop brutale (Section 6.3.3). Par conséquent, l'écoulement actif des eaux souterraines est fortement contraint par ce contraste marqué et se concentre alors essentiellement dans la partie sommitale du roc correspondant aux 100 premiers mètres sous la surface. Il serait donc préférable de diminuer progressivement la conductivité hydraulique au sein du roc au lieu de modéliser trois domaines distincts.

2) Les résultats du processus de calage (Section 6.3.4) sont jugés satisfaisants en considérant les hypothèses simplificatrices émises (Section 6.3.1) et les paramètres d'entrée du modèle qui sont la conductivité hydraulique attribuée aux différentes unités géologiques et le taux de recharge imposée en surface. Cependant, la valeur de conductivité hydraulique attribuée au groupe de Mabou est basée sur la plage des valeurs disponibles, mais située dans la tranche inférieure ( $K_h = 9.0 \times 10^{-7}$  m/s) et donc d'un ordre de grandeur inférieure à la valeur médiane ( $K_h = 1.8 \times 10^{-5}$  m/s). De fait de la non-unicité des solutions d'un modèle numérique (Oreskes *et al.*, 1994), il serait judicieux de revoir les valeurs de conductivité hydraulique en considérant la décroissance progressive de la fracturation au sein du roc tout en s'approchant de la valeur médiane de  $K_h$  dans la partie supérieure du roc fracturé. Pour cela, le taux de recharge devra vraisemblablement être ajusté afin de bien reproduire la surface de la nappe libre le long du profil BB' en testant diverses combinaisons de conductivité hydraulique et de recharge.

3) Pour les unités de tills, la porosité attribuée a été déduite des analyses granulométriques (Section 5.1.1) sans toutefois tenir compte de l'étalement important des tills (coefficient d'uniformité médian égal à 14.3) ni de la compaction des terrains en place. Ainsi, la combinaison de ces deux facteurs aura tendance à réduire la porosité des unités de tills. Cette réduction de la porosité des tills, non intégrée dans les présents travaux de modélisation, sera traitée dans un modèle final et devrait avoir pour effet d'augmenter légèrement le temps de résidence simulé à l'issue du modèle de transport.

## 7 CONCLUSIONS

Au sud du Nouveau-Brunswick, le récent développement des techniques d'extraction a conduit l'industrie gazière à exploiter de nouvelles ressources, dites non conventionnelles, à partir de réservoirs situés à plus de 2 km de profondeur. Ces unités peu perméables nécessitent le recours à la fracturation hydraulique pour y extraire le gaz naturel piégé. Suite à cet essor rapide, de nombreuses inquiétudes environnementales et sanitaires ont émergé, incitant le gouvernement du Nouveau-Brunswick à mettre en place un moratoire interdisant la fracturation hydraulique.

Cette étude s'inscrit dans un projet global mené par la Commission géologique du Canada (CGC) visant à évaluer la vulnérabilité de l'aquifère superficiel par rapport aux activités industrielles profondes en tenant compte des conditions spécifiques rencontrées dans une région. Ce projet de la CGC est l'un des rares exemples internationaux d'étude de ce type incluant plusieurs volets multidisciplinaires : géologique, géophysique, géochimique et hydrogéologique. Cette étude a porté sur deux axes du volet hydrogéologique : 1) la caractérisation hydrogéologique des unités superficielles comprenant la définition des propriétés hydrauliques et des conditions rencontrées dans l'aquifère rocheux superficiel menant au développement d'un modèle conceptuel du système d'écoulement et 2) le développement d'un modèle 2D permettant de comprendre quantitativement les conditions d'écoulement dans l'aquifère et la partie supérieure de la zone intermédiaire. Les études hydrogéologiques étant plutôt rares dans cette région, ce travail a nécessité l'acquisition de données de terrain afin de compléter les informations disponibles.

## 7.1 Éléments clefs

Ces travaux ont permis de mettre en exergue plusieurs points clefs :

1) Sur le territoire, la couverture de sédiments meubles est relativement peu épaisse. L'interpolation par krigeage ordinaire de 1 030 données stratigraphiques ponctuelles a permis d'établir une carte de la distribution de l'épaisseur des dépôts superficiels sur les deux bassins. D'après cette carte, les principales accumulations de sédiments se retrouvent à l'aval du bassin de la rivière Pollett et au nord de la rivière Kennebecasis. Au sud de ces bassins, l'amorce des collines Calédoniennes est caractérisée par des dépôts plus minces. La couverture quaternaire est généralement comprise entre 2.1 et 3.7 m d'épaisseur. La région d'étude est recouverte sur près de 89 % de sa surface par des tills glaciaires relativement perméables (K<sub>médiane</sub> =  $8x10^{-6}$  m/s) caractérisés par une matrice sablo-graveleuse. Sus-jacents à ces dépôts superficiels, les horizons de sols présentent également une texture moyenne à grossière dans 89 % des cas.

191

2) Sur ce territoire, essentiellement rural, les puits domestiques, aménagés dans la partie superficielle du roc, constituent le principal moyen d'approvisionnement en eau potable. Ainsi, 96 % de ces puits résidentiels captent l'aquifère au roc et leur profondeur est généralement comprise entre 20 et 60 m. Cet aquifère régional est caractérisé par une alternance de grès, de conglomérats et de mudstones au sein desquels l'écoulement est contrôlé par le réseau de fractures ouvertes. Ces fractures sont majoritairement développées dans les plans de litages et interconnectées entre elles par des structures verticales. La conductivité hydraulique du roc avoisine les 2x10<sup>-5</sup> m/s dans sa partie sommitale, soit probablement jusqu'à une profondeur de l'ordre de 50 à 80 m. La conductivité hydraulique est étroitement liée à l'intensité de fracturation du roc qui tend à diminuer en profondeur, concentrant la majorité de l'écoulement dans la partie superficielle du roc fracturé.

3) L'aquifère régional est caractérisé par des conditions de nappe libre reliées à la texture grossière des dépôts superficiels et leur faible épaisseur. La surface piézométrique est fortement contrôlée par la topographie, mais également par les rivières qui constituent les exutoires des eaux souterraines. L'interpolation par krigeage avec dérive externe reliée à la topographie a ainsi défini la piézométrie des deux bassins hydrogéologiques souterrains, semblant être la quasi-reproduction des bassins versants de surface. Sur la région d'étude, la surface libre de la nappe est peu profonde et généralement comprise entre 2 et 13 m par rapport à la surface. La surface libre de la nappe peut néanmoins atteindre une vingtaine de mètres sous les principaux reliefs.

4) L'aquifère au roc est alimenté par une recharge de l'ordre de 300 mm/an sur le bassin versant de la rivière Kennebecasis. Cet apport est moindre sur le bassin voisin de la rivière Pollett, puisque compris entre 220 et 240 mm/an selon les données climatiques disponibles et l'absence de station de jaugeage pour le calage. Une année hydrologique type est marquée par deux principaux épisodes de recharge dus à : a) la fonte des neiges au terme de l'hiver et b) la pluviométrie importante de l'automne. D'après la carte de distribution de la recharge sur la région d'étude établie à partir du modèle d'infiltration *HELP*, les secteurs de recharge préférentielle sont associés aux zones de roc affleurant ou de sol mince. À l'échelle locale, ce taux de recharge peut largement varier, comme en témoignent les résultats obtenus avec la méthode des bilans combinés du modèle *GWHAT*. Sur les bassins, l'infiltration vers la nappe est étroitement liée au coefficient de ruissellement et au couvert végétal, mais aussi aux propriétés hydrauliques et à l'épaisseur des dépôts superficiels et du sol. Sur le bassin de la rivière Kennebecasis, les eaux souterraines contribuent annuellement à 50 % du débit total du cours d'eau.

5) La vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère au roc a été évaluée à partir de l'indice DRASTIC et du temps de transit vertical (Downward Advective Time – DAT) qui a donné le même portrait de distribution spatiale de la vulnérabilité relative que l'indice DRASTIC. Le territoire est couvert par une vulnérabilité moyenne sur près de 42 % de sa surface. Les zones de vulnérabilité élevée à très élevée, dites sensibles, représentent près de 22 % de la surface des bassins. Les vulnérabilités moyennes à très élevées observées s'expliquent par a) le caractère libre de la nappe, b) la granulométrie grossière des dépôts quaternaires, c) la conductivité hydraulique relativement élevée du roc et d) la faible épaisseur de la zone vadose. Tous ces facteurs favorisent les courts délais de transfert advectif vertical vers la nappe à travers la zone non saturée. Cependant, en raison du couvert forestier important sur la région d'étude et ainsi la faible intensité des activités anthropiques, le risque face aux contaminations de surface semble limité. Seuls 5 % des parcelles agricoles et 1 % des secteurs urbains sont situés au droit de zones sensibles. Toutefois, près de la moitié des forages gaziers de Corridor Resources Inc. sont implantés sur des secteurs vulnérables. Sur ces sites, un épanchement accidentel en surface induirait une contamination rapide des eaux souterraines entrainant une dégradation de leur qualité. Ceci est d'autant plus vrai pour les forages gaziers du site de McCully, généralement localisés sur des secteurs peu pentus favorisant l'infiltration vers la nappe peu profonde.

Toutes ces informations ont permis le développement de modèles conceptuels géologique et hydrogéologique représentant les conditions du territoire. Ces derniers ont défini l'architecture initiale du modèle numérique bidimensionnel, permettant alors de simuler le système d'écoulement en régime permanent et le temps de résidence des eaux souterraines avec le modèle FLONET/TR2. Même si le modèle numérique suggère la présence d'une composante profonde d'écoulement, la région est principalement dominée par des systèmes d'écoulement intermédiaires et locaux concentrés dans la partie superficielle du roc fracturé (moins de 100 m de profondeur). Les systèmes locaux peu profonds sont caractérisés par un renouvellement important des eaux souterraines par les eaux de recharge et des temps de résidence n'excédant pas les 5 000 ans. Les analyses géochimiques, représentatives des 80 premiers mètres du roc, confirment bien la présence d'eaux jeunes de type Ca-HCO<sub>3</sub> marquées par un apport important d'eau issu de la recharge indiqué par la présence de tritium. Localement, la dynamique active de l'écoulement semble limitée aux 50 à 100 premiers mètres sous la surface d'après les données de terrain, là où le réseau de fractures interconnectées est le plus important. Sous cette zone active, la décroissance de l'intensité de la fracturation réduit probablement les écoulements. À l'échelle régionale, la recharge issue des hauts topographiques principaux contribue en partie à la composante profonde de l'écoulement dont la rivière Kennebecasis constitue l'exutoire ultime.

193

Sur le secteur de McCully, la modélisation numérique suggère qu'aucun lien rapide et direct n'existe entre les écoulements profonds et l'aquifère superficiel. Les propriétés de l'unité évaporitique et la réduction rapide du degré de fracturation dans le roc restreignent fortement les écoulements au-dessus des réservoirs non conventionnels de la formation d'Albert. La propagation vers la surface d'éventuelles fractures, naturelles ou induites, est en effet limitée par de forts contrastes géomécaniques dans les unités intermédiaires des groupes de Sussex et de Windsor (Séjourné, 2017). De plus, les structures subverticales, qui pourraient constituer des voies préférentielles de migration d'hydrocarbures vers la surface, seraient limitées au groupe de Horton (Rivard *et al.*, 2017). Ainsi, l'épaisseur significative du groupe de Sussex et la présence de l'unité évaporitique du groupe de Windsor offrent une protection efficace des aquifères superficiels face aux éventuelles remontées de fluides (eau de fracturation, eau de formation ou hydrocarbures) depuis les réservoirs non conventionnels. Cependant, ni la caractérisation ni le modèle numérique ne se sont intéressés spécifiquement à la présence et au rôle des zones de failles dans le cadre de cette étude.

## 7.2 Apports scientifiques et pratiques

D'un point de vue global, cette étude a démontré la nécessité de combiner les compétences d'une équipe multidisciplinaire afin de caractériser les conditions hydrogéologiques au droit des réservoirs gaziers non conventionnels. En effet, le développement du modèle conceptuel a nécessité les informations issues de l'analyse structurale et géomécanique conduite par Séjourné (2017) afin de définir les limites du domaine modélisé. L'apport de la géochimie a également permis de soutenir les résultats de la modélisation numérique et de confirmer la vulnérabilité de l'aquifère face à d'éventuelles contaminations de surface. En complément, la modélisation du système d'écoulement peut aider à comprendre l'occurrence de certains types d'eau rencontrés dans plusieurs puits d'observation en surface. Cet apport mutuel de connaissances est d'ailleurs recommandé par Jackson *et al.* (2013) afin de pouvoir définir un modèle conceptuel réaliste et de vérifier la plausibilité du modèle d'écoulement.

Il est admis que les systèmes hydrogéologiques ne sont pas reproductibles d'un bassin à un autre. En effet, Kissinger *et al.* (2013) suggèrent qu'il est primordial d'établir les conditions propres à chaque territoire. Aucun projet de cette envergure n'avait été auparavant réalisé au sud du Nouveau-Brunswick et très rarement au niveau international.

Ce volet des travaux, documenté dans le présent mémoire, a ainsi amélioré de facon significative la compréhension du système hydrogéologue à une échelle régionale en se basant sur des études similaires réalisées au Québec (Ladevèze et al., 2016, Raynauld, 2014). Ce volet a notamment permis de définir le degré de vulnérabilité de la nappe face à d'éventuelles contaminations de surface et démontré que le potentiel de migration des fluides (eau de formation ou hydrocarbures) à travers la zone intermédiaire est très peu probable sur le site de McCully et par extension sur le site d'Elgin (Séjourné, 2017). À une échelle locale, il est toutefois conseillé de réaliser des études complémentaires en collectant et en utilisant des données spécifiques à chaque site d'implantation d'un forage gazier ou dans son environnement proche. C'est déjà le cas dans la province voisine du Québec qui impose systématiquement la réalisation d'une étude de caractérisation hydrogéologique avant tout projet de forage visant à explorer ou exploiter des hydrocarbures (Lefebvre et Raynauld, 2017). Au Québec, les futurs forages pétroliers ou gaziers d'ailleurs régis par le chapitre V du Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (RPEP) (Québec, 2014). Les informations produites par une étude de caractérisation hydrogéologique régionale, telles que celles extraites du présent document, pourront ainsi être utilisées plus spécifiquement dans de futurs projets de l'industrie pétrolière et gazière afin de préserver la ressource en eau souterraine comme ce fut le cas par exemple sur le secteur d'Haldimand, en Gaspésie, au Québec (Raynauld, 2014, Raynauld et al., 2014).

Cette étude illustre également l'intérêt de comparer plusieurs méthodes afin de contraindre les résultats obtenus et de mieux saisir le comportement du système. Ce fut notamment le cas pour a) établir la carte piézométrique, b) déterminer les conditions de confinement de la nappe, c) estimer le taux de recharge moyen sur les bassins et d) définir le degré de vulnérabilité de la nappe. En effet, l'analyse comparative des diverses méthodes d'interpolation de la carte piézométrique a montré que l'utilisation d'informations complémentaires, issues de la topographie, améliorait considérablement l'allure générale de la surface de la nappe (Desbarats et al., 2002). Pour la définition des conditions de confinement, la fonction de réponse barométrique (Barometric Response Function – BRF) fournit des informations supplémentaires aux méthodes conventionnelles basées sur la stratigraphie des sédiments superficiels ou les hydrogrammes de puits. La FRB, bien que très peu utilisée, permet donc de réduire la subjectivité des approches classiques et d'améliorer la définition de l'état de confinement de l'aquifère (Ladevèze, 2017a). Par ailleurs, la recharge étant généralement difficile à évaluer à large échelle du fait des nombreux paramètres impliqués dans ce processus (Healy, 2010), il est recommandé d'utiliser plusieurs outils d'estimation afin de réduire les incertitudes reliées à chaque méthode (Scanlon et al., 2002).

195

Ce travail a donc permis de contraindre les estimations du taux de recharge à partir de trois approches différentes, dont une, couplant deux bilans en eau avec le logiciel *GWHAT* (Gosselin *et al.*, 2017). Les jeux de données utilisés dans cette étude ont participé à l'amélioration de cet outil simple et efficace, récemment développé par Gosselin (2016).

Finalement, la définition du degré de vulnérabilité de l'aquifère au roc a été réalisée à l'aide de l'indice DRASTIC, un outil couramment utilisé dans le cadre d'études de caractérisation régionale. Toutefois, les résultats de cette approche sont souvent peu comparés ou supportés par des méthodes d'analyse complémentaires. Dans le but d'augmenter le niveau de confiance accordé à cette méthode conventionnelle, le temps de transfert advectif vertical (*Downward Advective Time* – DAT) vers la nappe a été estimé (Ross *et al.*, 2004), puis comparé aux analyses géochimiques des eaux souterraines de l'aquifère superficiel. Dans le cadre de cette étude, la combinaison de divers outils disponibles pour définir les paramètres a permis de réduire leur incertitude, permettant de définir un modèle conceptuel simple et réaliste à l'échelle régionale, tout en fournissant les données requises pour contraindre et vérifier la représentativité du modèle numérique représentant le système d'écoulement.

## 7.3 Recommandations et perspectives

Pour toute étude de caractérisation hydrogéologique régionale réalisée en contexte d'exploitation gazière, l'accès aux données se révèle être une condition prépondérante. En amont, il est donc conseillé de faire intervenir chaque acteur pouvant être affecté par les activités gazières ou détenir des données afin de les impliquer directement dans le projet : gouvernement fédéral, province, municipalités, population locale ou encore secteur agricole. Dans le cadre de cette étude, les données proviennent essentiellement de la province ou du gouvernement fédéral et dans une moindre mesure de quelques résidents locaux. L'implication des acteurs locaux assure l'accès à des données spécifiques. Ils peuvent par exemple fournir des données telles que les caractéristiques de leur puits ou participer à l'étude en acceptant l'implantation d'un puits d'observation chez eux ou l'échantillonnage de leur puits résidentiel.

L'échelle régionale considérée dans ce projet implique certaines limitations, en grande partie liées aux incertitudes sur les paramètres d'entrée et à la grande variabilité des propriétés hydrauliques au sein du territoire (1 417 km<sup>2</sup>). Il est donc nécessaire d'accorder une attention toute particulière aux données brutes disponibles provenant majoritairement de la base de données provinciale, ces dernières n'ayant généralement jamais fait l'objet de phase de traitement ou de validation.

De plus, l'hétérogénéité de la région d'étude peut se traduire à petite échelle par des conditions hydrogéologiques spécifiques au site. Ceci est particulièrement vrai pour a) les propriétés hydrauliques du roc superficiel contrôlées par le degré de fracturation, b) l'épaisseur et les propriétés de la couverture sédimentaire, c) le taux de recharge ou encore d) la vulnérabilité, qui affichent des variations spatiales importantes sur le territoire.

La conceptualisation du système hydrogéologique a permis le développement d'un modèle numérique représentatif du comportement général du système d'écoulement dans l'aquifère et la partie supérieure de la zone intermédiaire au-dessus du champ gazier de McCully. Ce modèle simple, mais réaliste pourrait alors être complexifié selon le niveau de précision désiré (Hill, 2006) en se basant sur les travaux réalisés par Janos et al. (2018). Ainsi, comme suggéré dans la section 6.6, la diminution progressive de l'intensité de la fracturation en profondeur pourrait être représentée par un modèle de décroissance de la conductivité hydraulique (Jiang et al., 2010) au lieu des trois niveaux de fracturation intégrés dans le présent modèle. Pour l'instant, la transition est probablement trop brutale entre ces trois domaines, ce qui exerce un contrôle important sur le système d'écoulement en concentrant l'écoulement actif des eaux souterraines dans la partie sommitale du roc, soit dans les 100 premiers mètres sous la surface. Une réduction plus progressive de la conductivité hydraulique selon la profondeur devrait permettre de mieux représenter les conditions d'écoulement dans le roc. Le rôle des failles recoupant le groupe de Windsor pourrait également être évalué à partir de différents cas de figure détaillés par Janos (2017). Tel que réalisé par Janos et al. (2018), le calage du modèle pourrait alors être réalisé en utilisant le programme PEST (Doherty, 2015), permettant de tester plusieurs combinaisons de recharge et de conductivité hydraulique et ainsi réduire l'erreur sur le niveau de nappe simulé tout en produisant des estimations plus précises des conditions hydrogéologiques. De cette façon, la valeur de conductivité hydraulique attribuée au groupe de Mabou correspondant à la fourchette basse des essais à choc hydraulique ( $K_h = 9.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ) devra être idéalement révisée à la hausse afin d'être plus en adéquation avec la médiane déduite des essais de perméabilité (K<sub>h</sub> = 1.8x10<sup>-5</sup> m/s) (Section 6.6). Dans un premier temps, cette étape pourra être réalisée en présumant que le taux de recharge moyen (R = 300 mm/an) estimé avec le modèle d'infiltration HELP est cohérent le long du profil 2D. Dans le cas du temps de résidence des eaux souterraines, la modification à apporter pourra concerner la valeur de porosité moyenne des tills glaciaires (Section 6.6). Même si cette valeur de porosité (n = 0.42) intégrée dans le modèle de transport retranscrit bien la granulométrie relativement grossière des unités de tills rencontrées sur le territoire, l'étalement important du matériel au sein des tills et la compaction des terrains devraient réduire quelque peu cette valeur.

197

# 8 RÉFÉRENCES

## Corps du texte

- Aalund H et Wicklund RE (1950) Soil survey report of Southeastern New Brunswick. (Dominion Department of Agriculture, Fredericton, NB), p 108.
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (2010) *Inventaire annuel des cultures.* Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa, ON, SIG GeoTIF.
- Al TA, Leblanc J et Phillips S (2013) A Study of Groundwater Quality from Domestic Wells in the Sussex and Elgin Regions, New Brunswick: With Comparison to Deep Formation Water and Gas from the McCully Gas Field. (Geological Survey of Canada, Ottawa, ON), p 40.
- Aller L, Lehr JH, Petty R et Bennett T (1987) DRASTIC: a standardized system to evaluate groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. (United States Environmental Protection Agency, Chicago, IL), p 622.
- AMEC (2016) Environmental impact assessment Mine decommissioning Penobsquis potash deposit. (Amec Foster Wheeler Environment & Infrastructure, A Division of Amec Foster Wheeler Americas Limited, Fredericton, NB), p 72.
- AMEC (2018) Final raport Technical feasibility study of the geothermal capability of the Penobsquis mine site Penobsquis, NB. (Amec Foster Wheeler Environment & Infrastructure, A Division of Amec Foster Wheeler Americas Limited, Fredericton, NB), p 44.
- Anderson MP et Woessner WW (1992) *Applied groundwater modeling.* Academic Press, San Diego, CA. 381 p.
- API (2016) Energizing America: Facts for Addressing Energy Policy. (American Petroleum Institute, Washington, DC), p 63.
- Baalousha H (2005) Using CRD method for quantification of groundwater recharge in the Gaza Strip, Palestine. *Environmental Geology* 48(7):889-900.
- Barlow PM, Cunningham WL, Zhai T et Gray M (2015) US Geological Survey groundwater toolbox, a graphical and mapping interface for analysis of hydrologic data (version 1.0): user guide for estimation of base flow, runoff, and groundwater recharge from streamflow data. (US Geological Survey, Reston, VA), p 27.
- Barr SM, White CE, Peter CJ et Johnson SC (2005a) *Bedrock geology of the Sussex area (NTS 21 H/12). Kings and Queens counties, New Brunswick.* New Brunswick Department of Natural Resources, Fredericton, NB, (1:50 000).
- Barr SM, White CE et St Peter CJ (2005b) *Bedrock geology of the Waterford area (NTS 21 H/11). Saint John, Kings and Albert counties, New Brunswick.* New Brunswick Department of Natural Resources, Fredericton, NB, (1:50 000).

Barton D (2018) *Chemical and Stable Isotopic Characterization of Geofluids at an Unconventional Natural Gas Field in New Brunswick, Canada* Master of Science (University of Ottawa, Department of Earth and Environmental Sciences, Ottawa, ON). 73 p.

- Benhamanne S (2002) Évaluation des différentes méthodes de séparation d'hydrogrammes pour évaluer les impacts potentiels des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine dans l'est du Canada. Rapport de stage (Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, QC). 39 p.
- Bohling GC, Jin W et Butler JJ (2011) Kansas Geological Survey barometric response function software user's guide. (The University of Kansas, Lawrence, KS), p 23.
- Boisvert V (2004) *Hydrogéologie des formations quaternaires et influence sur la recharge dans la région de Moncton, Nouveau-Brunswick.* Maîtrise en Sciences de la Terre (Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, QC). 133 p.
- Bouwer H et Rice RC (1976) A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water resources research* 12(3):423-428.
- Brinsmead RA et Finamore PF (1977) Aggregate resources of the Sussex map-area (21H/12) and part of the Hampstead map-area (21G/9E) including surficial geology of Sussex east (21H/12E). (Department of Natural Resources, Fredericton, NB), p 33.
- Brinsmead RA et Seaman AA (1987) Granular aggregate resources Petitcodiac (NTS 21 H/14) map area, New Brunswick. (Department of Natural Resources, Fredericton, NB), p 98.
- Broster BE et Pupek DA (2001) The significance of buried landscape in subsurface migration of dense non-aqueous phase liquids; the case of perchloroethylene in the Sussex Aquifer, New Brunswick. *Environmental & Engineering Geoscience* 7(1):17-29.
- Butler JJ, Jin W, Mohammed GA et Reboulet EC (2011) New insights from well responses to fluctuations in barometric pressure. *Groundwater* 49(4):525-533.
- Caine JS, Evans JP et Forster CB (1996) Fault zone architecture and permeability structure. *Geology* 24(11):1025-1028.
- Carr PA (1964) *Geology and Hydrogeology of the Moncton Map-area, New Brunswick, Canada.* Ph.D. thesis (University of Illinois, Urbana-Champaign, IL). 104 p.
- Carrier M-A (2008) *Synthèse hydrogéologique du Nord du Ghana*. Maîtrise en Sciences de la Terre (Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, QC). 259 p.
- Carrier M-A, Lefebvre R, Rivard C, Parent M, Ballard J-M, Benoît N, Vigneault H, Beaudry C, Malet X, Laurencelle M, Gosselin J-S, Ladevèze P, Thériault R, Beaudin I, Michaud A, Pugin A, Morin R, Crow H, Gloaguen E, Bleser J, Martin A et Lavoie D (2013) Portrait des ressources en eau souterraine en Montérégie Est, Québec, Canada. (Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau Terre Environnement, Québec, QC), p 283.
- CBC News (2015) *PotashCorp to close Penobsquis mine at end of November.* <u>https://tinyurl.com/nfg8f9i</u> (Consulté le 29 octobre 2015).
- CBC News (2016a) *PotashCorp reveals plans to flood Penobsquis mine.* <u>https://tinyurl.com/y7fw8b2c</u> (Consulté le 3 juin 2016).
- CBC News (2016b) *PotashCorp suspends Picadilly mine in N.B., cuts 430 jobs.* <u>https://tinyurl.com/ydc4uf7e</u> (Consulté le 19 janvier 2016).
- Chapman T (1999) A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. *Hydrological Processes* 13(5):701-714.
- Cloutier V, Blanchette D, Dallaire P-L, Nadeau S, Rosa E et Roy M (2013) Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines de l'Abitibi-Témiscamingue (partie 1). (Groupe de recherche sur l'eau souterraine, Institut de recherche en mines et en environnement, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, QC), p 135.
- Combalicer EA, Lee SH, Ahn S, Kim DY et Im S (2008) Comparing groundwater recharge and base flow in the Bukmoongol small-forested watershed, Korea. *Journal of earth system science* 117(5):553-566.
- Comeau G (2009) Caractérisation hydrogéologique et bilan en eau à la base des Forces canadiennes de Petawawa, Ontario, Canada. Maîtrise en Sciences de la Terre (Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, QC). 159 p.
- Commission du Nouveau-Brunswick sur la fracturation hydraulique (2016) Volume I : Conclusions. (Développement de l'énergie et des ressources, Fredericton, NB), p 38.
- Cooper HH et Jacob CE (1946) A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 27(4):526-534.
- Corridor Corporation Inc. (2016) Annual information form For the Year Ended December 31, 2015. (Corridor Resources Incorporation, Halifax, NS), p 54.
- Corridor Resources (2014) Corridor Announces Initial Results of 2014 Capital Program. https://tinyurl.com/y8mjnwno (Consulté le 6 mai 2017).
- Crosbie RS, Binning P et Kalma JD (2005) A time series approach to inferring groundwater recharge using the water table fluctuation method. *Water Resources Research* 41(1):1-9.
- Croteau A (2006) Détermination de la distribution spatiale et temporelle de la recharge à l'aquifère régional transfrontalier du bassin versant de la rivière Châteauguay, Québec et États-Unis. Maîtrise en Sciences de la Terre (Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, QC). 345 p.
- Croteau A, Nastev M et Lefebvre R (2010) Groundwater recharge assessment in the Chateauguay River watershed. Canadian *Water Resources Journal* 35(4):451-468.
- Crow HL, Cartwright T et Ladevèze P (2017) Downhole geophysical data in a shallow bedrock aquifer near Sussex, New Brunswick. (Geological Survey of Canada, Ottawa, ON), p 56.
- De Marsily G, Combes P et Goblet P (1992) Comment on 'Ground-water models cannot be validated', by LF Konikow & JD Bredehoeft. *Advances in Water Resources* 15(6):367-369.
- Delin GN, Healy RW, Lorenz DL et Nimmo JR (2007) Comparison of local-to regional-scale estimates of ground-water recharge in Minnesota, USA. *Journal of Hydrology* 334(1-2):231-249.
- Departement of Environment (2016) *Online Well Log System.* Government of New Brunswick, Fredericton, NB, Database CSV.
- Department of Environment (2011) *Penobsquis pipeline.* Government of New Brunswick, Fredericton, NB, (Scale omitted).
- Desbarats AJ, Logan CE, Hinton MJ et Sharpe DR (2002) On the kriging of water table elevations using collateral information from a digital elevation model. *Journal of Hydrology* 255(1-4):25-38.

- DesRoches AJ (2017) *Physical characterization of two fractured sedimentary rock aquifers in New Brunswick, Canada with emphasis on the development of self-potential methods.* Doctor of Philosophy (University of New Brunswick, Fredericton, NB). 259 p.
- DesRoches AJ, Butler KE et Pelkey S (2012) Influence of fracture anisotropy and lithological heterogeneity on wellfield response in a fluvial sandstone aquifer of the Carboniferous Moncton Subbasin, Canada. *Hydrogeology Journal* 21(3):559-572.
- Devlin JF (2015) HydrogeoSieveXL: an Excel-based tool to estimate hydraulic conductivity from grain-size analysis. *Hydrogeology Journal* 23(4):837-844.
- Doherty J (2015) Calibration and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models. Watermark Numerical Computing, Brisbane, AU. 227 p.
- Domenico PA et Schwartz FW (1990) *Physical and Chemical Hydrogeology.* John Wiley & Sons Inc., New-York, NY. 824 p.
- Duffield GM (2007) AQTESOLV for Windows. in *Version 4.5 User's Guide* (HydroSOLVE Inc., Reston, VA), p 529.
- Dusseault M et Jackson R (2014) Seepage pathway assessment for natural gas to shallow groundwater during well stimulation, in production, and after abandonment. *Environmental Geosciences* 21(3):107-126.
- Eaton BA (1969) Fracture gradient prediction and its application in oilfield operations. *Journal of petroleum technology* 21(10):353-360.
- Eijkelkamp Agrisearch Equipment (2011) 2800 Operating Instructions 09.07 Guelph Permeameter. (Royal Eijkelkamp Company, Giesbeek, NL), p 44.
- Elrick DE, Reynolds WD et Tan KA (1989) Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses. *Groundwater Monitoring & Remediation* 9(3):184-193.
- Energy and Resource Development (2016) *NB Borehole Database.* Government of New Brunswick, Fredericton, NB, Database CSV.
- Francis RM et Gale JE (1988) Permeability distribution in a fractured sedimentary aquifer system. International Association of Hydrogeologists-Canadian National Chapter (IAH-CNC) Proceedings, Atlantic Region. (Halifax, NS, May 1-5, 1988), p 72-79.
- Freeze RA et Cherry JA (1979) Groundwater. Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ. 604 p.
- Furey PR et Gupta VK (2001) A physically based filter for separating base flow from streamflow time series. *Water Resources Research* 37(11):2709-2722.
- Gassiat C, Gleeson T, Lefebvre R et McKenzie J (2013) Hydraulic fracturing in faulted sedimentary basins: Numerical simulation of potential contamination of shallow aquifers over long time scales. *Water Resources Research* 49(12):8310-8327.
- GEMTEC (2011) Water Supply Source Assessment Marven Road Well. (GEMTEC Consulting Engineers and Scientists Limited, Fredericton, NB), p 19.
- GéoBase (2009) *Couverture du sol, circa 2000 Vectorielle.* Centre d'information topographique, Secteur des sciences de la Terre, Ressources naturelles Canada, Sherbrooke, QC, SIG ESRI Shape File.
- GeoNB (2002) *Modèle Numérique de Terrain (MNT)*. Service Nouveau-Brunswick, Fredericton, NB, SIG Texte ASCII.

- GeoNB (2014) *Entités de drainage de surface.* Ministère des Ressources naturelles, Fredericton, NB, SIG ESRI Shape File.
- GeoNB (2015) Carte générale de la géologie du substrat rocheux du Nouveau-Brunswick, compilée à une échelle de 1:500 000 à partir de cartes détaillées. Ministère de l'Énergie et des Mines, Fredericton, NB, SIG ESRI Shape File.
- GeoNB (2017) *Champs de captage protégés.* Ministère de l'Environnement et Gouvernements locaux, Fredericton, NB, SIG ESRI Shape File.
- Goode DJ (1996) Direct simulation of groundwater age. Water resources research 32(2):289-296.

Google Street View (2013) No Title. https://tinyurl.com/yd2q88ty (Consulté le 15 février 2018).

- Gosselin JS (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. Doctorat en Sciences de la Terre (Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, QC). 185 p.
- Gosselin JS, Lefebvre R, Martel R et Rivard C (2017) GWHAT: Documentation Release 0.2.0. (Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau Terre Environnement, Québec, QC), p 33.
- Gouvernement du Canada (2018a) *Données climatiques historiques*. <u>http://climat.meteo.gc.ca/</u> (Consulté le 15 février 2017).
- Gouvernement du Canada (2018b) *Données hydrométriques historiques.* <u>https://eau.ec.gc.ca/index f.html</u> (Consulté le 15 février 2017).
- Gouvernement du Nouveau-Brunswick (2018) *Géographie*. <u>https://tinyurl.com/y7btbr4u</u> (Consulté le 15 février 2018).
- Guekie Simo AT, Marache A, Lastennet R et Breysse D (2015) Geostatistical investigations for suitable mapping of the water table: the Bordeaux case (France). Hydrogeology journal 24(1):231-248.
- Hamilton T et Li F (2003) A nitrogen slug permeability testing system. *Proceedings of the 17 th Annual Vancouver Geotechnical Society Symposium.* (Vancouver, BC, May 21-22, 2003) The Vancouver Geotechnical Society, Richmond, BC, p 6.
- Healy RW (2010) *Estimating groundwater recharge.* Cambridge University Press, Cambridge, UK. 245 p.
- Healy RW et Cook PG (2002) Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology journal* 10(1):91-109.
- Hill MC (2006) The practical use of simplicity in developing ground water models. *Groundwater* 44(6):775-781.
- Hinds S (2008) Geology of the Mount Pisgah-Peekaboo Corner area, Kings and Albert counties. New Brunswick: Regional Cross-Sections. New Brunswick Department of Natural Resources, Fredericton, NB, (1:50 000).
- Hinds S et Peter CJ (2006) Stratigraphy and structure of the Moncton Subbasin in the Urney-Waterford area, Maritimes Basin, New Brunswick: implications for the McCully Natural Gas field. *Geological Investigations in New Brunswick for 2005,* Martin GL (Édit.) New Brunswick Department of Natural Resources, Fredericton, NB. p 73-102.
- Howarth RW, Ingraffea A et Engelder T (2011) Natural gas: Should fracking stop? *Nature* 477(7364):271-275.

- Hufty A (2001) Introduction à la climatologie : le rayonnement et la température, l'atmosphère, l'eau, le climat et l'activité humaine. Presses Université Laval, Saint-Nicolas, QC. 545 p.
- Hussein MEA, Odling NE et Clark RA (2013) Borehole water level response to barometric pressure as an indicator of aquifer vulnerability. *Water Resources Research* 49(10):7102-7119.
- Hyder Z, Butler JJ, McElwee CD et Liu W (1994) Slug tests in partially penetrating wells. *Water Resources Research* 30(11):2945-2957.
- Institut de l'Énergie du Nouveau-Brunswick (2013) Gestion environnementale responsable des activités liées au pétrole et au gaz naturel au Nouveau-Brunswick - Règles pour l'industrie. (Gouvernement du Nouveau-Brunswick, Fredericton, NB), p 109.
- Jackson RE, Gorody AW, Mayer B, Roy JW, Ryan MC et Van Stempvoort DR (2013) Groundwater protection and unconventional gas extraction: the critical need for fieldbased hydrogeological research. *Groundwater* 51(4):488-510.
- Jackson RE et Heagle DJ (2016) Sampling domestic/farm wells for baseline groundwater quality and fugitive gas. *Hydrogeology Journal* 24(2):269-272.
- Jang J, Narsilio GA et Santamarina JC (2011) Hydraulic conductivity in spatially varying media-a pore-scale investigation. *Geophysical journal international* 184(3):1167-1179.
- Janos D (2017) Regional groundwater flow dynamics and residence times in Chaudière-Appalaches, Québec, Canada: Insights from numerical simulations. Maîtrise en Sciences de la Terre (Université Laval, Québec, QC). 77 p.
- Janos D, Molson J et Lefebvre R (2018) Regional groundwater flow dynamics and residence times in Chaudière-Appalaches, Québec, Canada: Insights from numerical simulations. *Canadian Water Resources Journal/Revue canadienne des ressources hydriques*:1-26.
- Jiang XW, Wang XS et Wan L (2010) Semi-empirical equations for the systematic decrease in permeability with depth in porous and fractured media. *Hydrogeology Journal* 18(4):839-850.
- Jiang C, Lavoie D et Rivard C (2016) An Organic Geochemical Investigation of the Carboniferous Mabou Group Intersected by Groundwater Wells in McCully Gas Field, Southern New Brunswick-Its Hydrocarbon Source Potential and Character. (Geological Survey of Canada, Ottawa, ON), p 34.
- Johnson SC et Peter C (2005) *Bedrock geology of the Codys area (NTS 21 H/13). Kings and Queens counties, New Brunswick.* New Brunswick Department of Natural Resources and Energy, Fredericton, NB, (1:50 000).
- Kennebecasis Watershed Restoration Committee (2013) *Kennebecasis Watershed.* <u>https://www.kennebecasisriver.org/</u> (Consulté le 15 février 2016).
- Kissinger A, Helmig R, Ebigbo A, Class H, Lange T, Sauter M, Heitfeld M, Klünker J et Jahnke W (2013) Hydraulic fracturing in unconventional gas reservoirs: risks in the geological system, part 2. *Environmental earth sciences* 70(8):3855-3873.
- Ladevèze P (2017a) Aquifères superficiels et gaz de shale : le rôle des failles et des réseaux de fractures naturelles sur la circulation des fluides. Doctorat en Sciences de la Terre (Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, QC). 223 p.

- Ladevèze P (2017b) Champs gaziers de McCully-Elgin (NB) Fracturation naturelle du roc superficiel et implications potentielles pour la circulation de fluides. (Rapport interne de la Commission Géologique du Canada, Québec, QC), p 18.
- Ladevèze P, Rivard C, Lefebvre R, Lavoie D, Parent M, Malet X, Bordeleau G et Gosselin JS (2016) Travaux de caractérisation hydrogéologique dans la plateforme sédimentaire du Saint-Laurent, région de Saint-Édouard-de-Lotbinière, Québec. (Commission Géologique du Canada, Québec, QC), p 112.
- Lamontagne M et Lavoie D (2015) Report on the monitoring of micro-earthquakes during the hydraulic fracturing conducted in New Brunswick in August and September 2014. (Geological Survey of Canada, Ottawa, ON), p 40.
- Lamontagne M, Lavoie D, Ma S, Burke KBS et Bastow I (2015) Monitoring the earthquake activity in an area with shale gas potential in southeastern New Brunswick, Canada. *Seismological Research Letters* 86(4):1068-1077.
- Lange T, Sauter M, Heitfeld M, Schetelig K, Brosig K, Jahnke W, Kissinger A, Helmig R, Ebigbo A et Class H (2013) Hydraulic fracturing in unconventional gas reservoirs: risks in the geological system part 1. *Environmental earth sciences* 70(8):3839-3853.
- Laurencelle M (2018) *Propriétés hydrauliques et processus d'invasion par la Mer de Champlain du système aquifère rocheux fracturé régional de la Montérégie Est, Québec, Canada.* Doctorat en Sciences de la Terre (Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, QC). 399 p.
- Lavoie D, Rivard C, Lefebvre R, Séjourné S, Thériault R, Duchesne MJ, Ahad J, Wang B, Benoît N et Lamontagne C (2014) The Utica Shale and gas play in southern Quebec: Geological and hydrogeological syntheses and methodological approaches to groundwater risk evaluation. *International Journal of Coal Geology* 126:77-91.
- Lefebvre R (2017) Mechanisms leading to potential impacts of shale gas development on groundwater quality. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 4(1):1-15.
- Lefebvre R, Ballard J-M, Carrier M-A, Vigneault H, Beaudry C, Berthot L, Légaré-Couture G, Parent M, Laurencelle M, Malet X, Therrien A, Michaud A, Desjardins J, Drouin A, Cloutier MH, Grenier J, Bourgault M-A, Larocque M, Pellerin S, Graveline M-H, Janos D et Molson J (2015) Portrait des ressources en eau souterraine en Chaudière-Appalaches, Québec, Canada. (Projet réalisé conjointement par l'INRS, l'IRDA et le OBVCA dans le cadre du PACES, Québec, QC), p 300.
- Lefebvre R, Carrier MA, Tremblay L, Gagné S, Benoit N et Rivard C (2012) Protocole pour la préparation du Livrables 19 et 20 Piézométrie dans les formations superficielles et dans le roc. in *Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec* (Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau Terre Environnement, Québec, QC), p 6.
- Lefebvre R, Maltais I, Paradis D et Michaud Y (2011) Recharge assessment from daily soil moisture balance and well hydrographs, Portneuf unconfined aquifer, Canada. *Geohydro2011, Joint IAH-CNC, CANQUA and AHQ Conference.* (Quebec City, QC, August 28-31, 2011), p 8.
- Lefebvre R et Raynauld M (2017) Revue de littérature scientifique et règlementaire des normes du chapitre V du Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (RPEP) : Site de forage destiné à rechercher ou exploiter du pétrole ou du gaz naturel. (Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau Terre Environnement, Québec, QC), p 58.

- Li J, Xi B, Cai W, Yang Y, Jia Y, Li X, Lv Y, Lv N, Huan H et Yang J (2017) Identification of dominating factors affecting vadose zone vulnerability by a simulation method. *Scientific Reports* 7(45955):1-14.
- Liggett J, Lapcevic P et Miller K (2011) A guide to the use of intrinsic aquifer vulnerability mapping. (Library and Archives Canada Cataloguing in Publication, Ottawa, ON), p 60.
- Linsley RK, M.A. K et Paulhus JL (1982) *Hydrology for Engineers.* McGraw-Hill Book Company, New-York, NY. 512 p.
- Mace RE (2001) *Estimating transmissivity using specific-capacity data.* Bureau of Economic Geology, University of Texas, Austin, TX. 44 p.
- Mathieu C et Lozet J (2011) *Dictionnaire encyclopédique de science du sol.* Tec & Doc Lavoisier, Paris, FR. 732 p.
- Molson J et Frind E (2005) How old is the water? Simulating groundwater age at the watershed scale. *4th International Conference of Groundwater Quality: Bringing Groundwater Quality Research to the Watershed Scale* (Waterloo, ON, July 19-22, 2004), p 482/488.
- Molson J et Frind E (2014) FLONET/TR2. Two-dimensional simulator for groundwater flownets, contaminant transport and residence time. in *User Guide Version 3.0 June 2014* (Université Laval, Quebec City, QC), p 57.
- Monfet J (1979) *Évaluation du coefficient de ruissellement à l'aide de la méthode SCS modifiée.* Gouvernement du Québec, Ministère des Richesses naturelles, Service de l'hydromètrie, Québec, QC. 35 p.
- Murat V (2000) Étude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution: application aux aquifères granulaires du piémont laurentien. (Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, QC). 127 p.
- Murat V, Paradis D, Savard MM, Nastev M, Bourque E, Hamel A, Lefebvre R et Martel R (2003) Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec: évaluation par les méthodes DRASTIC et GOD. (Ressources naturelles Canada, Commission géologique du Canada, Québec, QC), p 14.
- Nastev M, Savard MM, Lapcevic P, Lefebvre R et Martel R (2004) Hydraulic properties and scale effects investigation in regional rock aquifers, south-western Quebec, Canada. *Hydrogeology Journal* 12(3):257-269.
- Nathan RJ et McMahon TA (1990) Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water resources research* 26(7):1465-1473.
- Nicot J-P (2017) Decisions on Hydraulic Fracturing Must Be Science-Based. *Groundwater* 55(4):441-442.
- Oreskes N, Shrader-Frechette K et Belitz K (1994) Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science* 263(5147):641-646.
- Park AF (2014) Shale Gas in New Brunswick: Geological Background. Shale Gas in New Brunswick: Towards a Better Understanding, Campbell EBRSWTCOD (Édit.) Canadian Institute for Research on Public Policy and Public Administration, Moncton, NB. p 79-133.
- Peter C (1993) Maritimes Basin evolution: key geologic and seismic evidence from the Moncton Subbasin of New Brunswick. *Atlantic Geology* 29:233-270.

- Peter C (2000) Les schistes bitumineux, le pétrole et le gaz naturel au Nouveau-Brunswick : Activités passées et courantes liées à l'industrie. (Ministère des Ressources naturelles et de l'Énergie du Nouveau-Brunswick, Division des ressources minières et de l'énergie, Fredericton, NB), p 16.
- Peter C et Johnson SC (2009) *Stratigraphy and structural history of the late Paleozoic Maritimes Basin in southeastern New Brunswick, Canada.* Natural Resources, Minerals, Policy and Planning Division; Geological Survey of Canada, Ottawa, ON. 348 p.
- Peter CJ, Barr SM et White CE (2005) *Bedrock geology of the Petitcodiac area (NTS 21 H/14). Kings, Westmorland and Queens counties, New Brunswick.* New Brunswick Department of Natural Resources, Fredericton, NB, (1:50 000).
- Pratte A (2008) Relations entre variables morphométriques et données hydrogéologiques, bassins versants des rivières Châteauguay et Beaurivage, Québec. Maîtrise en Sciences de la Terre (Université Laval, Québec, QC). 109 p.
- Pronk AG, Allard S et Boldon R (2005a) *Surface materials of the Codys map area (NTS 21 H/13), southeastern New Brunswick.* New Brunswick Department of Natural Resources, Minerals, Policy and Planning Division, Fredericton, NB, (1:50 000).
- Pronk AG, Allard S et Boldon R (2005b) *Surface materials of the Petitcodiac map area (NTS 21 H/14), southeastern New Brunswick.* New Brunswick Department of Natural Resources, Minerals, Policy and Planning Division, Fredericton, NB, (1:50 000).
- Pronk AG, Allard S et Boldon R (2005c) *Surface materials of the Sussex map area (NTS 21 H/12), southeastern New Brunswick.* New Brunswick Department of Natural Resources, Minerals, Policy and Planning Division, Fredericton, NB, (1:50 000).
- Pronk AG, Allard S et Boldon R (2005d) *Surface materials of the Waterford map area (NTS 21 H/11), southeastern New Brunswick.* New Brunswick Department of Natural Resources, Minerals, Policy and Planning Division, Fredericton, NB, (1:50 000).
- Provincial Department of Agriculture (1948a) Soil map of S.E. New Brunswick Moncton -Tormentine - Albert sheet. Experimental Farms Service, Ottawa, ON, (One Inch to Two Miles).
- Provincial Department of Agriculture (1948b) *Soil map of S.E. New Brunswick Saint John Sussex sheet.* Experimental Farms Service, Ottawa, ON, (One Inch to Two Miles).
- Provincial Department of Agriculture (1949) *Soil map of S.E. New Brunswick Codys Petitcodiac sheet.* Experimental Farms Service, Ottawa, ON, (One Inch to Two Miles).
- Québec (2014) Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (RLRQ, chapitre Q-2, r. 35.2), à jour au 1er avril 2018. Éditeur officiel du Québec, <u>http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/pdf/cr/Q-2,%20R.%2035.2.pdf</u> (Consulté le 1er août 2018).
- Rahi KA et Halihan T (2013) Identifying Aquifer Type in Fractured Rock Aquifers using Harmonic Analysis. *Groundwater* 51(1):76-82.
- Rampton VN, Gauthier RC, Thibault J et Seaman AA (1984) Quaternary Geology of New Brunswick, Geological Survey of Canada, Memoir 416. (Minister of Supply and Services Canada, Ottawa, ON), p 77.
- Rasmussen TC et Crawford LA (1997) Identifying and removing barometric pressure effects in confined and unconfined aquifers. *Groundwater* 35(3):502-511.

- Raynauld M (2014) Caractérisation et modélisation des conditions d'écoulement à densité variable au-dessus du réservoir pétrolier, secteur Haldimand à Gaspé. Maîtrise en Sciences de la Terre (Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, QC). 188 p.
- Raynauld M, Peel M, Lefebvre R, Crow H, Molson J, Ahad J et Gloaguen E (2014) Caractérisation hydrogéologique du secteur Haldimand. (Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, Québec, QC), p 181.
- Raynauld M, Peel M, Lefebvre R, Molson JW, Crow H, Ahad JME, Ouellet M et Aquilina L (2016) Understanding shallow and deep flow for assessing the risk of hydrocarbon development to groundwater quality. *Marine and Petroleum Geology* 78:728-737.
- Remy N (2004) Geostatistical earth modeling software: User's manual. (Stanford Center for Reservoir Forecasting (SCRF), Stanford University, Stanford, CA), p 87.
- Remy N, Boucher A et Wu J (2009) *Applied geostatistics with SGeMS: a user's guide.* Cambridge University Press, New York, NY. 264 p.
- Réseau Canadien de l'Eau (2015) Rapport 2015 sur la fracturation hydraulique et l'eau au Canada - Les connaissances nécessaires pour soutenir au mieux la prise de décisions au Canada. (Réseau canadien de l'eau, Waterloo, ON), p 65.
- Rivard C, Lavoie D, Lefebvre R, Séjourné S, Lamontagne C et Duchesne M (2014a) An overview of Canadian shale gas production and environmental concerns. *International Journal of Coal Geology* 126:64-76.
- Rivard C, Lavoie D, Pinet N, Duchesne MJ, Bordeleau G, Séjourné S, Huchet F, Lefebvre R, Brake V, Crow H et Malet X (2017) A study of aquifer vulnerability to hydrocarbon development in southern New Brunswick. *70th Canadian Geotechnical Conference and the 12th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference,.* (Ottawa, ON, October 1-4, 2017), p 8.
- Rivard C, Lefebvre R et Paradis D (2014b) Regional recharge estimation using multiple methods: an application in the Annapolis Valley, Nova Scotia (Canada). *Environmental earth sciences* 71(3):1389-1408.
- Rivard C, Marion J, Michaud Y, Benhammane S, Morin A, Lefebvre R et Rivera A (2003) Étude de l'impact potentiel des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine dans l'Est du Canada. (Commission géologique du Canada, Québec, QC), p 39.
- Rivard C, Michaud Y, Deblonde C, Boisvert V, Carrier C, Morin RH, Calvert T, Vigneault H, Conohan D et Castonguay S (2008a) Canadian Groundwater Inventory: Regional hydrogeological characterization of the south-central part of the Maritimes Basin. (Bulletin of the Geological Survey of Canada, Ottawa, ON), p 96.
- Rivard C, Michaud Y, Lefebvre R, Deblonde C et Rivera A (2008b) Characterization of a regional aquifer system in the Maritimes Basin, eastern Canada. *Water resources management* 22(11):1649-1675.
- Rivard C, Paniconi C, Vigneault H et Chaumont D (2014c) A watershed-scale study of climate change impacts on groundwater recharge (Annapolis Valley, Nova Scotia, Canada). *Hydrological Sciences Journal* 59(8):1437-1456.

- Rivard C, Paradis SJ, Bolduc A, Morin RH, Liao S, Pullan S, Gauthier R-J, Trépanier S, Blackmore I, Spooner I, Deblonde C, Boivin R, Fernandes RA, Castonguay S, Hamblin T, Michaud Y, Drage J et Paniconi C (2012) Canadian Groundwater Inventory: regional hydrogeological characterization of the Annapolis Valley aquifers. (Bulletin of the Geological Survey of Canada, Ottawa, ON), p 152.
- Ross M, Martel R, Lefebvre R, Parent M et Savard MM (2004) Assessing rock aquifer vulnerability using downward advective times from a 3D model of surficial geology: A case study from the St. Lawrence Lowlands, Canada. *Geofísica Internacional* 43(4):591-602.
- Rushton KR (2003) *Groundwater hydrology: Conceptual and Computational Models.* Wiley, Indianapolis, IN. 430 p.
- Rushton KR, Eilers VHM et Carter RC (2006) Improved soil moisture balance methodology for recharge estimation. *Journal of Hydrology* 318(1-4):379-399.
- Rutledge AT (1998) Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge and discharge from streamflow records: Update. (U.S. Geological Survey, Reston, VA), p 43.
- Sanford W (2011) Calibration of models using groundwater age. *Hydrogeology Journal* 19(1):13-16.
- Santé Canada (2017) Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada Tableau sommaire. (Bureau de la qualité de l'eau et de l'air, Direction générale de la santé environnementale et de la sécurité des consommateurs, Santé Canada, Ottawa, ON), p 25.
- Scanlon BR, Healy RW et Cook PG (2002) Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology journal* 10(1):18-39.
- Schroeder PR, Dozier TS, Zappi PA, McEnroe BM, Sjostrom JW et Peyton RL (1994) The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model: engineering documentation for version 3. (U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH), p 116.
- Schultz RA, Summers LE, Lynch KW et Bouchard AJ (2014) Subsurface containment assurance program-Key element overview and best practice examples. *Offshore Technology Conference-Asia.* (Kuala Lumpur, MY, March 25-28, 2014), p 12.
- Schulze-Makuch D (2005) Longitudinal dispersivity data and implications for scaling behavior. *Groundwater* 43(3):443-456.
- Seaman AA (1988) Granular aggregate resources, Waterford (NTS 21 H/11) and Salmon River (NTS 21 H/6) map areas, New Brunswick. (Department of Natural Resources, Fredericton, NB), p 86.
- Seaman AA et Thibault JJ (1986) Granular aggregate resources of the central lowland area, eastcentral New Brunswick. (Department of Forests, Mines and Energy, Fredericton, NB), p 45.
- Séjourné S (2017) Caprock integrity of the Carboniferous Frederick Brook Shale analyzed by oil and gas well logs: McCully gas field and Elgin area, New Brunswick. (Geological Survey of Canada, Ottawa, ON), p 120.
- Sloto RA et Crouse MY (1996) HYSEP, a computer program for streamflow hydrograph separation and analysis. (U.S. Geological Survey, Lemoyne, PA), p 46.
- Spane FA (2002) Considering barometric pressure in groundwater flow investigations. *Water resources research* 38(6):1-18.

- Statistique Canada (2016a) Portrait des exploitations agricoles du Nouveau-Brunswick -Recensement de l'agriculture, 2016. (Ministère de l'Agriculture, de l'Aquaculture et des Pêches, Fredericton, NB), p 1.
- Statistique Canada (2016b) *Profil du recensement, Recensement de 2016.* <u>https://tinyurl.com/yd6y3nav</u> (Consulté le 15 février 2018).
- Talbot Poulin MC, Comeau G, Tremblay Y, Therrien R, Nadeau MM, Lemieux JM, Molson J, Fortier R, Therrien P, Lamarche L, Donati-Daoust F et Bérubé S (2013) Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire de la Communauté métropolitaine de Québec (PACES-CMQ). (Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, Québec, QC), p 172.
- Tinnacher RM, Dwivedi D, Houseworth JE, Reagan MT, Stringfellow WT, Varadharajan C et Birkholzer JT (2011) Hydraulic Fracturing from the Groundwater Perspective. *Nature* 477(7364):271-275.
- Todd DK et Mays LW (2004) *Groundwater Hydrology.* John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ. 656 p.
- USDA (2009) State oil and natural gas regulations Design to protect water resources. (United States Department of Agriculture, Washington, DC), p 63.
- USDA (2012) Chapter 3 Engineering Classification of Earth Materials. *Part 631 National Engineering Handbook,* United States Department of Agriculture (Édit.) Natural Resources Conservation Service, Washington, DC. p 29.
- USDA (2017) *Determination of Grain Size Distribution*. <u>https://tinyurl.com/y9jb9m4d</u> (Consulté le 15 mars 2017).
- USGS (1980) National Handbook of Recommended Methods for Water-Data Acquisition. (Office of Water Data Coordination, U.S. Geological Survey, Reston, VA).
- Van Camp M et Vauterin P (2005) Tsoft: graphical and interactive software for the analysis of time series and Earth tides. *Computers & Geosciences* 31(5):631-640.
- Voss CI (2011) Editor's message: Groundwater modeling fantasies—part 2, down to earth. *Hydrogeology Journal* 19(8):1455-1458.
- Wahl T et Wahl K (1988) Effects of regional ground-water level declines on streamflow in the Oklahoma Panhandle. *Water-Use Data for Water Resources Management. Proceedings of a Symposium. American Water Resources Association, Bethesda, Maryland. 1988. p* 239-249, 4 fig, 2 tab, 22 ref.
- Waldron JWF, Barr SM, Park AF, White CE et Hibbard J (2015) Late Paleozoic strike-slip faults in Maritime Canada and their role in the reconfiguration of the northern Appalachian orogen. *Tectonics* 34(8):1661-1684.
- Wilson P (2005) Stratigraphy, structural geology and tectonic history of the McCully area, Moncton Subbasin, southeastern New Brunswick. (New Brunswick Department of Natural Resources, Fredericton, NB), p 104.
- Xu M et Eckstein Y (1995) Use of weighted least-squares method in evaluation of the relationship between dispersivity and field scale. *Groundwater* 33(6):905-908.
- Zoback M (2010) Reservoir geomechanics. Cambridge University Press, New York, NY. 461 p.
- Zoback M, Kitasei S et Copithorne B (2010) Addressing the environmental risks from shale gas development. (Worldwatch Institute, Washington, DC), p 18.

# Cartes

- Aalund H et Wicklund RE (1950) Soil survey report of Southeastern New Brunswick. (Dominion Department of Agriculture, Fredericton, NB), p 108.
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (2010) *Inventaire annuel des cultures.* Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa, ON, SIG GeoTIF.
- Aller L, Lehr JH, Petty R et Bennett T (1987) DRASTIC: a standardized system to evaluate groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. (United States Environmental Protection Agency, Chicago, IL), p 622.
- Asner GP, Scurlock JM et A Hicke J (2003) Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. *Global Ecology and Biogeography* 12(3):191-205.
- Breuer L, Eckhardt K et Frede HG (2003) Plant parameter values for models in temperate climates. *Ecological Modelling* 169(2-3):237-293.
- Canadell J, Jackson RB, Ehleringer JB, Mooney HA, Sala OE et Schulze E-D (1996) Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia* 108(4):583-595.
- Croteau A (2006) Détermination de la distribution spatiale et temporelle de la recharge à l'aquifère régional transfrontalier du bassin versant de la rivière Châteauguay, Québec et États-Unis. Maîtrise en Sciences de la Terre (Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, QC). 345 p.
- GéoBase (2009) *Couverture du sol, circa 2000 Vectorielle.* Centre d'information topographique, Secteur des sciences de la Terre, Ressources naturelles Canada, Sherbrooke, QC, SIG ESRI Shape File.
- GeoNB (2002) *Modèle Numérique de Terrain (MNT)*. Service Nouveau-Brunswick, Fredericton, NB, SIG Texte ASCII.
- GeoNB (2015) Carte générale de la géologie du substrat rocheux du Nouveau-Brunswick, compilée à une échelle de 1:500 000 à partir de cartes détaillées. Ministère de l'Énergie et des Mines, Fredericton, NB, SIG ESRI Shape File.
- IRAPL (2017) *Flora of USA and Canada*. <u>https://tinyurl.com/ycx4898e</u> (Consulté le 15 février 2017).
- Jackson RB, Canadell J, Ehleringer JR, Mooney HA, Sala OE et Schulze ED (1996) A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia* 108(3):389-411.
- Mekonnen K, Buresh RJ et Jama B (1997) Root and inorganic nitrogen distributions in sesbania fallow, natural fallow and maize fields. *Plant and Soil* 188(2):319-327.
- Monfet J (1979) Évaluation du coefficient de ruissellement à l'aide de la méthode SCS modifiée. Gouvernement du Québec, Ministère des Richesses naturelles, Service de l'hydromètrie, Québec, QC. 35 p.
- Pronk AG, Allard S et Boldon R (2005a) *Surface materials of the Codys map area (NTS 21 H/13), southeastern New Brunswick.* New Brunswick Department of Natural Resources, Minerals, Policy and Planning Division, Fredericton, NB, (1:50 000).
- Pronk AG, Allard S et Boldon R (2005b) *Surface materials of the Petitcodiac map area (NTS 21 H/14), southeastern New Brunswick.* New Brunswick Department of Natural Resources, Minerals, Policy and Planning Division, Fredericton, NB, (1:50 000).

- Pronk AG, Allard S et Boldon R (2005c) *Surface materials of the Sussex map area (NTS 21 H/12), southeastern New Brunswick.* New Brunswick Department of Natural Resources, Minerals, Policy and Planning Division, Fredericton, NB, (1:50 000).
- Pronk AG, Allard S et Boldon R (2005d) *Surface materials of the Waterford map area (NTS 21 H/11), southeastern New Brunswick.* New Brunswick Department of Natural Resources, Minerals, Policy and Planning Division, Fredericton, NB, (1:50 000).
- Provincial Department of Agriculture (1948a) Soil map of S.E. New Brunswick Moncton -Tormentine - Albert sheet. Experimental Farms Service, Ottawa, ON, (One Inch to Two Miles).
- Provincial Department of Agriculture (1948b) *Soil map of S.E. New Brunswick Saint John Sussex sheet.* Experimental Farms Service, Ottawa, ON, (One Inch to Two Miles).
- Provincial Department of Agriculture (1949) *Soil map of S.E. New Brunswick Codys Petitcodiac sheet.* Experimental Farms Service, Ottawa, ON, (One Inch to Two Miles).
- Ross M, Martel R, Lefebvre R, Parent M et Savard MM (2004) Assessing rock aquifer vulnerability using downward advective times from a 3D model of surficial geology: A case study from the St. Lawrence Lowlands, Canada. *Geofísica Internacional* 43(4):591-602.
- Rushton KR (2003) *Groundwater hydrology: Conceptual and Computational Models.* Wiley, Indianapolis, IN. 430 p.
- Schroeder PR, Dozier TS, Zappi PA, McEnroe BM, Sjostrom JW et Peyton RL (1994) The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model: engineering documentation for version 3. (U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH), p 116.
- Séjourné S (2017) Caprock integrity of the Carboniferous Frederick Brook Shale analyzed by oil and gas well logs: McCully gas field and Elgin area, New Brunswick. (Geological Survey of Canada, Ottawa, ON), p 120.

Université de Giessen (2017) No title. https://tinyurl.com/ybc5qvao (Consulté le 15 février 2017).

# Annexes

- Allen RG, Pereira LS, Raes D et Smith M (1998) Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. (Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, IT).
- Asner GP, Scurlock JM et A Hicke J (2003) Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. *Global Ecology and Biogeography* 12(3):191-205.
- Breuer L, Eckhardt K et Frede HG (2003) Plant parameter values for models in temperate climates. *Ecological Modelling* 169(2-3):237-293.
- Brinsmead RA et Finamore PF (1977) Aggregate resources of the Sussex map-area (21H/12) and part of the Hampstead map-area (21G/9E) including surficial geology of Sussex east (21H/12E). (Department of Natural Resources, Fredericton, NB), p 33.
- Brinsmead RA et Seaman AA (1987) Granular aggregate resources Petitcodiac (NTS 21 H/14) map area, New Brunswick. (Department of Natural Resources, Fredericton, NB), p 98.
- Canadell J, Jackson RB, Ehleringer JB, Mooney HA, Sala OE et Schulze E-D (1996) Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia* 108(4):583-595.
- Croteau A (2006) Détermination de la distribution spatiale et temporelle de la recharge à l'aquifère régional transfrontalier du bassin versant de la rivière Châteauguay, Québec et États-Unis. Maîtrise en Sciences de la Terre (Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, QC). 345 p.
- Domenico PA et Schwartz FW (1990) *Physical and Chemical Hydrogeology.* John Wiley & Sons Inc., New-York, NY. 824 p.
- GéoBase (2009) *Couverture du sol, circa 2000 Vectorielle.* Centre d'information topographique, Secteur des sciences de la Terre, Ressources naturelles Canada, Sherbrooke, QC, SIG ESRI Shape File.
- Gosselin JS, Lefebvre R, Martel R et Rivard C (2017) GWHAT: Documentation Release 0.2.0. (Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau Terre Environnement, Québec, QC), p 33.
- Gouvernement du Canada (2018) *Données climatiques historiques*. <u>http://climat.meteo.gc.ca/</u> (Consulté le 15 février 2017).
- Jackson RB, Canadell J, Ehleringer JR, Mooney HA, Sala OE et Schulze ED (1996) A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia* 108(3):389-411.
- Mekonnen K, Buresh RJ et Jama B (1997) Root and inorganic nitrogen distributions in sesbania fallow, natural fallow and maize fields. *Plant and Soil* 188(2):319-327.
- Pronk AG, Allard S et Boldon R (2005) *Surface materials of the Sussex map area (NTS 21 H/12), southeastern New Brunswick.* New Brunswick Department of Natural Resources, Minerals, Policy and Planning Division, Fredericton, NB, (1:50 000).
- Provincial Department of Agriculture (1948a) Soil map of S.E. New Brunswick Moncton -Tormentine - Albert sheet. Experimental Farms Service, Ottawa, ON, (One Inch to Two Miles).
- Provincial Department of Agriculture (1948b) *Soil map of S.E. New Brunswick Saint John Sussex sheet.* Experimental Farms Service, Ottawa, ON, (One Inch to Two Miles).

- Provincial Department of Agriculture (1949) *Soil map of S.E. New Brunswick Codys Petitcodiac sheet.* Experimental Farms Service, Ottawa, ON, (One Inch to Two Miles).
- Rampton VN, Gauthier RC, Thibault J et Seaman AA (1984) Quaternary Geology of New Brunswick, Geological Survey of Canada, Memoir 416. (Minister of Supply and Services Canada, Ottawa, ON), p 77.
- Rivard C, Lefebvre R et Paradis D (2014) Regional recharge estimation using multiple methods: an application in the Annapolis Valley, Nova Scotia (Canada). *Environmental earth sciences* 71(3):1389-1408.
- Rushton KR (2003) *Groundwater hydrology: Conceptual and Computational Models.* Wiley, Indianapolis, IN. 430 p.
- Schroeder PR, Dozier TS, Zappi PA, McEnroe BM, Sjostrom JW et Peyton RL (1994) The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model: engineering documentation for version 3. (U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH), p 116.
- Seaman AA (1988) Granular aggregate resources, Waterford (NTS 21 H/11) and Salmon River (NTS 21 H/6) map areas, New Brunswick. (Department of Natural Resources, Fredericton, NB), p 86.
- Seaman AA et Thibault JJ (1986) Granular aggregate resources of the central lowland area, eastcentral New Brunswick. (Department of Forests, Mines and Energy, Fredericton, NB), p 45.
- Thornthwaite CW (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review* 38(1):55-94.

# 9 CARTES DE LA RÉGION D'ÉTUDE

Les 36 cartes compilées dans ce document complètent les travaux décrits dans le mémoire. Ces cartes sont également disponibles dans l'annexe numérique au format « .tif » (Annexe XII) dans laquelle chaque couche d'information est généralement jointe au format « shapefile » ou « raster » selon la nomenclature des fichiers du SIG de l'annexe XI utilisée dans ArcGIS. Sur ces diverses cartes, la projection universelle transverse de Mercator (UTM) est utilisée comme système de coordonnées projetées conformes. Les coordonnées de chacune des cartes sont affichées en mètres selon le système de référence nord-américain de 1983 (NAD83) pour la zone 20. Hormis les deux premières cartes présentées au 1/250 000, le reste des cartes est au 1/200 000, permettant ainsi d'englober l'ensemble des deux bassins versants de la région d'étude, soit ceux des rivières Kennebecasis et Pollett. Seules les cartes 23 à 26 affichent uniquement le bassin de la rivière Pollett, toujours au 1/200 000. Les deux encarts en bas des cartes, excepté sur les cartes 1 et 2, assurent une présentation plus détaillée des sites PO-04/PO-07 et PO-06/PO-09, puisque présentés au 1/1 000. Sur la carte 1, deux encarts offrent un niveau de détail intéressant sur le champ exploité de McCully (1/165 000) et le champ prospectif d'Elgin (1/150 000). Sur la carte 2, deux niveaux d'échelle sont visibles en plus de la carte du territoire, un premier encart en haut à gauche afin de visualiser le tracé de la coupe BB' au 1/100 000 et ensuite deux autres encarts au 1/10 000 permettant de discerner les puits gaziers profonds utilisés pour réaliser le modèle numérique 2D.

Les éléments essentiels à la compréhension des cartes sont détaillés ci-dessous.

## • Carte 1 : Localisation et description du territoire d'étude

Cette carte présente en détail les deux bassins versants étudiés (Section 3), leur délimitation et leur localisation au sein de la province. Elle inclut notamment le réseau hydrographique (rivières majeures et principaux lacs) et les principales infrastructures relatives au transport (routes et voies ferrées). De plus, les stations hydrométriques actuelles et historiques y sont présentées, dont la station hydrométrique d'Apohaqui utilisée pour le calcul du débit de base de la rivière Kennebecasis (Section 5.6.3). De même, les stations climatiques, qu'elles soient actuelles ou historiques, sont également visibles, dont celles de Sussex Four Corners et Mechanic Settlement, indispensables pour caractériser le climat du territoire (Section 3.3) et pour compléter les données climatiques entre 1980 et 2017 (Section 5.6.2). Les forages gaziers profonds décrits dans la section 3.4 y sont répertoriés de même que les puits d'observation implantés par la Commission géologique du Canada (CGC) et dont les caractéristiques sont détaillées dans la section 4.1.

215

#### Carte 2 – Topographie et coupes

Le modèle numérique de terrain (MNT), extrait du GeoNB (2002), est ici représenté par rapport au niveau moyen de la mer (NMM). L'élévation de la surface du sol a été utile pour définir la topographie du toit du roc, lorsque soustraite de l'épaisseur des dépôts meubles (Section 5.2.5) et ainsi caractériser ses reliefs (Section 5.2.6). La carte de la pente du sol (Carte 10), notamment utilisée pour le calcul de l'indice DRASTIC (Section 5.7.1 et Carte 32), a été déduite à partir du MNT. Les forages gaziers sont également affichés ; leurs données stratigraphiques issues de Séjourné (2017) ont été exploitées pour définir le modèle conceptuel (Section 5.8 et Figure 5.48) et pour réaliser le modèle numérique 2D de la coupe BB' (Section 6.2). Quant au tracé de la coupe AA', il a permis de visualiser les résultats des diverses méthodes d'interpolation appliquées pour définir la surface piézométrique de la nappe (Section 5.5.5, Figure 5.24 et Carte 9).

## Carte 3 – Géologie et structures du roc

Les structures et les unités géologiques présentées sur cette carte sont extraites du GeoNB (2015). Les unités sédimentaires ont été regroupées en six groupes décrits dans la section 3.5.1 sur la base de divers rapports géologiques (Section 2.3).

#### Carte 4 – Distribution des dépôts superficiels

La distribution des dépôts de surface combine les diverses unités de tills et les autres dépôts mineurs du territoire décrits dans la section 3.5.3 à partir des investigations de Pronk *et al.* (2005a), Pronk *et al.* (2005b), Pronk *et al.* (2005c) et Pronk *et al.* (2005d) (Section 2.3). Les sites où des essais de perméabilité ont été effectués sont visualisables sur cette carte (Section 4.3.2 et Figure 4.8), de même que les lieux où des prélèvements de dépôts meubles ont été réalisés, tout ceci dans le but de définir les hydrofaciès (Section 5.1.2 et Carte 6).

## Carte 5 – Unités pédologiques

Les unités pédologiques (Section 3.5.4) sont ici affichées selon leur texture en se basant sur les informations issues du Provincial Department of Agriculture (1948a), Provincial Department of Agriculture (1948b), Provincial Department of Agriculture (1949) et de Aalund et Wicklund (1950) (Section 2.3). À partir des classes granulométriques, des groupes hydrologiques ont alors été définis dans le but d'estimer le coefficient de ruissellement (Carte 14) à partir de la méthode établie par Monfet (1979) et incluse dans le processus de recharge du modèle d'infiltration *HELP* (Section 5.6.4). De plus, cette carte des unités de sol est nécessaire à la définition des caractéristiques physiques du sol dans *GWHAT* (Section 5.6.5) et également intégrée dans le calcul de l'indice DRASTIC qui considère le type de sol (Section 5.7.1 et Carte 31).

216

# Carte 6 – Hydrofaciès des dépôts superficiels

La distribution des hydrofaciès de la région d'étude a été établie à partir d'un processus détaillé dans la section 5.1.2 et basé sur la carte de répartition des unités pédologiques (Carte 5) retranscrivant les informations de Pronk *et al.* (2005a), Pronk *et al.* (2005b), Pronk *et al.* (2005c) et Pronk *et al.* (2005d). Les hydrofaciès définis servent notamment à déterminer les conditions de confinement au droit de chaque puits d'observation (Section 5.4.1).

# Carte 7 – Épaisseur des dépôts superficiels

La distribution spatiale de l'épaisseur des dépôts meubles résulte de l'interpolation par krigeage ordinaire des données stratigraphiques disponibles dans les 1 030 puits résidentiels visualisables sur la carte (Section 5.2) combinées à 40 points de forçage sur les secteurs sous-échantillonnés. Le processus d'interpolation a été optimisé (Section 5.2.5) afin d'obtenir cette carte finale (Section 5.2.6) où une valeur médiane de 2.13 m d'épaisseur a été attribuée sur les étendues sans données. Ces données d'épaisseur ont été extraites sur chaque maille du territoire avant d'être intégrées dans le modèle d'infiltration HELP (Section 5.6.4) et aussi dans le modèle numérique 2D (Section 6.2).

## • Carte 8 – Élévation de la surface du roc

Cette carte a été établie à partir de la topographie de surface (Carte 2) à laquelle a été retranchée l'épaisseur de dépôts meubles (Section 5.2 et Carte 7). La topographie du roc résulte donc du processus d'optimisation de l'interpolation des épaisseurs de dépôts superficiels (Section 5.2.5) à partir duquel elle a été obtenue (Section 5.2.6).

## Carte 9 – Élévation de la surface piézométrique de l'aquifère au roc

La surface piézométrique de l'aquifère au roc (Section 5.5) est le résultat du processus d'interpolation par krigeage avec dérive externe (Section 5.5.7) utilisant la topographie (Carte 2). Les données utilisées comprennent 1 380 points d'observation reflétant le niveau instantané de la nappe, 1 183 points imposés traduisant le niveau des cours d'eau et quelque 28 points de forçage sur les secteurs sous-échantillonnés. Lorsque retranchée de la topographie (Carte 2), la surface libre de la nappe permet d'obtenir la profondeur de la nappe (Carte 28) nécessaire à la définition de l'indice DRASTIC (Section 5.7.1) et utile au calage des niveaux piézométriques dans le modèle numérique 2D (Section 6.3.4).

#### Carte 10 – Pente de la surface du sol

La distribution des pentes sur les deux bassins, ici réparties en trois classes, a été réalisée à partir des données d'élévation de la surface du sol (Carte 2). La carte des pentes est surtout utile à la définition de l'indice DRASTIC (Carte 32) mais elle est également utilisée dans deux méthodes d'estimation de la recharge. En effet, la pente étant l'une des caractéristiques d'un bassin versant, elle est essentielle au choix des constantes intégrées dans les méthodes de calcul du débit de base d'un bassin donnée (Section 5.6.3). De plus, lorsqu'elle est extraite sur chaque maille du bassin versant, elle permet de définir le numéro de courbe (Carte 14) et la pente de drainage (Section 5.6.4).

## • Carte 11 – Couverture du sol

La couverture spatiale du sol provient des données de la GéoBase (2009) dont les statistiques sont détaillées dans la section 3.2.2. Les diverses entités peuvent alors être regroupées dans le but de définir les cinq catégories d'utilisation du sol visualisables sur la carte 12.

## • Carte 12 – Utilisation du sol

La distribution spatiale de l'utilisation du sol est obtenue à partir de la carte de la couverture du sol (Carte 11) et donc des données de la GéoBase (2009). La répartition en 5 classes de sol permet alors d'obtenir le numéro de courbe inclus dans le modèle d'infiltration *HELP* (Section 5.6.4). Quand l'indice DRASTIC (Carte 35) est superposé à cette carte, le risque potentiel de contamination de l'aquifère au roc depuis la surface peut alors être approché et sectorisé.

## Carte 13 – Groupes hydrologiques

Cette carte résulte de la définition de quatre groupes hydrologiques déterminés à partir de la carte pédologique (Carte 5). Ces groupes servent essentiellement à l'établissement du numéro de courbe défini par Monfet (1979) puis utilisé dans le modèle d'infiltration *HELP* (Section 5.6.4).

## Carte 14 – Coefficient de ruissellement représenté par le numéro de courbe

La carte du coefficient de ruissellement représente la distribution spatiale du numéro de courbe défini par Monfet (1979), puis adapté par Croteau (2006), afin de ne pas tenir compte de la condition hydrologique (Section 5.6.4). Le coefficient de ruissellement est intégré dans les trois approches d'estimation de la recharge : les méthodes de séparation des hydrogrammes de rivières dépendantes des caractéristiques du bassin versant (Section 5.6.3), le modèle d'infiltration *HELP* (Section 5.6.4 et Carte 15) et le modèle *GWHAT* (Section 5.6.5).

## • Carte 15 – Distance de drainage

La répartition spatiale de la distance au drain a été établie à partir de la couverture d'utilisation du sol (Carte 12) et selon les classes définies par Croteau (2006). Cette carte est uniquement utilisée par le modèle d'infiltration *HELP* (Section 5.6.4) afin d'estimer la recharge sur le territoire.

# Carte 16 – Cultures

La distribution des cultures sur les deux bassins versants provient des informations d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (2010) (Section 3.2.2). Elle est utile à la définition de la profondeur des racines, intervenant dans le modèle d'infiltration *HELP* (Section 5.6.4) et le modèle *GWHAT* (Section 5.6.5).

# • Carte 17 – Indice de surface foliaire

Cet indice, définissant le couvert végétal au sol et intervenant dans le modèle d'infiltration *HELP* (Section 5.6.4), a été déterminé à partir de la couverture de sol (Carte 11) en utilisant des valeurs typiques de LAI extraites de Schroeder *et al.* (1994), Asner *et al.* (2003), Breuer *et al.* (2003), l'IRAPL (2017) et de l'Université de Giessen (2017).

# • Carte 18 – Profondeur d'évaporation

La répartition de la profondeur d'évaporation sur le territoire est l'un des paramètres intégrés dans le modèle d'infiltration *HELP* (Section 5.6.4). Elle retranscrit généralement la profondeur racinaire obtenue à partir de la distribution spatiale des cultures (Carte 16) en associant à chaque type de culture une valeur typique de pénétration des racines selon les informations de Schroeder *et al.* (1994), Jackson *et al.* (1996), Canadell *et al.* (1996), Mekonnen *et al.* (1997), Rushton (2003) et Croteau (2006).

# • Carte 19 – Distribution spatiale de la recharge

La distribution spatiale de la recharge de l'aquifère au roc a été estimée à partir du modèle d'infiltration *HELP* développé par Schroeder *et al.* (1994). Cette composante du bilan hydrique a été calculée entre 1980 et 2016 avec les données climatiques de la station météorologique « Sussex Bis » puis utilisée à des fins de comparaison aux autres méthodes d'estimation de la recharge (Section 5.6.6). En plus du taux de recharge divisé en cinq classes, cette carte y associe les secteurs sans recharge et les zones de résurgence dont le découpage est expliqué dans la section 5.6.4. La distribution du taux de recharge est primordiale pour déterminer l'indice DRASTIC sur le territoire (Section 5.7.1). Elle est également utile dans la procédure de modélisation numérique (Section 6.3.2).

# Cartes 20 à 22 – Distribution spatiale de l'évapotranspiration (Carte 20), du ruissellement de surface (Carte 21) et du ruissellement hypodermique (Carte 22)

Ces cartes représentent respectivement les trois autres composants du bilan hydrique, soit l'évapotranspiration (Carte 20), le ruissellement de surface (Carte 21) et le ruissellement hypodermique (Carte 22). Elles ont été obtenues grâce au modèle d'infiltration HELP (Schroeder *et al.*, 1994) en utilisant les données de la station météorologique « Sussex Bis » entre 1980 et 2016 (Section 5.6.4).

#### • Carte 23 – Distribution spatiale de la recharge sur le bassin de la rivière Pollett

Cette carte a été établie dans le but de comparer les estimations de recharge de l'aquifère au roc faites à partir de deux jeux de données climatiques différents sur le bassin versant de la rivière Pollett : à gauche, les données proviennent de la station météorologique « Sussex Bis » tandis qu'à droite, elles sont issues de la station de Mechanic Settlement, toutes deux visibles sur la carte 1 (Section 5.6.6). Le taux de recharge de l'aquifère rocheux estimé avec le modèle d'infiltration *HELP* (Schroeder *et al.*, 1994) est ici divisé en cinq classes tout en présentant les secteurs de recharge nulle incluant les zones de résurgence (Section 5.6.4).

# Cartes 24 à 26 – Distribution spatiale de l'évapotranspiration (Carte 24), du ruissellement de surface (Carte 25) et du ruissellement hypodermique (Carte 26) sur le bassin de la rivière Pollett

Les trois autres composantes du bilan hydrique sont présentées sur ces cartes : le taux d'évapotranspiration (Carte 24), la quantité de ruissellement de surface (Carte 25) ainsi que la proportion de ruissellement de sous-surface (Carte 26). Le modèle d'infiltration *HELP* développé par Schroeder *et al.* (1994) (Section 5.6.4) a ainsi permis de déterminer ces composantes entre 1980 et 2016 sur le bassin versant de la rivière Pollett à partir des données climatiques des stations « Sussex Bis » (carte de gauche) et de Mechanic Settlement (carte de droite).

## • Carte 27 – Réserve en eau maximale facilement accessible dans le sol

Le paramètre RAS<sub>max</sub> a été obtenu à partir de l'équation 9 (Rushton, 2003) de la section 5.6.5. Il intègre les caractéristiques physiques des sols déterminées à partir de la carte des unités pédologiques (Carte 5) ainsi que la profondeur des racines (Carte 18) déduite de la répartition spatiale des cultures (Carte 18) d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (2010). La RAS<sub>max</sub> est l'un des paramètres de calage du modèle *GWHAT* permettant d'estimer la recharge à partir des hydrogrammes de puits.

Cartes 28 à 34 – Paramètres utilisés pour calculer l'indice DRASTIC : profondeur de la nappe (D) (Carte 28), recharge de l'aquifère au roc (R) (Carte 29), types d'aquifère (A) (Carte 30), types de sol (S) (Carte 31), pentes de la topographie (T) (Carte 32), zone vadose (I) (Care 33) et conductivité hydraulique (C) (Carte 34)

Les sept paramètres intégrés dans le calcul de l'indice DRASTIC de vulnérabilité de l'aquifère rocheux (Carte 35) ont ici été représentés selon les cotes standards et le code de couleur suggérés par Aller *et al.* (1987). Sur ces cartes, les secteurs de vulnérabilité nulle associés aux zones de résurgence sont également indiqués (Section 5.7.1).

La profondeur de la nappe (paramètre D ; Carte 28) a été déterminée en calculant la différence entre l'élévation de la surface du sol (Carte 2) et la carte piézométrique de l'aquifère au roc (Carte 9).

La recharge nette de l'aquifère rocheux (paramètre R ; Carte 29) a été simplement obtenue à partir de la carte de recharge établie avec le modèle d'infiltration *HELP* (Carte 19) en utilisant les données climatiques de la station météorologique « Sussex Bis » entre 1980 et 2016.

Le type d'aquifère (paramètre A ; Carte 30) permet de différencier le socle cristallin du roc sédimentaire fracturé à partir de la carte géologique (Carte 3).

Le paramètre définissant les types de sol (paramètre S ; Carte 31) se base sur la carte des textures des diverses unités de sol (Carte 5).

La distribution des pentes de la surface du sol (paramètre T ; Carte 32)) est en fait une retranscription de la carte 10 qui a été obtenue à partir du MNT (Carte 2).

La carte de l'impact de la zone vadose (paramètre l ; Carte 33) considère les propriétés physiques des unités situées au-dessus de la zone saturée en se basant sur les successions stratigraphiques du modèle d'infiltration *HELP*.

L'unique cote de conductivité hydraulique (paramètre C ; Carte 34) traduit les résultats des essais de perméabilité réalisés sur les puits d'observation de la CGC.

# • Carte 35 – Indice DRASTIC de vulnérabilité de l'aquifère au roc

La carte finale de vulnérabilité de l'aquifère au roc résulte de la pondération et de la combinaison des sept paramètres précédents (Cartes 28 à 34). Elle représente l'indice DRASTIC relatif dont les cinq classes ont été définies selon les percentiles (Section 5.7.1) et ne retranscrit donc pas les classes standards proposées par Aller *et al.* (1987).

#### Carte 36 – Temps de transfert advectif vertical vers la nappe

Cette carte offre une estimation du temps de transfert advectif vertical vers la nappe distribué sur le territoire en se basant sur les travaux de Ross *et al.* (2004). Le calcul du DAT nécessite plusieurs jeux de données : le taux de recharge de l'aquifère rocheux (Carte 19), les données stratigraphiques intégrées dans le modèle d'infiltration HELP et les teneurs en eau calculées par ce même modèle (Section 5.7.2). Dans le cas de couches saturées au-dessus de l'aquifère au roc, des valeurs typiques de porosité ont alors été utilisées pour le calcul du temps de transfert advectif vertical. De plus, les secteurs sur lesquels le DAT n'a pas été évalué ont également été délimités sur cette carte ; ils comprennent les zones de résurgence, les étendues où la recharge n'a pas été estimée avec le modèle d'infiltration *HELP* et les secteurs où le taux de recharge a été jugé non significatif. Cette carte a alors pu être comparée à la carte de l'indice DRASTIC (Carte 35) et aux quelques données géochimiques (Section 5.7.3).





# CARTE 2 - TOPOGRAPHIE ET COUPES



hie et coupes
n de la carte piézométrique numérique 2D
illage du modèle 2D n
Brunswick, 2002
1983 UTM Zone 20N ansverse Mercator és: Mètres
6 8 10 12 Km
1:250 000

# CARTE 3 – GÉOLOGIE ET STRUCTURES DU ROC



# **CARTE 4 – DISTRIBUTION DES DÉPÔTS SUPERFICIELS**



dépôts	superficiels	
I bstratum glaciaire aires ation S	rocheux Dépôts grossiers échantillonnés	
/Boss Poi Settleme	int nt	
le		
ntain		
re berland essais h uelph	Dépôts de tills testés par essais hydrauliques	
a; Pronk et al., 2005b; ;; Pronk et al., 2005d 1983 UTM Zone 20N ansverse Mercator		
6	8 10 Km	
1.200 000		

# CARTE 5 – UNITÉS PÉDOLOGIQUES



édologiques
Groupes hydrologiques <sup>2</sup>
С
- Section 5.6.4)
nent of Agriculture (1948a); nent of Agriculture, (1948b); nent of Agriculture, (1949); ))
1983 UTM Zone 20N
ansverse Mercator és: Mètres
6 8 10 Km
1.200.000

# **CARTE 6 – HYDROFACIÈS DES DÉPÔTS SUPERFICIELS**





# **CARTE 7 – ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS SUPERFICIELS**




la surface du roc
ace du roc (m/NMM)
n
partir des cartes 2 et 7
1983 UTM Zone 20N
és: Mètres
4 6 8 10 Km
1:200 000



# **CARTE 9 – ÉLÉVATION DE LA SURFACE PIÉZOMÉTRIQUE DE L'AQUIFÈRE AU ROC**

de	e la surface	
de	l'aquifère au	roc

 Synthétiques (secteurs sous échantillonnés) Piézométrie de l'aquifère au roc (m/NMM)

à partir (KDEpc	d'un l opips)	krigeag (Secti	ge on 5.5)
1983 U ansver és: Mèt	TM Z se Me res	one 20 ercato	DN r
6	8	10 K	m
1:200 0	00		

## CARTE 10 – PENTE DE LA SURFACE DU SOL











CARTE 13 – GROUPES HYDROLOGIQUES





### CARTE 14 – COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT REPRÉSENTÉ PAR LE NUMÉRO DE COURBE

### CARTE 15 – DISTANCE DE DRAINAGE







## CARTE 17 – INDICE DE SURFACE FOLIAIRE

surface foliaire
oliaire (LAI) - Résolution
n
(1994); Asner et al. (2003); 03); IRAPL (2017);
essen (2017)
0 1983 UTM Zone 20N Fransverse Mercator
4 6 8 10 Km
1:200 000



## CARTE 18 – PROFONDEUR D'ÉVAPORATION







CARTE 20 – DISTRIBUTION SPATIALE DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION



## CARTE 21 – DISTRIBUTION SPATIALE DU RUISSELLEMENT DE SURFACE



CARTE 22 – DISTRIBUTION SPATIALE DU RUISSELLEMENT HYPODERMIQUE



## CARTE 23 – DISTRIBUTION SPATIALE DE LA RECHARGE SUR LE BASSIN DE LA RIVIÈRE POLLETT

de la rivière Pollett
moyenne estimée avec le n HELP entre 1980 et 2016 on de 150 x 150 m <sup>1</sup>
ge nulle
n
(1994)
0 1983 UTM Zone 20N Fransverse Mercator tés: Mètres
4 6 8 10 Km
1:200 000



#### CARTE 24 – DISTRIBUTION SPATIALE DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION SUR LE BASSIN DE LA RIVIÈRE POLLETT

nspiration sur	
annuelle moyenne	
ele d'infiltration HELP nm/an) - Résolution	
004)	
994)	
1983 UTM Zone 20N ansverse Mercator s: Màtres	
6 8 10 Km	
:200 000	



#### CARTE 25 – DISTRIBUTION SPATIALE DU RUISSELLEMENT DE SURFACE SUR LE BASSIN DE LA RIVIÈRE POLLETT

nent de surface de la rivière Pollett				
urface annuel moyen èle d'infiltration HELP				
mm/an) - Resolution				
ı				
1994)				
1983 UTM Zone 20N ransverse Mercator és: Mètres				
4 6 8 10 Km				

1:200 000


#### CARTE 26 - DISTRIBUTION SPATIALE DU RUISSELLEMENT HYPODERMIQUE SUR LE BASSIN DE LA RIVIÈRE POLLETT

ni spaliale uu	
t hypodermique	
le la rivière Pollett	



### **CARTE 27 – RÉSERVE EN EAU MAXIMALE FACILEMENT ACCESSIBLE DANS LE SOL**

cessible dans le sol							
e maximale Smax <sup>1</sup>							
ו							
oalimentaire Canada (2010)							
1983 UTM Zone 20N ransverse Mercator							
és: Métres 4 6 8 10 Km							
1.200.000							



### CARTE 28 – INDICE DRASTIC : PROFONDEUR DE LA NAPPE



### CARTE 29 – INDICE DRASTIC : RECHARGE DE L'AQUIFÈRE AU ROC

e DRASTIC : e l'aquifère au roc							
la recharge nette tion de 150 x 150 m <sup>1</sup>							
ו) an) an)							
bilité nulle							
n							
)							
) 1983 UTM Zone 20N Fransverse Mercator tés: Mètres							
4 6 8 10 Km							
1:200 000							

310000 320,000 330000 340,000 290,000 300,000 Indice Types 7 Havelock Cotes DRASTIC des (indice A) - Résolutio Rivière 5 (Socle cristallin)
7 (Roc sédimentaire) 5090000 5090000 Secteurs à vulnérabi ✓ Résurgence Petitcodiac Forages de la CGC > Puits d'observation 5080000 5070000 5070000 Churchs Corner Rivier Ross Corner 5060000 0000 506( Références: (1) Aller et al. (1987) Wiere Point Wolfe PO-06PO-09 Système: NAD **OPO-04** Projection: Tra Unité **PO-07** Ν 012 4 330000 340000 290000 300000 310000 320000

### CARTE 30 – INDICE DRASTIC : TYPES D'AQUIFÈRE

DRASTIC : d'aquifère							
s types d'aquifère ion de 150 x 150 m <sup>1</sup>							
e fracturé) bilité nulle							
1							
1983 UTM Zone 20N ransverse Mercator és: Mètres							
4 6 8 10 Km							
1:200 000							



CARTE 31 - INDICE DRASTIC : TYPES DE SOL

#### Indice DRASTIC : Types de sol

1983 UTM Zone 20N ansverse Mercator és: Mètres									
۱.	6	8	10 Km						
1:200 000									

290,000 300,000 310000 330,000 340,000 320000 2 Havelock Cotes DRASTIC des pentes du sol (indice T) - Résolution de 150 x 150 m <sup>1</sup> Rivière □1 (> 18 %) ■3 (12 - 18%) 5090000 5090000 ■5 (6 - 12 %) ■9 (2 - 6 %) Petitcodiac **1**0 (0 - 2 %) Secteurs à vulnérabilité nulle ✓ Résurgence Forages de la CGC > Puits d'observation 5080000 5080000 PO-08 PO-03 PO-02 PO-05 5070000 5070000 PO-11 Churchs Rivier Corné Ross Corner 5060000 5060000 Références: (1) Aller et al. (1987) ière 3 Point Wolfe PO-06PO-09 **PO-04 OPO-07** Ν 0 1 2 4 330000 340000 290000 300000 310000 320000

CARTE 32 – INDICE DRASTIC : TOPOGRAPHIE (PENTES)











DRASTIC : hydraulique du roc
a conductivité lifère au roc on de 150 x 150 m <sup>1</sup> c = 1.8E-5 m/s)
ilité nulle
1983 UTM Zone 20N ansverse Mercator s: Mètres
6 8 10 Km
1:200 000



#### CARTE 35 – INDICE DRASTIC DE VULNÉRABILITÉ DE L'AQUIFÈRE AU ROC

DRASTIC de le l'aquifère au roc							
<b>DRASTIC) -</b> <b>150 m<sup>1</sup></b> < 10e perc.) 0 - 25e perc.) 0 (25 - 75e perc.) 75 - 90e perc.) (> 90e perc.) <b>ilité nulle</b>							
RASTIC relatif calculé en ntiles et n'intégrant donc andards de vulnérabilité							
1983 UTM Zone 20N ansverse Mercator és: Mètres							
6 8 10 Km							
1:200 000							



#### CARTE 36 - TEMPS DE TRANSFERT ADVECTIF VERTICAL VERS LA NAPPE

#### Temps de transfert advectif vertical vers la nappe

- Faible: 7.46 15.23 années (75 90e perc.) Moyenne: 2.29 - 7.46 années (25 - 75e perc.) Elevée: 1.43 - 2.29 années (10 - 25e perc.)

1983 UTM Zone 20N ansverse Mercator és: Mètres								
6 8 10 Km								
1:200 000								

# **10 ANNEXES**

Ce mémoire de maîtrise comprend, en plus du corps de texte (Sections 1 à 8) et des cartes (Section 9), douze annexes compilées dans le présent document (Section 10).

Les huit premières annexes (Annexes I à VIII) contiennent des graphiques ou des tableaux n'ayant pas été intégrés dans le corps du mémoire afin de ne pas alourdir le document. Chacune de ces annexes est référencée dans le texte afin que le lecteur puisse y trouver l'information complémentaire pertinente et utile à la bonne compréhension de certains des éléments expliqués dans le mémoire.

Quant aux quatre dernières annexes, elles incluent respectivement des descriptions de forages (Annexe IX), un article de conférence (Annexe X), la nomenclature des fichiers cartographiques en format SIG (Annexe XI) et l'arborescence de l'annexe électronique (Annexe XII).

La page de garde de chaque annexe comprend une brève description de son contenu. Ce texte explicatif assure une certaine continuité avec les travaux de maîtrise et permet de faire le lien entre le corps du mémoire et le contenu des annexes.

## ANNEXE I - TRAVAUX RÉALISÉS AVEC GWHAT

L'annexe I documente les résultats obtenus avec le modèle *GWHAT* (Gosselin *et al.*, 2017), dont ceux issus du traitement des données météorologiques (Section 5.6.2) et de l'analyse de la fonction de réponse barométrique ou FRB (Section 5.4.3). Par ailleurs, cette annexe permet de visualiser les hydrogrammes des puits d'observation (Section 4.2) dont les données piézométriques ont été utilisées pour estimer la recharge dans l'environnement proche des puits (Section 5.6.5). Ces estimations « locales » du taux de recharge moyen ont ensuite été comparées aux résultats obtenus avec le modèle d'infiltration HELP (Section 5.6.4).

Les premières pages de l'annexe comprennent les résultats de la validation croisée des températures (Figures I.1 à I.3 et I.7 à I.10) et des précipitations (Figures I.4 et I.11) lors de la procédure de comblement des données manguantes pour les deux stations météorologiques représentatives du territoire d'étude disposant de données couvrant la période de 1980 à 2017 (Section 5.6.2). Il s'agit de la station virtuelle « Sussex Bis » combinant les données climatiques des stations de Sussex et de Sussex Four Corners et de la station de Mechanic Settlement. Le logiciel GWHAT permet également de vérifier si le nombre de jours pluvieux après comblement est surestimé (cas de la station « Sussex Bis », Figure I.5) ou sousestimé (cas de la station de Mechanic Settlement, Figure I.11). Sur les 37 années analysées, les normales climatiques de la station « Sussex Bis » sont indiquées sur la figure I.6 et le tableau I.1 tandis qu'elles sont présentées sur la figure I.12 et le tableau I.2 pour la station de Mechanic Settlement. Ces normales climatiques (Tableaux I.1 et I.2) comprennent également une estimation du taux d'évapotranspiration potentielle calculée à partir de la méthode Thornthwaite (1948).

Les hydrogrammes des puits d'observation de la CGC présentés sur les figures I.13 à I.21 couvrent généralement la période de 2015 à 2017 (Section 4.2). Ce suivi piézométrique a concerné neuf des dix puits d'observation implantés sur la région d'étude ; le puits PO-08 ayant été contaminé lors des travaux de forage. Ces graphiques permettent également de visualiser les quelques mesures ponctuelles du niveau de nappe prises durant les campagnes de terrain. À des fins de comparaison, les données météorologiques décrites dans le paragraphe précédent ont été ajoutées aux hydrogrammes de puits. Excepté pour le puits PO-10 utilisant les données météorologiques de la station de Mechanic Settlement (Figure I.21), les données climatiques utilisées pour mettre en évidence les épisodes de recharge sont celles enregistrées à la station « Sussex Bis », plus proche du reste des puits (Figures I.13 à I.20).

Le modèle *GWHAT* apporte aussi des informations sur les conditions de confinement de la nappe sur les neuf puits d'observation disposant de données piézométriques (Figures 1.22 à 1.30). En effet, lorsque comparé aux mesures de la pression barométrique, ce suivi permet de définir les conditions de confinement selon l'allure de la courbe de réponse barométrique cumulative (Section 5.4.3).

La recharge a finalement été estimée grâce au logiciel *GWHAT* en combinant les données issues du suivi continu du niveau de nappe sur neuf des dix puits d'observation de la CGC et les données météorologiques de la station « Sussex Bis » (Section 5.6.5). Les figures I.31 à 38 montrent les niveaux d'eau mesurés comparés aux hydrogrammes synthétiques estimés en utilisant des valeurs probables pour les paramètres de calage du modèle (Tableau I.3). Le tableau I.3 comprend également l'équation de la courbe maîtresse de récession (CMR) calculée durant les périodes de récession de la nappe à partir des hydrogrammes de puits. Les variations interannuelles du taux de recharge estimé sont ensuite présentées sur les figures I.39 à I.46. Finalement, le tableau I.4 synthétise les principaux résultats d'estimation de la recharge, incluant la gamme de valeurs des paramètres après calage et le taux de recharge calculé au droit de chaque puits. Les composantes du bilan hydrologique sont ensuite présentées sur la base des années hydrologiques (Figures I.47 à I.54). Le bilan en eau a ensuite été moyenné entre 1980 et 2017 (Figures I.55 à I.62) puis présenté sur une base mensuelle (Figures I.63 à I.70) afin de visualiser les principaux épisodes de recharge.

Le taux de recharge estimé avec le modèle *GWHAT* à partir des caractéristiques physiques de l'environnement proche des puits a ensuite été comparé aux estimations du modèle d'infiltration *HELP* (Section 5.6.4).



Figure I.1 – Nuage de points comparant les valeurs de températures minimales journalières prédites et mesurées à la station « Sussex Bis » entre 1980 et 2017.



Figure I.2 – Nuage de points comparant les valeurs de températures maximales journalières prédites et mesurées à la station « Sussex Bis » entre 1980 et 2017.



Figure I.3 – Nuage de points comparant les valeurs de températures moyennes journalières prédites et mesurées à la station « Sussex Bis » entre 1980 et 2017.



Figure I.4 – Nuage de points comparant les valeurs de précipitations totales journalières prédites et mesurées à la station « Sussex Bis » entre 1980 et 2017.



Figure I.5 – Fonction de densité de probabilité (FDP) gamma d'occurrence des jours pluvieux à la station « Sussex Bis » entre 1980 et 2017 obtenues après le processus de comblement des données manquantes.



Figure I.6 – Normales de la station « Sussex Bis » entre 1980 et 2017 après le processus de comblement des données manquantes.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Annuel
T <sub>min</sub> (°C)	-13.2	-12.0	-6.7	-0.4	4.9	9.8	13.3	12.7	8.6	3.1	-1.7	-8.7	0.8
T <sub>moy</sub> (°C)	-8.0	-6.6	-1.7	4.9	11.0	15.9	19.3	18.8	14.6	8.4	2.7	-4.1	6.3
T <sub>max</sub> (°C)	-2.6	-1.1	3.4	10.2	17.1	22.0	25.3	24.9	20.5	13.8	7.2	0.7	11.8
Pluie (mm)	26.7	22.4	56.9	77.9	91.5	96.5	82.6	71.9	95.0	104.4	88.9	55.0	869.6
Neige (mm)	75.2	61.2	45.0	5.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	18.6	56.6	262.6
Précipitations totales (mm)	101.9	83.5	101.9	83.3	91.5	96.5	82.6	71.9	95.0	105.0	107.5	111.5	1 132.3
Évapotranspiration potentielle <sup>1</sup> (mm)	1.7	2.4	7.3	28.6	70.2	103.2	127.3	114.7	76.3	39.6	14.1	3.5	588.9

Tableau I.1 – Normales de la station « Sussex Bis » entre 1980 et 2017 après le processus de comblement des données manquantes.

<sup>1</sup>Calculée à partir de la méthode Thornthwaite (1948).



Figure I.7 – Nuage de points comparant les valeurs de températures minimales journalières prédites et mesurées à la station de Mechanic Settlement entre 1980 et 2017.



Figure I.8 – Nuage de points comparant les valeurs de températures maximales journalières prédites et mesurées à la station de Mechanic Settlement entre 1980 et 2017.


Figure I.9 – Nuage de points comparant les valeurs de températures moyennes journalières prédites et mesurées à la station de Mechanic Settlement entre 1980 et 2017.



Figure I.10 – Nuage de points comparant les valeurs de précipitations totales journalières prédites et mesurées à la station de Mechanic Settlement entre 1980 et 2017.



Figure I.11 – Fonction de densité de probabilité (FDP) gamma d'occurrence des jours pluvieux à la station de Mechanic Settlement entre 1980 et 2017 après le processus de comblement des données manquantes.



Figure I.12 – Normales de la station de Mechanic Settlement entre 1980 et 2017 après le processus de comblement des données manquantes.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Annuel
T <sub>min</sub> (°C)	-14.0	-12.8	-8.2	-1.8	3.9	9.2	12.9	12.4	8.2	2.5	-2.8	-9.7	0.0
T <sub>moy</sub> (°C)	-9.5	-8.4	-3.9	2.6	9.1	14.0	17.6	17.0	12.7	6.6	0.7	-5.8	4.4
T <sub>max</sub> (°C)	-5.1	-3.9	0.4	6.8	14.1	18.9	22.3	21.8	17.3	10.6	4.1	-1.9	8.8
Pluie (mm)	23.3	16.8	41.3	76.9	99.0	104.5	94.1	78.8	111.5	127.0	111.2	53.8	938.3
Neige (mm)	101.5	85.5	75.4	29.9	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	4.9	33.4	85.6	418.3
Précipitations totales (mm)	124.8	102.4	116.8	106.8	100.9	104.5	94.1	78.8	111.5	131.9	144.6	139.4	1 356.5
Évapotranspiration potentielle <sup>1</sup> (mm)	0.9	0.9	3.8	20.3	63.1	96.2	120.2	107.7	70.8	34.9	10.7	2.1	531.7

Tableau I.2 – Normales de la station de Mechanic Settlement entre 1980 et 2017 après le processus de comblement des données manquantes.

<sup>1</sup>Calculée à partir de la méthode Thornthwaite (1948).



Figure I.13 – Hydrogramme du puits PO-01 avec les données météorologiques de la station « Sussex Bis ».



Figure I.14 – Hydrogramme du puits PO-02 avec les données météorologiques de la station « Sussex Bis ».



Figure I.15 – Hydrogramme du puits PO-03 avec les données météorologiques de la station « Sussex Bis ».



Figure I.16 – Hydrogramme du puits PO-04 avec les données météorologiques de la station « Sussex Bis ».



Figure I.17 – Hydrogramme du puits PO-05 avec les données météorologiques de la station « Sussex Bis ».



Figure I.18 – Hydrogramme du puits PO-06 avec les données météorologiques de la station « Sussex Bis ».



Figure I.19 – Hydrogramme du puits PO-07 avec les données météorologiques de la station « Sussex Bis ».



Figure I.20 – Hydrogramme du puits PO-09 avec les données météorologiques de la station « Sussex Bis ».



Figure I.21 – Hydrogramme du puits PO-10 avec les données météorologiques de la station de Mechanic Settlement.



Figure I.22 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-01 où l'enveloppe grise correspond à l'erreur standard sur les fonctions estimées.



Figure I.23 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-02 où l'enveloppe grise correspond à l'erreur standard sur les fonctions estimées.



Figure I.24 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-03 où l'enveloppe grise correspond à l'erreur standard sur les fonctions estimées.



Figure I.25 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-04 où l'enveloppe grise correspond à l'erreur standard sur les fonctions estimées.



Figure I.26 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-05 où l'enveloppe grise correspond à l'erreur standard sur les fonctions estimées.



Figure I.27 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-06 où l'enveloppe grise correspond à l'erreur standard sur les fonctions estimées.



Figure I.28 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-07 où l'enveloppe grise correspond à l'erreur standard sur les fonctions estimées.



Figure I.29 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-09 où l'enveloppe grise correspond à l'erreur standard sur les fonctions estimées.



Figure I.30 – Réponse barométrique cumulative du puits PO-10 où l'enveloppe grise correspond à l'erreur standard sur les fonctions estimées.



Figure I.31 – Niveaux d'eau estimés avec le modèle GWHAT selon l'intervalle de confiance GLUE de 5 à 95 % représenté en gris par rapport aux niveaux d'eau mesurés en bleu pour le puits PO-01.



Figure I.32 – Niveaux d'eau estimés avec le modèle GWHAT selon l'intervalle de confiance GLUE de 5 à 95 % représenté en gris par rapport aux niveaux d'eau mesurés en bleu pour le puits PO-03.



Figure I.33 – Niveaux d'eau estimés avec le modèle GWHAT selon l'intervalle de confiance GLUE de 5 à 95 % représenté en gris par rapport aux niveaux d'eau mesurés en bleu pour le puits PO-04.



Figure I.34 – Niveaux d'eau estimés avec le modèle GWHAT selon l'intervalle de confiance GLUE de 5 à 95 % représenté en gris par rapport aux niveaux d'eau mesurés en bleu pour le puits PO-05.



Figure I.35 – Niveaux d'eau estimés avec le modèle GWHAT selon l'intervalle de confiance GLUE de 5 à 95 % représenté en gris par rapport aux niveaux d'eau mesurés en bleu pour le puits PO-06.



Figure I.36 – Niveaux d'eau estimés avec le modèle GWHAT selon l'intervalle de confiance GLUE de 5 à 95 % représenté en gris par rapport aux niveaux d'eau mesurés en bleu pour le puits PO-07.



Figure I.37 – Niveaux d'eau estimés avec le modèle GWHAT selon l'intervalle de confiance GLUE de 5 à 95 % représenté en gris par rapport aux niveaux d'eau mesurés en bleu pour le puits PO-09.



Figure I.38 – Niveaux d'eau estimés avec le modèle GWHAT selon l'intervalle de confiance GLUE de 5 à 95 % représenté en gris par rapport aux niveaux d'eau mesurés en bleu pour le puits PO-10.



Figure I.39 – Recharge annuelle estimée avec le modèle GWHAT pour le puits PO-01 selon les années hydrologiques, la courbe enveloppe rouge représente l'intervalle de confiance GLUE entre 25 et 75 % tandis que les moustaches correspondent aux limites d'incertitude pour l'intervalle de confiance GLUE entre 5 et 95 %.



Figure I.40 – Recharge annuelle estimée avec le modèle GWHAT pour le puits PO-03 selon les années hydrologiques, la courbe enveloppe rouge représente l'intervalle de confiance GLUE entre 25 et 75 % tandis que les moustaches correspondent aux limites d'incertitude pour l'intervalle de confiance GLUE entre 5 et 95 %.



Figure I.41 – Recharge annuelle estimée avec le modèle GWHAT pour le puits PO-04 selon les années hydrologiques, la courbe enveloppe rouge représente l'intervalle de confiance GLUE entre 25 et 75 % tandis que les moustaches correspondent aux limites d'incertitude pour l'intervalle de confiance GLUE entre 5 et 95 %.



Figure I.42 – Recharge annuelle estimée avec le modèle GWHAT pour le puits PO-05 selon les années hydrologiques, la courbe enveloppe rouge représente l'intervalle de confiance GLUE entre 25 et 75 % tandis que les moustaches correspondent aux limites d'incertitude pour l'intervalle de confiance GLUE entre 5 et 95 %.



Figure I.43 – Recharge annuelle estimée avec le modèle GWHAT pour le puits PO-06 selon les années hydrologiques, la courbe enveloppe rouge représente l'intervalle de confiance GLUE entre 25 et 75 % tandis que les moustaches correspondent aux limites d'incertitude pour l'intervalle de confiance GLUE entre 5 et 95 %.



Figure I.44 – Recharge annuelle estimée avec le modèle GWHAT pour le puits PO-07 selon les années hydrologiques, la courbe enveloppe rouge représente l'intervalle de confiance GLUE entre 25 et 75 % tandis que les moustaches correspondent aux limites d'incertitude pour l'intervalle de confiance GLUE entre 5 et 95 %.



Figure I.45 – Recharge annuelle estimée avec le modèle GWHAT pour le puits PO-09 selon les années hydrologiques, la courbe enveloppe rouge représente l'intervalle de confiance GLUE entre 25 et 75 % tandis que les moustaches correspondent aux limites d'incertitude pour l'intervalle de confiance GLUE entre 5 et 95 %.



Figure I.46 – Recharge annuelle estimée avec le modèle GWHAT pour le puits PO-10 selon les années hydrologiques, la courbe enveloppe rouge représente l'intervalle de confiance GLUE entre 25 et 75 % tandis que les moustaches correspondent aux limites d'incertitude pour l'intervalle de confiance GLUE entre 5 et 95 %.

Tableau I.3 – Définition de la courbe maîtresse de récession (CMR) et valeurs plausibles des paramètres hydrologiques principaux utilisés dans le processus de calage des hydrogrammes synthétiques avec GWHAT pour chaque puits analysé.

Duite1	Équation de la courbe maîtresse	RA	S <sub>max</sub> <sup>3</sup> (r	nm)	C <sub>RO</sub> <sup>3</sup>		
Fuits	de récession <sup>2</sup> (CMR)	Min	Моу	Max	Min	Моу	Max
	∂h/∂t (mm/d) = -13.19 h + 33.05	0	107	105	0 308	0 417	0 505
FO-01 -	RMSE = 0.027003 m	_ 0	107	195	0.590	0.417	0.505
PO-03	∂h/∂t (mm/d) = -9.59 h + 94.72	0	124	240	0.398	0.420	0.505
	RMSE = 0.217029 m	- 0					
	∂h/∂t (mm/d) = -14.83 h + 56.26	0	02	105	0 200	0.420	0 505
PO-04 -	RMSE = 0.027754 m	_ 0	92	195	0.390	0.429	0.505
	∂h/∂t (mm/d) = -19.31 h + 175.53	0	99	135	0.398	0.435	0.505
FU-05 -	RMSE = 0.131806 m	_ 0					
PO-06	∂h/∂t (mm/d) = -14.84 h + 401.97	0	86	195	0.398	0.424	0.505
	RMSE = 0.039085 m	_ 0					
DO 07	∂h/∂t (mm/d) = -8.39 h + 34.41	0	02	105	0 200	0 420	0 505
FU-07 -	RMSE = 0.023655 m	_ 0	92	195	0.390	0.429	0.505
DO 00	∂h/∂t (mm/d) = -10.46 h + 288.99	0	96	105	0 200	0 4 2 4	0 505
FO-09 -	RMSE = 0.066661 m	_ 0	80	195	0.590	0.424	0.505
DO 10	∂h/∂t (mm/d) = -82.63 h + 462.83	0	159	240	0.398	0 415	0.505
PO-10 —	RMSE = 0.187849 m	0				0.415	

<sup>1</sup>Les puits PO-02, jaillissant, et PO-08, contaminé, n'ont pas été analysés.

<sup>2</sup>Equations définies par pointage manuel des périodes récession sur GWHAT (Gosselin et al., 2017).

<sup>3</sup>Paramètres calculés dans une zone d'un km<sup>2</sup> autour des puits.

Tableau I.4 – Taux de recharge estimé avec la méthode du bilan combiné à partir des données de la station météorologique « Sussex Bis » entre 1680 et 2017 et présenté à l'aide de la méthode d'optimisation GLUE.

		Р	aramèt	res calé	S		Recharge (mm/an) - 1980-2017					
Puits	Sy		RAS <sub>max</sub> (mm)		C <sub>RO</sub>		CLUES			CLUE75		
	Min	Мах	Min	Мах	Min	Мах	GLUES	GLUE25	GLUESU	GLUE/5	GLUE95	
PO-01	0.067	0.072	1	20	0.260	0.260	419	489	544	592	660	
PO-03	0.023	0.028	2	41	0.650	0.350	292	365	431	485	537	
PO-04	0.051	0.063	2	23	0.310	0.310	362	433	494	548	598	
PO-05	0.014	0.020	0	48	0.495	0.495	215	251	293	352	433	
PO-06	0.029	0.035	3	85	0.400	0.400	246	299	336	387	455	
PO-07	0.051	0.067	1	29	0.350	0.350	317	384	445	499	564	
PO-09	0.029	0.044	0	64	0.415	0.415	240	286	321	375	462	
PO-10	0.010	0.12	2	50	0.470	0.470	219	240	265	294	415	



Figure I.47 – Composantes du bilan hydrologique estimées avec le modèle GWHAT pour le puits PO-01.



Figure I.48 – Composantes du bilan hydrologique estimées avec le modèle GWHAT pour le puits PO-03.



Figure I.49 – Composantes du bilan hydrologique estimées avec le modèle GWHAT pour le puits PO-04.



Figure I.50 – Composantes du bilan hydrologique estimées avec le modèle GWHAT pour le puits PO-05.


Figure I.51 – Composantes du bilan hydrologique estimées avec le modèle GWHAT pour le puits PO-06.



Figure I.52 – Composantes du bilan hydrologique estimées avec le modèle GWHAT pour le puits PO-07.



Figure I.53 – Composantes du bilan hydrologique estimées avec le modèle GWHAT pour le puits PO-09.



Figure I.54 – Composantes du bilan hydrologique estimées avec le modèle GWHAT pour le puits PO-10.



Figure I.55 – Bilan en eau annuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-01.



Figure I.56 – Bilan en eau annuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-03.



Figure I.57 – Bilan en eau annuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-04.



Figure I.58 – Bilan en eau annuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-05.



Figure I.59 – Bilan en eau annuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-06.



Figure I.60 – Bilan en eau annuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-07.



Figure I.61 – Bilan en eau annuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-09.



Figure I.62 – Bilan en eau annuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-10.



Figure I.63 – Bilan en eau mensuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-01.



Figure I.64 – Bilan en eau mensuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-03.



Figure I.65 – Bilan en eau mensuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-04.



Figure I.66 – Bilan en eau mensuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-05.



Figure I.67 – Bilan en eau mensuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-06.



Figure I.68 – Bilan en eau mensuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-07.



Figure I.69 – Bilan en eau mensuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-09.



Figure I.70 – Bilan en eau mensuel moyen entre 1980 et 2017 estimé avec le modèle GWHAT pour le puits PO-10.

## ANNEXE II - GRANULOMÉTRIE DES DÉPÔTS MEUBLES

L'annexe II comprend des tableaux faisant référence aux données concernant les prélèvements de dépôts meubles et aux résultats des analyses granulométriques. Cette analyse granulométrique des dépôts meubles (section 5.1.1) avait pour principal objectif de caractériser les unités quaternaires de la région d'étude en définissant des hydrofaciès (Section 5.1.2) en se basant sur des échantillons de dépôts de surface (Section 4.3.3).

Les données granulométriques proviennent de rapports historiques et des campagnes de terrain effectuées durant le présent projet (Section 4.3.3).

Les coordonnées des échantillons de dépôts meubles prélevées par Brinsmead et Finamore (1977), Seaman et Thibault (1986), Brinsmead et Seaman (1987) et Seaman (1988) sont respectivement présentés dans les tableaux II.1, II.2, II.3 et II.4. Ces quatre études historiques se sont essentiellement concentrées sur les ressources granulaires, considérant donc surtout les dépôts les plus grossiers, soit les dépôts fluvio-glaciaires et les dépôts de contact glaciaire puis, dans une moindre mesure, les tills d'ablation et les alluvions. Pour chaque échantillon, l'analyse réalisée lors de ce projet incluait le calcul du coefficient d'uniformité, la définition de la distribution des grains, puis la détermination de la texture du dépôt meuble prélevé (Tableaux II.5 à II.12).

Des échantillonnages de dépôts meubles ont également été effectués lors des travaux de forage (Tableau II.13) et durant les diverses campagnes de terrain (Tableau II.14) réalisés entre 2015 et 2016. Ces prélèvements complémentaires ont permis de définir le coefficient d'uniformité, la distribution granulométrique et la texture des unités les plus représentatives du territoire, en l'occurrence les tills glaciaires, bien que quelques échantillons d'alluvions, de dépôts fluvio-glaciaires et de dépôts de contact glaciaire aient également été analysés (Tableaux II.15 à II.17).

La section 5.1.1 synthétise les résultats de ces analyses granulométriques, ensuite utilisés pour définir les deux hydrofaciès présents sur les deux bassins (Section 5.1.2). La définition des hydrofaciès à partir des textures des divers dépôts meubles du territoire s'est basée sur les descriptions de Rampton *et al.* (1984), Seaman (1988) et Pronk *et al.* (2005a) (Tableau II.18) mais également sur des descriptions plus précises des unités de tills documentées par Pronk *et al.* (2005b) (Tableau II.19). Cette définition a aussi été complétée par les descriptions lithologiques des échantillons de dépôts meubles collectés durant la campagne de terrain de l'été 2016, puis ajustée suite aux résultats des analyses granulométriques (Tableau II.20).

ID Échantillan	Coord	onnées <sup>1</sup>	ID Échantillan	Coord	onnées <sup>1</sup>	ID Échantillan	Coord	onnées <sup>1</sup>
ID-Echantinon	X (m)	Y (m)	ID-ECHAIMINNI	X (m)	Y (m)	ID-ECHANIIION	X (m)	Y (m)
H12-154	279 105	5 054 773	H12-213	280 348	5 056 434	H12-61	301 445	5 053 581
H12-155	278 401	5 053 318	H12-214	285 541	5 066 481	H12-62	297 622	5 050 815
H12-156	278 408	5 054 115	H12-30-A	284 209	5 052 991	H12-63	302 201	5 068 966
H12-157-A	284 334	5 044 598	H12-30-B	284 209	5 052 991	H12-64	301 354	5 053 451
H12-162	275 772	5 047 751	H12-37-A	284 182	5 045 790	H12-65	304 096	5 049 534
H12-163Bh	274 220	5 043 774	H12-37-B	284 182	5 045 790	H12-66	303 241	5 048 578
H12-200	285 292	5 065 287	H12-47	275 580	5 047 655	H12-67	292 640	5 068 431
H12-202-A	276 130	5 060 762	H12-50	286 115	5 042 504	H12-68	291 873	5 069 192
H12-202-B	276 130	5 060 762	H12-52	285 575	5 043 653	H12-69	287 995	5 068 195
H12-205	281 020	5 061 005	H12-53	286 285	5 042 115	H12-71	285 974	5 065 165
H12-207	272 409	5 065 714	H12-54	287 438	5 043 948	H12-72	285 935	5 066 609
H12-210	276 399	5 060 233	H12-57	293 250	5 047 198	H12-76a-76b	287 849	5 054 729
H12-211	276 103	5 060 065	H12-59	299 064	5 045 177	H12-78	305 736	5 054 984
H12-212	275 404	5 061 347						

Tableau II.1 – Coordonnées des échantillons de dépôts meubles prélevés pour l'analyse granulométrique sur les secteurs de Sussex et Hampstead : d'après des données extraites de Brinsmead et Finamore (1977).

<sup>1</sup> Projection : NAD 1983 UTM Zone 20N.

Tableau II.2 – Coordonnées des échantillons de dépôts meubles prélevés pour l'analyse granulométrique sur les secteurs de Central Lowland : d'après des données extraites de Seaman et Thibault (1986).

ID Échantillon	Coordonnées <sup>1</sup>						
ID-ECHANINON	X (m)	Y (m)					
H13-11	305 427	5 073 930					
H13-3	287 586	5 071 790					
H13-4	291 881	5 069 930					
H13-9-A	298 439	5 076 136					

ID Échantillan	Coord	onnées <sup>1</sup>		Coord	onnées <sup>1</sup>	ID Échantillan	Coord	onnées <sup>1</sup>
ID-Echantilion	X (m)	Y (m)	ID-Echantilion	X (m)	Y (m)	ID-Echantilion	X (m)	Y (m)
H14-1	329 072	5 096 120	H14-59	316 674	5 085 156	H14-76	317 771	5 073 225
H14-10-A	341 571	5 070 055	H14-61	316 807	5 085 844	H14-77	317 306	5072 695
H14-10-B	341 571	5 070 055	H14-62	316 886	5 086 842	H14-79	316 807	5 072 694
H14-11	343 396	5 072 409	H14-63	313 202	5 081 435	H14-80	316 109	5 072 496
H14-2-A	328 058	5 094 267	H14-64	313 720	5 081 515	H14-81	316 182	5 072 395
H14-3	326 126	5 092 348	H14-65	307 983	5 074 966	H14-82	315 319	5 070 771
H14-4	336 992	5 095 659	H14-66	318 598	5 096 030	H14-84	318 502	5 072 296
H14-5	338 105	5 088 869	H14-67	306 642	5 073 435	H14-85	318 728	5 072 181
H14-50	314 567	5 083 485	H14-69	308 246	5 073 055	H14-86	319 784	5 070 371
H14-51-A	313 916	5 082 498	H14-6-A	341 802	5 081 080	H14-87	324 024	5 077 409
H14-51-B	313 916	5 082 498	H14-6-B	341 802	5 081 080	H14-88	318 402	5 074 195
H14-52	310 230	5 078 983	H14-7	327 606	5 070 233	H14-89	306 437	5 086 601
H14-53	309 611	5 078 215	H14-70	308 817	5 073 476	H14-8-A	336 442	5 073 511
H14-54	310 226	5 078 999	H14-71	313 907	5 079 477	H14-8-B	336 442	5 073 511
H14-55	310 991	5 079 019	H14-72	321 170	5 076 011	H14-90	315 779	5 071 063
H14-56	311 621	5 079 997	H14-73	322 265	5 076 588	H14-9-A	338 317	5 069 265
H14-57	311 952	5 080 497	H14-74	320 993	5 075 123	H14-9-B	338 317	5 069 265
H14-58	316 426	5 085 790	H14-75	323 121	5 076 480			

Tableau II.3 – Coordonnées des échantillons de dépôts meubles prélevés pour l'analyse granulométrique sur le secteur de Petitcodiac : d'après des données extraites de Brinsmead et Seaman (1987).

ID Échantillan	Coord	onnées <sup>1</sup>	ID Échantillan	Coord	onnées <sup>1</sup>	ID Échantillan	Coord	onnées <sup>1</sup>
ID-Echantinon	X (m)	Y (m)	ID-Echantinon	X (m)	Y (m)	ID-Echantinon	X (m)	Y (m)
H11-1	305 121	5 055 482	H11-2	307 517	5 055 312	H11-31	332 834	5 059 027
H11-10	314 651	5 053 327	H11-20	318 999	5 052 152	H11-32	334 448	5 065 707
H11-11	315 606	5 050 481	H11-21	320 310	5 052 525	H11-33	335 402	5 068 190
H11-12	319 703	5 063 081	H11-22	319 482	5 050 943	H11-34	339 178	5 062 872
H11-13	321 107	5 062 089	H11-23	318 898	5 048 285	H11-35	338 965	5 059 718
H11-14	317 481	5 058 988	H11-24	318 329	5 046 115	H11-4	308 291	5 066 937
H11-15-A	318 407	5 057 914	H11-25-A	317 830	5 042 818	H11-5	311 149	5 068 224
H11-15-B	318 407	5 057 914	H11-25-B	317 830	5 042 818	H11-6	314 886	5 068 359
H11-15-C	318 407	5 057 914	H11-26	322 456	5 067 959	H11-7-A	315 844	5 066 910
H11-16	317 895	5 056 308	H11-27-A	328 953	5 064 194	H11-7-B	315 844	5 066 910
H11-17	320 601	5 056 770	H11-27-B	328 953	5 064 194	H11-7-C	315 844	5 066 910
H11-18	318 319	5 054 442	H11-28	325 241	5 061 524	H11-8	312 850	5 063 017
H11-19-A	318 945	5 052 308	H11-29-A	328 176	5 061 745	H11-9	313 015	5 057 085
H11-19-B	318 945	5 052 308	H11-30	330 521	5 059 639			

Tableau II.4 – Coordonnées des échantillons de dépôts meubles prélevés pour l'analyse granulométrique sur les secteurs de Waterford et de Salmon River : d'après des données extraites de (Seaman, 1988).

Tableau II.5 – Résultats des analyses granulométriques sur les secteurs de Sussex et Hampstead : d'après des données extraites de Brinsmead et Finamore (1977) (1/2).

ID Échantillan	Tuna da dánật	Coefficient	Distrik	outio	n des g	rains (%)	Taxtura finala du dánât
ID-Echantinon	Type de depot	d'uniformité (C <sub>u</sub> )	Argile	Silt	Sable	Graviers	
H12-205	Till d'ablation	83.3	0	3	39	58	Sable fin très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H12-162	Fluvio-glaciaire	3.1	0	28	70	2	Sable moyen non graveleux (< 15 % du volume)
H12-163Bh	Fluvio-glaciaire	5.4	0	13	85	2	Sable moyen graveleux (15 à 35 % du volume)
H12-202-A	Fluvio-glaciaire	15.5	0	0	38	62	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H12-202-B	Fluvio-glaciaire	2.4	0	3	88	9	Sable moyen non graveleux (< 15 % du volume)
H12-211	Fluvio-glaciaire	2.3	0	2	91	7	Sable grossier non graveleux (< 15 % du volume)
H12-47	Fluvio-glaciaire	8.8	0	14	59	27	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)
H12-59	Fluvio-glaciaire	13.6	0	0	23	77	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)
H12-72	Fluvio-glaciaire	37.0	0	3	39	58	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H12-76a-76b	Fluvio-glaciaire	11.3	0	5	57	38	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)
H12-154	Contact glaciaire	4.8	0	1	56	43	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)
H12-155	Contact glaciaire	2.8	0	6	90	4	Sable grossier non graveleux (< 15 % du volume)
H12-156	Contact glaciaire	2.6	0	2	82	16	Sable grossier non graveleux (< 15 % du volume)
H12-157-A	Contact glaciaire	2.6	0	5	93	2	Sable grossier non graveleux (< 15 % du volume)
H12-200	Contact glaciaire	24.1	0	0	24	76	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)
H12-207	Contact glaciaire	10.9	0	0	24	76	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)
H12-210	Contact glaciaire	15.1	0	2	45	53	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H12-212	Contact glaciaire	12.4	0	0	44	56	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H12-213	Contact glaciaire	14.7	0	0	25	75	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)
H12-214	Contact glaciaire	9.2	0	0	35	65	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H12-30-A	Contact glaciaire	11.5	0	1	45	54	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H12-30-B	Contact glaciaire	2.3	0	2	98	0	Sable grossier non graveleux (< 15 % du volume)
H12-37-A	Contact glaciaire	3.9	0	8	83	9	Sable grossier non graveleux (< 15 % du volume)
H12-37-B	Contact glaciaire	15.8	0	1	29	70	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H12-50	Contact glaciaire	13.1	0	1	22	77	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)

Tableau II.6 – Résultats des analyses granulométriques sur les secteurs de Sussex et Hampstead : d'après des données extraites de Brinsmead et Finamore (1977) (2/2).

ID-Échantillon Type de dénêt		Coefficient	Distrik	outio	n des g	rains (%)	Toxturo finalo du dónôt	
ID-Echantinon	Type de depot	d'uniformité (C <sub>u</sub> )	Argile	Silt	Sable	Graviers		
H12-52	Contact glaciaire	82.6	0	0	53	47	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)	
H12-53	Contact glaciaire	8.9	0	1	42	57	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)	
H12-54	Contact glaciaire	42.5	0	3	22	75	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)	
H12-57	Contact glaciaire	118.8	0	7	38	55	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	
H12-61	Contact glaciaire	14.6	0	1	28	71	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	
H12-62	Contact glaciaire	27.5	0	4	33	63	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	
H12-63	Contact glaciaire	28.6	0	6	38	56	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	
H12-64	Contact glaciaire	15.0	0	4	34	62	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	
H12-65	Contact glaciaire	36.9	0	7	46	47	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)	
H12-66	Contact glaciaire	21.7	0	1	24	75	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)	
H12-67	Contact glaciaire	9.7	0	1	51	48	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)	
H12-68	Contact glaciaire	22.5	0	1	28	71	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	
H12-69	Contact glaciaire	35.7	0	2	34	64	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	
H12-71	Contact glaciaire	13.0	0	0	45	55	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	
H12-78	Contact glaciaire	6.4	0	2	29	69	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	

Tableau II.7 – Résultats des analyses granulométriques sur le secteur de Central Lowland : d'après des données extraites de Seaman et Thibault (1986).

ID Échantillon	Tupo do dápôt	Coefficient	Distri	butio	n des g	rains (%)	Taxtura finala du dánât	
D-Echantinon Type de depo		d'uniformité (C <sub>u</sub> )	Argile	Silt	Sable	Graviers	rexture imale du depot	
H13-4	Fluvio-glaciaire	2.4	0	4	96	0	Sable moyen sans graviers	
H13-9-A	Fluvio-glaciaire	27.3	0	1	33	66	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	
H13-11	Contact glaciaire	3.0	0	6	81	13	Sable grossier non graveleux (< 15 % du volume)	
H13-3	Contact glaciaire	36.9	0	8	34	58	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	

Tableau II.8 – Résultats des analyses granulométriques sur le secteur de Petitcodiac : d'après des données extraites de Brinsmead et Seaman (1987) (1/3).

ID Échantillan	Tuna da dánât	Coefficient	Distri	outio	n des gr	ains (%)	Touture finale du dénât
ID-ECHANIIIION	Type de depoi	d'uniformité (C <sub>u</sub> )	Argile	Silt	Sable	Graviers	
H14-81	Alluvions	25.0	0	0	17	83	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)
H14-1	Fluvio-glaciaire	2.3	0	1	91	8	Sable grossier non graveleux (< 15 % du volume)
H14-3	Fluvio-glaciaire	13.3	0	1	32	67	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H14-4	Fluvio-glaciaire	3.0	0	1	77	22	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)
H14-5	Fluvio-glaciaire	36.7	0	1	14	85	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)
H14-50	Fluvio-glaciaire	10.9	0	3	46	51	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H14-51-A	Fluvio-glaciaire	15.7	0	3	44	53	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H14-51-B	Fluvio-glaciaire	8.6	0	2	50	48	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)
H14-55	Fluvio-glaciaire	25.5	0	1	33	66	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H14-56	Fluvio-glaciaire	33.3	0	2	23	75	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)
H14-57	Fluvio-glaciaire	25.6	0	1	22	77	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)
H14-58	Fluvio-glaciaire	17.0	0	5	45	50	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)
H14-59	Fluvio-glaciaire	16.9	0	1	41	58	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H14-63	Fluvio-glaciaire	9.7	0	2	44	54	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H14-64	Fluvio-glaciaire	22.7	0	1	39	60	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H14-66	Fluvio-glaciaire	5.7	0	2	62	36	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)
H14-7	Fluvio-glaciaire	3.6	0	4	83	13	Sable grossier non graveleux (< 15 % du volume)
H14-72	Fluvio-glaciaire	26.9	0	0	36	64	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H14-73	Fluvio-glaciaire	15.8	0	0	26	74	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)
H14-74	Fluvio-glaciaire	19.0	0	3	51	46	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H14-75	Fluvio-glaciaire	38.7	0	0	31	69	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H14-76	Fluvio-glaciaire	31.4	0	0	27	73	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H14-8-A	Fluvio-glaciaire	3.2	0	1	76	23	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)
H14-8-B	Fluvio-glaciaire	9.8	0	1	37	62	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)

Tableau II.9 – Résultats des analyses granulométriques sur le secteur de Petitcodiac : d'après des données extraites de Brinsmead et Seaman (1987) (2/3).

ID Échantillan	Tuna da dánôt	Coefficient	Distrik	outio	n des g	rains (%)	Toyáuya finala du dánât
ID-Echantinon	Type de depoi	d'uniformité (C <sub>u</sub> )	Argile	Silt	Sable	Graviers	Texture inale du depot
H14-84	Fluvio-glaciaire	57.9	0	2	34	64	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H14-85	Fluvio-glaciaire	16.0	0	0	15	85	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)
H14-86	Fluvio-glaciaire	12.3	0	0	15	85	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)
H14-87	Fluvio-glaciaire	22.4	0	0	24	76	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)
H14-88	Fluvio-glaciaire	43.5	0	1	25	74	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)
H14-9-A	Fluvio-glaciaire	2.5	0	0	90	10	Sable grossier non graveleux (< 15 % du volume)
H14-9-B	Fluvio-glaciaire	41.8	0	4	16	80	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)
H14-10-A	Contact glaciaire	2.3	0	2	95	3	Sable grossier non graveleux (< 15 % du volume)
H14-10-B	Contact glaciaire	45.3	0	5	16	79	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)
H14-11	Contact glaciaire	56.7	0	6	19	75	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)
H14-2-A	Contact glaciaire	8.8	0	4	53	43	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)
H14-52	Contact glaciaire	23.0	0	3	31	66	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H14-53	Contact glaciaire	16.2	0	3	32	65	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H14-54	Contact glaciaire	8.9	0	0	36	64	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H14-6-A	Contact glaciaire	32.0	0	8	24	68	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H14-6-B	Contact glaciaire	22.0	0	6	41	53	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H14-61	Contact glaciaire	10.4	0	6	51	43	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)
H14-62	Contact glaciaire	23.1	0	4	40	56	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H14-65	Contact glaciaire	8.8	0	1	52	47	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H14-67	Contact glaciaire	5.9	0	8	70	22	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)
H14-69	Contact glaciaire	6.6	0	0	35	65	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H14-70	Contact glaciaire	12.5	0	5	52	43	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)
H14-71	Contact glaciaire	9.0	0	5	47	48	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)
H14-77	Contact glaciaire	27.7	0	0	18	82	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)

Tableau II.10 – Résultats des analyses granulométriques sur le secteur de Petitcodiac : d'après des données extraites de Brinsmead et Seaman (1987) (3/3).

ID Échantillon	Tuno do dánôt	Coefficient	Distribution des grains (%)				Toyture finale du dénêt	
id-Echantinon Type de C	i ype de depoi	d'uniformité (C <sub>u</sub> )	Argile	Silt	Sable	Graviers		
H14-79	Contact glaciaire	26.7	0	1	28	71	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)	
H14-80	Contact glaciaire	25.9	0	1	35	64	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	
H14-82	Contact glaciaire	36.8	0	2	31	67	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)	
H14-89	Contact glaciaire	21.7	0	1	26	73	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)	
H14-90	Contact glaciaire	18.0	0	1	31	68	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)	

Tableau II.11 – Résultats des analyses granulométriques sur les secteurs de Waterford et de Salmon River : d'après des données extraites de (Seaman, 1988) (1/2).

ID-Échantillon Type de dépêt		Coefficient	Distrik	outio	n des g	rains (%)	Toxturo finalo du dónôt	
ID-ECHAIMION	i ype de depot	d'uniformité (C <sub>u</sub> )	Argile	Silt	Sable	Graviers		
H11-12	Fluvio-glaciaire	14.2	0	1	17	82	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)	
H11-13	Fluvio-glaciaire	30.0	0	3	15	82	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)	
H11-16	Fluvio-glaciaire	15.0	0	1	18	81	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)	
H11-20	Fluvio-glaciaire	25.3	0	0	13	87	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)	
H11-22	Fluvio-glaciaire	6.0	0	0	2	98	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)	
H11-23	Fluvio-glaciaire	41.7	0	3	16	81	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)	
H11-24	Fluvio-glaciaire	6.7	0	3	46	51	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	
H11-1	Contact glaciaire	29.5	0	5	18	77	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)	
H11-10	Contact glaciaire	25.6	0	3	18	79	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)	
H11-11	Contact glaciaire	32.7	0	4	14	82	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)	
H11-14	Contact glaciaire	3.2	0	3	83	14	Sable grossier non graveleux (< 15 % du volume)	
H11-15-A	Contact glaciaire	17.4	0	5	18	77	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)	
H11-15-B	Contact glaciaire	9.4	0	2	29	69	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	
H11-15-C	Contact glaciaire	38.3	0	4	16	80	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)	
H11-17	Contact glaciaire	34.3	0	6	21	73	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	

Tableau II.12 – Résultats des analyses granulométriques sur les secteurs de Waterford et de Salmon River : d'après des données extraites de (Seaman, 1988) (2/2).

ID Échantillon	Tuno do dánôt	Coefficient	Distrib	outio	n des g	rains (%)	Toxturo finalo du dónôt
ID-Echantinon	Type de depot	d'uniformité (C <sub>u</sub> )	Argile	Silt	Sable	Graviers	- Texture infale du depot
H11-18	Contact glaciaire	15.0	0	2	25	73	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H11-19-A	Contact glaciaire	77.5	0	5	13	82	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)
H11-19-B	Contact glaciaire	22.5	0	9	51	40	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)
H11-2	Contact glaciaire	12.5	0	6	49	45	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)
H11-21	Contact glaciaire	31.6	0	1	26	73	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H11-25-A	Contact glaciaire	103.7	0	5	19	76	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)
H11-25-B	Contact glaciaire	7.0	0	1	7	92	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)
H11-26	Contact glaciaire	48.1	0	3	21	76	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)
H11-27-A	Contact glaciaire	35.5	0	1	13	86	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)
H11-27-B	Contact glaciaire	6.3	0	0	22	78	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)
H11-28	Contact glaciaire	24.0	0	1	20	79	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)
H11-29-A	Contact glaciaire	10.7	0	1	30	69	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H11-30	Contact glaciaire	95.6	0	5	18	77	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)
H11-31	Contact glaciaire	21.1	0	0	26	74	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H11-32	Contact glaciaire	78.3	0	5	26	69	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H11-33	Contact glaciaire	20.0	0	3	17	80	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)
H11-34	Contact glaciaire	31.4	0	1	24	75	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H11-35	Contact glaciaire	10.6	0	2	25	73	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H11-4	Contact glaciaire	6.8	0	10	74	16	Sable grossier non graveleux (< 15 % du volume)
H11-5	Contact glaciaire	23.5	0	1	25	74	Sable grossier extrêmement graveleux (> 60% du volume)
H11-6	Contact glaciaire	32.8	0	7	24	69	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H11-7-A	Contact glaciaire	23.5	0	5	28	67	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H11-7-B	Contact glaciaire	4.5	0	10	86	4	Sable grossier non graveleux (< 15 % du volume)
H11-7-C	Contact glaciaire	56.7	0	8	19	73	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
H11-8	Contact glaciaire	4.7	0	2	62	36	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)
H11-9	Contact glaciaire	40.5	0	4	24	72	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)

Tableau II.13 – Coordonnées des échantillons de dépôts meubles prélevés pour l'analyse granulométrique lors des travaux de forage.

ID Échantillan	Coordonnées <sup>1</sup>		ID Échantillan	Coord	lonnées <sup>1</sup>	ID Échantillan	Coordonnées <sup>1</sup>	
ID-ECHAITUIION	X (m)	Y (m)	ID-ECHAIILIION	X (m)	Y (m)	ID-Echantinon	X (m)	Y (m)
DF-PO-01-3.96/4.57	310 809	5 070 597	DF-PO-06-6.10/9.14	314 938	5 070 567	CF-PO-09-4.88	314 942	5 070 569
DF-PO-01-6.71/9.14	310 809	5 070 597	DF-PO-06-12.50/13.72	314 938	5 070 567	CF-PO-09-10.06	314 942	5 070 569
DF-PO-02-3.05/4.57	313 894	5 072 381	CF-PO-07-2.22	310 116	5 067 607	CF-PO-09-11.58/11.89	314 942	5 070 569
DF-PO-02-8.23/9.14	313 894	5 072 381	CF-PO-07-2.35	310 116	5 067 607	CF-PO-10-3.05	340 546	5 076 560

DF-PO-06-2.74/3.66 314 938 5 070 567 <sup>1</sup> Projection : NAD 1983 UTM Zone 20N.

Tableau II.14 – Coordonnées des échantillons de	e dépôts meubles	prélevés pour l'analyse	e granulométrique lors des	campagnes de terrain.
---	------------------	-------------------------	----------------------------	-----------------------

ID Échantillan	Coordonnées <sup>1</sup>		ID Échantillan	Coord	onnées <sup>1</sup>	ID Échantillan	Coordonnées <sup>1</sup>	
ID-ECHAILIIION	X (m)	Y (m)	ID-Echantinon	X (m)	X (m) Y (m)		X (m)	Y (m)
PM-PR-22-0-1	318 652	5 073 058	TM-PG-17-0.59	341 507	5 061 707	TM-PG-08-0.60	319 130	5 075 634
PM-PR-13-0-1	315 269	5 084 051	TM-PG-18-0.50	338 373	5 059 502	TM-PG-09-0.37	319 395	5 075 250
PM-PR-23-0-2	316 215	5 071 445	TM-PG-10-0.45	306 316	5 074 958	TM-PG-14-0.62	322 060	5 084 424
TM-PG-03-0.55	333 945	5 074 723	TM-PG-11-0.50	311 116	5 083 486	TM-PG-05-0.35	310 131	5 067 622
TM-PG-04-0.27	334 292	5 075 540	TM-PG-12-0.80	313 478	5 085 015	TM-PG-15-0.40	319 885	5 067 803
TM-PG-06-0.37	327 099	5 070 732	TM-PG-02-0.25	342 747	5 076 973	TM-PG-19-0.65	331 419	5 066 882
TM-PG-07-0.60	327 849	5 073 955	TM-PG-16-0.28	341 343	5 075 009	TM-PG-20-0.58	334 388	5 067 673
TM-PG-01-0.35	342 542	5 073 536	TM-PG-21-0.58	337 541	5 067 636			

ID Échantillan <sup>1</sup>	Turna da dánât	Coefficient	Distr	ibutior	n des gra	ains (%)	Toyturo finala du dánât
ID-Echantinon	i ype de depot	d'uniformité (C <sub>u</sub> )	Argile	Silt	Sable	Graviers	Texture iniale du depot
DF-PO-01-3.96/4.57	Alluvions	14.5	0.0	0.4	62.5	37.1	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
DF-PO-01-6.71/9.14	Alluvions	2.1	0.0	0.4	92.8	6.9	Sable fin non graveleux (< 15 % du volume)
DF-PO-02-3.05/4.57	Alluvions	6.9	0.0	0.3	79.5	20.2	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)
DF-PO-02-8.23/9.14	Alluvions	4.0	0.0	0.5	89.0	10.4	Sable grossier non graveleux (< 15 % du volume)
DF-PO-06-2.74/3.66	Contact glaciaire	4.8	0.3	2.8	82.8	14.1	Sable grossier non graveleux (< 15 % du volume)
DF-PO-06-6.10/9.14	Contact glaciaire	1.1	1.4	14.0	83.8	0.8	Sable fin limoneux non graveleux (< 15 % du volume)
DF-PO-06-12.50/13.72	Contact glaciaire	5.1	0.0	0.1	86.4	13.5	Sable grossier non graveleux (< 15 % du volume)
CF-PO-07-2.22	Contact glaciaire	14.2	0.8	12.4	74.5	12.4	Sable moyen non graveleux (< 15 % du volume)
CF-PO-07-2.35	Contact glaciaire	5.5	0.3	4.1	79.2	16.4	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)
CF-PO-09-4.88	Contact glaciaire	6.3	0.1	6.0	76.5	23.5	Sable grossier limoneux graveleux (15 à 35 % du volume)
CF-PO-09-10.06	Contact glaciaire	2.0	0.8	8.9	77.9	12.4	Sable grossier non graveleux (< 15 % du volume)
CF-PO-09-11.58/11.89	Contact glaciaire	15.3	0.2	3.2	57.4	39.2	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)
CF-PO-10-3.05	Till de Boss Point	2.9	0.3	5.3	91.3	3.1	Sable grossier non graveleux (< 15 % du volume)

Tableau II.15 – Résultats des analyses granulométriques sur les échantillons prélevés lors des travaux de forage.

<sup>1</sup>DF : déblais de forage ; CF : Cuillère fendue

ID Échantillan <sup>1</sup>	Turne de dénât	Coefficient	Dist	ributio	n des gra	ains (%)	Taxtura finala du dánôt	
ID-Echantinon <sup>®</sup>	i ype de depot	d'uniformité (C <sub>u</sub> )	Argile	Silt	Sable	Graviers	l'exture inale du depot	
PM-PR-22-0-1	Alluvions	2.9	0.0	0.4	41.6	57.9	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	
PM-PR-13-0-1	Fluvio-glaciaires	14.6	0.1	0.8	63.4	35.8	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	
PM-PR-23-0-2	Contact glaciaire	6.2	0.0	0.2	46.7	53.1	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	
TM-PG-03-0.55	Till de Boss Point	15.8	0.1	1.6	57.5	40.8	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	
TM-PG-04-0.27	Till de Boss Point	15.7	0.1	2.9	59.2	37.8	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	
TM-PG-06-0.37	Till de Boss Point	14.3	0.1	2.5	64.7	32.7	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)	
TM-PG-07-0.60	Till de Boss Point	14.7	0.1	2.5	63.3	34.0	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)	
TM-PG-01-0.35	Till de Broad River	13.4	0.1	4.0	67.8	28.1	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)	
TM-PG-17-0.59	Till de Broad River	14.9	0.1	4.0	61.2	34.7	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)	
TM-PG-18-0.50	Till de Broad River	9.9	0.0	1.7	52.6	45.6	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	
TM-PG-10-0.45	Till de Brown's Flat	13.3	0.2	5.3	67.0	27.5	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)	
TM-PG-11-0.50	Till de Brown's Flat	14.5	0.1	2.1	63.2	34.6	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)	
TM-PG-12-0.80	Till de Brown's Flat	13.6	0.1	2.9	67.1	29.9	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)	

Tableau II.16 – Résultats des analyses granulométriques sur les échantillons prélevés lors des campagnes de terrain (1/2).

<sup>1</sup>PM : prélèvement manuel ; TM : tarière manuelle

ID Échantillan <sup>1</sup>	Tupo do dánôt	Coefficient	Distr	ibutio	n des gr	ains (%)	Toxturo finalo du dónôt	
ID-ECHANTINON	Type de dépôt	d'uniformité (C <sub>u</sub> )	Argile	Silt	Sable	Graviers	l'exture infale du depor	
TM-PG-02-0.25	Till de Hillside	15.0	0.1	3.4	60.9	35.6	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	
TM-PG-16-0.28	Till de Hillside	10.8	0.0	1.7	49.7	48.6	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	
TM-PG-21-0.58	Till de Hillside	16.1	0.1	3.5	56.3	40.2	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	
TM-PG-08-0.60	Till de Horton/Cumberland	1.9	0.1	3.4	53.0	43.5	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)	
TM-PG-09-0.37	Till de Horton/Cumberland	3.5	0.4	8.8	82.4	8.4	Sable fin non graveleux (< 15 % du volume)	
TM-PG-14-0.62	Till de Horton/Cumberland	10.5	0.1	2.0	51.1	46.8	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	
TM-PG-05-0.35	Till de Waterford	11.8	0.2	5.3	70.7	23.8	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)	
TM-PG-15-0.40	Till de Waterford	15.4	0.1	1.9	59.7	38.3	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	
TM-PG-19-0.65	Till de Waterford	15.2	0.2	3.6	58.4	37.8	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	
TM-PG-20-0.58	Till de Waterford	14.3	0.1	2.2	62.3	35.4	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	

Tableau II.17 – Résultats des analyses granulométriques sur les échantillons prélevés lors des campagnes de terrain (2/2).

<sup>1</sup>PM : prélèvement manuel ; TM : tarière manuelle

Tableau II.18 – Définition des hydrofaciès pour les dépôts meubles selon la littérature existante : description issue de Pronk *et al.* (2005a), Rampton *et al.* (1984) et Seaman (1988).

Dánật		Source		
Depot	Pronk <i>et al.</i> (2005a)	Rampton <i>et al.</i> (1984)	Seaman (1988)	- HF
Colluvions	Substratum érodé et fracturé ou dépôt glaciaire retravaillé Parfois substratum affleurant (terrain nu)	Till ou substratum érodé ou lessivé vers le bas des pentes		4
Contact glaciaire	Sable et gravier à blocs Potentiellement présence de silt, d'argile et de till	Sable et gravier avec teneur variable en argile et silt Présence de blocs	Dépôt stratifié de sables et graviers Teneur variable en fines, pierres et blocs	5
Fluvio-glaciaires	Gravier et gravier sableux	Teneur faible en éléments fins	Stratification horizontale de sables et graviers	5
Till d'ablation	Dépôt grossier de graviers et sables	Matériel non classé allant des argiles aux blocs	Granulométrie variant des argiles aux blocs	5
Alluvions	Sable et silt avec peu d'argile	Gravier, pierre et bloc à l'amont A l'aval, matériel plus sableux et silteux	Terrasses anciennes : stratification horizontale de sables et graviers Peut contenir une teneur significative en particules fines	5
Tills	Matrice avec teneurs variées en sable, silt et argile Teneur importante en matériel grossier (graviers, pierres et blocs mineurs)	-	Dépôt variant des sables aux graviers jusqu'aux pierres et blocs	4

<sup>1</sup>HF : hydrofaciès

Tille	Source	UE				
1115	Pronk <i>et al.</i> (2005a)					
Albert	Argile : 10-30 % ; Sable : 25-50 % (plus de 75 % dans plusieurs zones)	4				
Boss Point	Argile : 5-20 % ; Sable : 50-85 %	4				
Broad River	Argile : 0-15 % ; Sable : 45-75 %	4				
Brown's Flat	Argile : 5-20 % ; Sable : 40-50 %	4				
Coldbrook	Argile : 0-15 % ; Sable : 45-75 %	4				
Cumberland	Argile : 20-50 % (plus de 60 % dans plusieurs zones) ; Sable : 20-50 %	4				
Cumberland/Boss Point	Argile : 5-25 % ; Sable : 40-60 %	4				
East Scotch Settlement	Argile : 5-20 % ; Sable : 40-60 %	4				
Hammondvale	Argile : 15-25 % ; Sable : 45-50 %	4				
Hillside	Argile : 10-20 % ; Sable : 45-85 %	4				
Hopewell	Argile : 10-30 % ; Sable : 30-70 %	4				
Horton/Cumberland	Argile : 15-40 % ; Sable : 25-60 %	4				
Jordan Mountain	Argile : 5-15 % ; Sable : 50-65 %	4				
Millstream	Argile : 5-20 % ; Sable : 40-70 %	4				
Point Wolf	Argile : 0-10 % ; Sable : 45-75 %	4				
Salisbury	Argile : 15-25 % ; Sable : 40-70 %	4				
Sally Brook	Argile : 5-20 % ; Sable : 40-75 %	4				
Urney	Argile : 5-15 % ; Sable : 40-70 %	4				
Waterford	Argile : 5-20 % ; Sable : 40-70 %	4				
Marron à jaunâtre	Argile : 5-10 % ; Sable : 60-70 %	4				

Tableau II.19 – Définition des hydrofaciès pour les tills selon la littérature existante : description issue de Pronk et al. (2005a).

<sup>1</sup>HF : hydrofaciès

Dépôt	Description lithologique	HF	Granulométrie	HF
Contact glaciaire	Dépôts sableux caillouteux	5	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	4
Fluvio-glaciaires	Dépôts sableux caillouteux	5	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	4
Alluvions	Dépôts sableux à forte proportion en éléments grossiers	5	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	4
	Dépôts sablo-limoneux à passage argileux à la base et graviers épars	3	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	4
Till do Roop Doint	Dépôts sableux à argileux graveleux	4	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	4
	Dépôts limoneux à argilo-limoneux avec quelques graviers épars	3	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)	4
	Dépôts siltosableux graveleux	4	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)	4
T'll de Des ed D'esse	Dépôts fins limono-sableux à argileux avec présence d'éléments grossiers	3	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)	4
I III de Broad River	Dépôts limoneux graveleux	4	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)	4
	Dépôts limoneux à passages argileux graveleux	3	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	4
	Dépôts limoneux très graveleux	4	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)	4
Till de Brown's Flat	Dépôts siltolimoneux très graveleux	4	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)	4
	Dépôts limono-silteux graveleux	4	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)	4
	Dépôts limono-silteux avec passages graveleux	4	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	4
Till de Hillside	Dépôts limoneux très graveleux	4	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	4
	Dépôts limoneux très graveleux	4	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	4
Till de Unders (Onerske ders d	Dépôts siltolimoneux à sableux avec beaucoup d'éléments grossiers	4	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)	4
Till de Horton/Cumberland	Dépôts limoneux peu graveleux	3	Sable fin non graveleux (< 15 % du volume)	3
	Dépôts limoneux à passages argileux graveleux	3	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	4
	Dépôts limoneux graveleux	4	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	4
Till de Waterford	Dépôts siltolimoneux à argileux graveleux	3	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	4
	Dépôts argilo-limoneux à graviers épars	3	Sable grossier graveleux (15 à 35 % du volume)	4
	Dépôts limono-argileux graveleux	3	Sable grossier très graveleux (> 35 à 60 % du volume)	4

Tableau II.20 – Définition des hydrofaciès selon la description visuelle des dépôts et les résultats des analyses granulométriques.

<sup>1</sup>HF : hydrofaciès

## ANNEXE III - INTERPOLATION DE L'ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS

L'annexe III apporte des informations additionnelles relatives à l'interpolation de l'épaisseur des dépôts meubles (Section 5.2.4) et à la phase d'optimisation de cette procédure d'interpolation (Section 5.2.5).

Les caractéristiques de la grille d'interpolation et les données d'entrée utilisées pour le krigeage ordinaire (KO) sont présentées dans le tableau III.1. La procédure d'interpolation des données d'épaisseur disponibles (Section 5.2.4) incluait donc l'analyse du semi-variogramme omnidirectionnel (Figure III.1) dont les caractéristiques sont indiquées dans le tableau III.2.

Finalement, le processus de validation croisée a été appliqué dans le but d'optimiser les paramètres d'interpolation par krigeage ordinaire (Section 5.2.5) en comparant les valeurs d'épaisseur de dépôts meubles estimées avec les valeurs mesurées sur un échantillon aléatoire de puits localisés sur le territoire (Figure III.2).

Paramètres	Données	s d'entrée	Deremètree	Grille d'interpolation		
	Х	Y	Parametres	Х	Y	
Minimum (m)	283 645	5 049 536	Minimum (m)	283 645	5 049 536	
Maximum (m)	344 868	5 096 469	Nombre de mailles	875	671	
Densité (pt/km <sup>2</sup> )	0.37		Dimension des mailles (m)	70		
Surface (km <sup>2</sup> )	2 873		Surface (km <sup>2</sup> )	2 874		

Tableau III.1 – Distribution spatiale des données d'entrée et paramètres de la grille d'interpolation pour le krigeage ordinaire (KO).

Tableau III.2 – Paramètres du semi-variogramme et de l'ellipsoïde de recherche pour le krigeage ordinaire (KO).

Paramètres Semi-variogramme omnidirectionnel		Paramètres	Ellipsoïde de recherche
Modèle analytique	Sphérique	Nombre minimum de voisins	2
Effet pépite (m <sup>2</sup> )	0	Nombre maximum de voisins	25
Seuil (m <sup>2</sup> )	15	Rayon de recherche mineur (m)	9 000
Portée maximale (m)	1 500	Rayon de recherche majeur (m)	9 000



Figure III.1 – Semi-variogramme omnidirectionnel avec le modèle sphérique ajusté pour le krigeage ordinaire (KO).



Figure III.2 – Résultats de la validation croisée après krigeage ordinaire (KO) sur l'épaisseur des dépôts meubles.

## ANNEXE IV - ESSAIS DE POROSITÉ ET DE PERMÉABILITÉ

L'annexe IV concerne les résultats des essais de routine (porosité, perméabilité et densité) effectués en laboratoire sur des sections de carottes de forages de la CGC (Section 5.3.3) dont les résultats ont été utilisés dans le modèle numérique 2D (Section 6.3.3).

Ces essais de porosité et de perméabilité ont été effectués en deux phases (Tableaux IV.1 et IV.2) sur des sections de roches prélevées sur les cinq forages carottés de la région d'étude, en l'occurrence PO-07, PO-08, PO-09, PO-10 et PO-11 (Section 5.3.3) ; les autres puits d'observation de la CGC ayant été réalisés avec une méthode de forage destructive.

À partir des valeurs de perméabilité obtenues sur les sections de carottes non fracturées, la conductivité hydraulique du roc superficiel a été calculée (Tableaux IV.1 et IV.2). Les fractures jouant un rôle essentiel dans les écoulements au sein du roc superficiel, les valeurs de conductivité hydraulique déduites de ces essais sous-estiment largement les valeurs obtenues lors des essais de perméabilité réalisés en conditions naturelles.

De même, les valeurs brutes de porosité de la matrice obtenues lors de ces essais ont été intégrées dans les paramètres d'entrée du modèle d'écoulement bidimensionnel utilisé par la suite pour simuler l'âge moyen des eaux souterraines (Section 6.3.3). Cette valeur de porosité moyenne attribuée aux grès du groupe de Mabou semble quelque peu sous-estimer la porosité efficace du roc superficiel, reliée au réseau de fractures ouvertes et interconnectées.
		Profondour	Porositó -	De	nsité	Perméabilité	Conductivité
Puits	Échantillon	Protondeur	Porosile	Solide	Globale	à l'air <sup>1</sup>	hydraulique
		m	%	kg/m³	kg/m³	mD	m/s
PO-07	PO-07-13	13	4.01	2700	2590	1.47E-02	9.59E-11
	PO-07-41	41	5.86	2710	2550	7.45E-03	4.87E-11
	PO-07-42	42	3.67	2700	2600	7.16E-03	4.68E-11
	PO-08-07	7	11.39	2660	2360	7.11E-02	4.64E-10
PU-06	PO-08-36	36	6.63	2710	2520	2.02E-02	1.32E-10
	PO-09-23	23	5.98	2670	2510	1.32E-01	8.60E-10
	PO-09-37	37	7.35	2680	2490	1.56E-02	1.02E-10
FO-09	PO-09-60	60	4.41	2690	2580	1.02E-02	6.69E-11
	PO-09-61	61	3.89	2700	2590	1.05E-02	6.87E-11
DO 10	PO-10-30	30	7.29	2730	2530	RAS	RAS
PO-10	PO-10-44	44	7.55	2690	2490	9.63E-03	6.30E-11

Tableau IV.1 – Résultats des essais de routine réalisés sur les carottes de forages en juin 2017.

Tableau IV.2 – Résultats des essais de routine réalisés sur les carottes de forages en février 2018.

		Brofondour	Dorocitó	De	nsité	Perméabilité	Conductivité
Puits	Échantillon	Protonueur	Forosite	Solide	Globale	à l'air <sup>1</sup>	hydraulique
		m	%	kg/m³	kg/m³	mD	m/s
	PO-07-14	14	8.20	2720	2490	9.56E-03	6.25E-11
PO-07	PO-07-16	16	4.55	2710	2590	1.70E-02	1.11E-10
	PO-07-24	24	4.30	2710	2590	6.30E-03	4.12E-11
	PO-07-27	27	4.95	2710	2580	5.77E-02	3.77E-10
	PO-07-44	44	8.84	2720	2470	2.53E-02	1.65E-10
	PO-07-45	45	4.11	2730	2600	6.56E-03	4.29E-11
	PO-09-19	19	7.48	2690	2490	5.96E-02	3.89E-10
	PO-09-43	43	7.30	2730	2530	8.00E-03	5.23E-11
PO-09	PO-09-55	55	4.30	2650	2540	2.42E-02	1.58E-10
	PO-09-56	56	2.97	2660	2580	1.00E-02	6.54E-11
	PO-09-68	68	8.09	2680	2460	1.00E-02	6.53E-11
	PO-11-27	27	7.11	2780	2580	4.93E-02	3.22E-10
	PO-11-58	58	7.20	2770	2560	5.38E-03	3.52E-11
PO-11	PO-11-73	73	9.46	2780	2520	5.51E-03	3.60E-11
	PO-11-108	108	8.15	2760	2530	5.64E-03	3.69E-11
	PO-11-125	125	5.39	2740	2600	1.51E-01	9.85E-10
	PO-11-131	131	5.04	2740	2610	1.92E-02	1.26E-10

1 : les unités des valeurs de perméabilité à l'air obtenues du laboratoire sont en milliDarcy (mD).

## ANNEXE V - INTERPOLATION DE LA PIÉZOMÉTRIE

L'annexe V présente, dans le détail, les résultats des trois méthodes d'interpolation appliquées (Section 5.5.5) puis comparées pour finalement déterminer la procédure d'interpolation la plus fiable pour établir la carte piézométrique finale (Section 5.5.4).

Dans le but d'obtenir une carte piézométrique reproduisant le plus fidèlement possible les niveaux de nappe mesurés dans les puits de la région d'étude, trois méthodes d'interpolation ont été utilisées (Section 5.5.5). En premier lieu, un krigeage ordinaire (KO<sub>po</sub>) a été appliqué en utilisant uniquement les données ponctuelles de niveau de nappe (Tableaux V.1 et V.2, Figure V.1). Dans un second temps, un krigeage ordinaire (KO<sub>popips</sub>) utilisant les données de niveau de nappe complétées par des valeurs d'élévation du lit des rivières et quelques points de forçage a été employé (Tableaux V.3 et V.4, Figure V.3). En dernier lieu, un krigeage avec dérive externe (KDE<sub>popips</sub>) basé sur la topographie a été utilisé pour reproduire spatialement la surface piézométrique (Tableaux V.5 et V.6, Figure V.5).

Quel que soit le cas de figure, les résultats de la validation croisée suggèrent une bonne estimation des niveaux de nappe (Figures V.2, V.4 et V.6). Toutefois, lorsque l'allure de surface de la nappe estimée par les diverses approches est comparée (Figure V.7 à V.9), le krigeage avec dérive externe (KDE<sub>popips</sub>) s'avère être la méthode reproduisant le plus fidèlement la surface piézométrique (Section 5.5.4).

Devensèture	Données d'entrée		Devenètres	Grille d'interpolation		
Parametres	Х	Y	Parametres	Х	Y	
Minimum (m)	283 645	5 047 477	Minimum (m)	283 596	5 047 477	
Maximum (m)	352 686	5 104 960	Nombre de mailles	987	822	
Densité (pt/km <sup>2</sup> )	0.35		Dimension des mailles (m)	70		
Surface (km <sup>2</sup> )	3 969		Surface (km <sup>2</sup> )	3 967		

Tableau V.1 – Distribution spatiale des données d'entrée et paramètres de la grille d'interpolation pour le krigeage ordinaire (KO<sub>po</sub>).

Tableau V.2 – Paramètres du semi-variogramme et de l'ellipsoïde de recherche pour le krigeage ordinaire (KO<sub>po</sub>).

Paramètres	Semi-variogramme omnidirectionnel	Paramètres	Ellipsoïde de recherche
Modèle analytique	Sphérique	Nombre minimum de voisins	10
Effet pépite (m <sup>2</sup> )	0	Nombre maximum de voisins	100
Seuil (m <sup>2</sup> )	4 800	Rayon de recherche mineur (m)	35 500
Portée maximale (m)	35 500	Rayon de recherche majeur (m)	35 500



Figure V.1 – Semi-variogramme omnidirectionnel avec le modèle sphérique ajusté pour le krigeage ordinaire (KO<sub>po</sub>).



Figure V.2 – Résultats de la validation croisée après krigeage ordinaire (KO<sub>po</sub>) sur la piézométrie.

Daramàtraa	Données d'entrée		Deremètree	Grille d'interpolation		
Parametres	X	Y	Parametres	Х	Y	
Minimum (m)	283 604	5 047 477	Minimum (m)	283 596	5 047 477	
Maximum (m)	352 686	5 104 960	Nombre de mailles	987	822	
Densité (pt/km <sup>2</sup> )	0.65		Dimension des mailles (m)	70		
Surface (km <sup>2</sup> )	3 971		Surface (km <sup>2</sup> )	3 967		

Tableau V.3 – Distribution spatiale des données d'entrée et paramètres de la grille d'interpolation pour le krigeage ordinaire (KO<sub>popips</sub>).

Tableau V.4 – Paramètres du semi-variogramme et de l'ellipsoïde de recherche pour le krigeage ordinaire (KO<sub>popips</sub>).

Paramètres	Semi-variogramme omnidirectionnel	Paramètres	Ellipsoïde de recherche
Modèle analytique	Sphérique	Nombre minimum de voisins	10
Effet pépite (m <sup>2</sup> )	0	Nombre maximum de voisins	100
Seuil (m <sup>2</sup> )	5 600	Rayon de recherche mineur (m)	30 000
Portée maximale (m)	30 000	Rayon de recherche majeur (m)	30 000



Figure V.3 – Semi-variogramme omnidirectionnel avec le modèle sphérique ajusté pour le krigeage ordinaire (KO<sub>popips</sub>).



Figure V.4 – Résultats de la validation croisée après krigeage ordinaire (KO<sub>popips</sub>) sur la piézométrie.

Tableau V.5 – Distribution spatiale des données d'entrée et paramètres de la grille d'interpolation pour le krigeage avec dérive externe (KDE<sub>popips</sub>).

Paramètros	Données d'entrée		Doromòtroo	Paramàtros		Grille d'interpolation		
Parametres	Х	Y	Farametres			Y		
Minimum (m)	283 604	5 047 477	Minimum (m)		283 596	5 047 477		
Maximum (m)	352 686	5 104 960	Nombre de mailles		987	822		
Densité (pt/km <sup>2</sup> )	0.65		Dimension des mai	illes (m)	70			
Surface (km <sup>2</sup> )	3 971		Surface (km <sup>2</sup> )		3 967			

Tableau V.6 – Paramètres du semi-variogramme et de l'ellipsoïde de recherche pour le krigeage avec dérive externe (KDE<sub>popips</sub>).

Paramètres	Semi-variogramme omnidirectionnel	Paramètres	Ellipsoïde de recherche
Modèle analytique	Sphérique	Nombre minimum de voisins	10
Effet pépite (m <sup>2</sup> )	0	Nombre maximum de voisins	100
Seuil (m <sup>2</sup> )	5 600	Rayon de recherche mineur (m)	30 000
Portée maximale (m)	30 000	Rayon de recherche majeur (m)	30 000



Figure V.5 – Semi-variogramme omnidirectionnel avec le modèle sphérique ajusté pour le krigeage avec dérive externe (KDE<sub>popips</sub>).



Figure V.6 – Résultats de la validation croisée après krigeage avec dérive externe (KDE<sub>popips</sub>) sur la piézométrie.



Figure V.7 – Coupe AA' de la surface piézométrique interpolée avec le krigeage ordinaire (KOpo) : exagération verticale x25.



Figure V.8 – Coupe AA' de la surface piézométrique interpolée avec le krigeage ordinaire (KOpopips) : exagération verticale x25.



Figure V.9 – Coupe AA' de la surface piézométrique interpolée avec le krigeage avec dérive externe (KDEpopips) : exagération verticale x25.

## ANNEXE VI - ESTIMATION DU DÉBIT DE BASE

L'annexe VI fait essentiellement référence à la section 5.6.3 du mémoire qui traite des différentes méthodes de séparation des hydrogrammes de rivières.

Toutes les approches utilisées dans la section 5.6.3 avaient pour objectif d'estimer le débit de base de la rivière Kennebecasis, unique cours d'eau disposant d'une station hydrométrique mesurant le débit de la rivière en continu.

Les premières techniques mises en œuvre étaient les filtres permettant de séparer la composante haute fréquence du débit total de la rivière, assimilée au ruissellement de surface, de la composante basse fréquence, incluant les apports de l'aquifère et le ruissellement hypodermique. Les composantes du bilan hydrique estimées entre 1980 et 2016 à l'aide du filtre de Chapman ou grâce au filtre de Furey et Gupta sont présentées sur les figures VI.1 et VI.2. Le débit de base moyen annuel a alors été déterminé pour chacun des filtres, puis comparé au débit total de la rivière Kennebecasis à la station hydrométrique d'Apohaqui (Figures VI.3 et VI.4).

En plus des filtres basse fréquence précédents, des approches graphiques ont également été employées afin de calculer le débit de base de la rivière Kennebecasis entre 1980 et 2016. Le bilan hydrique et ses composantes ont été estimés pour chaque méthode : le modèle PART (Figure VI.5), les trois techniques de l'approche HYSEP (Figures VI.6 à VI.8) et enfin les deux techniques de la méthode BFI (Figures VI.9 et VI.10). Les figures VI.11 et VI.12 représentent les estimations du débit de base annuel moyen pour les six approches utilisées et comparées au débit total de la rivière.

Les diverses approches mises en œuvre ont ainsi permis de définir le débit de base de la rivière Kennebecasis sur une base annuelle entre 1980 et 2016, alors mis en parallèle au débit total annuel du cours d'eau (Tableaux VI.1 et VI.2). Le débit de base moyen calculé sur les 37 années de données disponibles selon ces huit méthodes est également présenté dans le tableau VI.2.



Figure VI.1 – Bilan hydrique estimé à l'aide du filtre de Chapman entre 1980 et 2016.



Figure VI.2 – Bilan hydrique estimé à l'aide du filtre de Furey et Gupta entre 1980 et 2016.



Figure VI.3 – Estimation du débit de base selon les filtres entre 1980 et 1999.



Figure VI.4 – Estimation du débit de base selon les filtres entre 2000 et 2016.



Figure VI.5 – Bilan hydrique estimé à l'aide du modèle PART entre 1980 et 2016.



Figure VI.6 – Bilan hydrique estimé à l'aide du modèle HYSEP-Intervalle Fixe entre 1980 et 2016.



Figure VI.7 – Bilan hydrique estimé à l'aide du modèle HYSEP-Minimum Local entre 1980 et 2016.



Figure VI.8 – Bilan hydrique estimé à l'aide du modèle HYSEP-Intervalle Glissant entre 1980 et 2016.



Figure VI.9 – Bilan hydrique estimé à l'aide du modèle BFI-Standard entre 1980 et 2016.



Figure VI.10 – Bilan hydrique estimé à l'aide du modèle BFI-Modifié entre 1980 et 2016.



Figure VI.11 – Estimation du débit de base selon les modèles entre 1980 et 1999.



Figure VI.12 – Estimation du débit de base selon les modèles entre 2000 et 2016.

	Débit de		Débit de base (mm/an)						
Année	la rivière	DART	HYSEP	HYSEP	HYSEP	BFI	BFI	Filtre de	Filtre de
	(mm/an)		Intervalle Fixe	Minimum Local	Intervalle Glissant	Standard	Modifié	Chapman	Furey et Gupta
1980	694	484	437	415	446	400	399	350	366
1981	1 152	743	709	583	710	498	498	571	589
1982	704	507	471	432	472	422	358	353	382
1983	727	502	467	419	461	385	378	363	372
1984	814	552	460	433	481	359	359	408	446
1985	470	324	309	284	301	237	250	236	250
1986	600	432	390	317	382	254	253	299	309
1987	493	359	334	254	325	199	200	247	259
1988	626	480	438	393	440	367	360	313	327
1989	478	298	285	278	282	219	212	237	256
1990	979	631	564	501	578	458	457	464	454
1991	796	553	488	446	492	404	394	413	470
1992	602	405	345	309	361	280	279	298	307
1993	773	526	506	462	489	386	382	382	388
1994	758	530	458	426	481	340	338	388	430
1995	651	467	405	362	412	351	350	324	335
1996	829	556	532	503	522	388	389	403	409
1997	537	427	395	382	398	355	369	280	314
1998	775	494	433	357	444	349	344	378	392
1999	788	502	487	440	474	348	346	391	413

Tableau VI.1 – Estimation du débit de base de la rivière entre 1980 et 2016 (1/2).

	Débit de				Débit de base (m	m/an)			
Année	la rivière (mm/an)	PART	HYSEP Intervalle Fixe	HYSEP Minimum Local	HYSEP Intervalle Glissant	BFI Standard	BFI Modifié	Filtre de Chapman	Filtre de Furey et Gupta
2000	682	486	437	411	437	326	313	338	351
2001	452	318	288	285	301	192	193	230	255
2002	794	525	504	484	488	343	331	390	392
2003	779	466	479	412	472	391	389	380	399
2004	613	418	395	346	389	296	296	312	330
2005	956	653	570	519	571	421	411	475	500
2006	696	464	434	391	433	288	298	353	374
2007	532	372	350	274	337	245	242	268	287
2008	898	584	542	425	522	423	422	436	438
2009	947	638	555	474	578	453	459	480	520
2010	891	587	510	455	534	401	416	438	441
2011	988	670	638	619	649	478	479	498	530
2012	646	436	380	351	380	295	295	325	348
2013	753	478	434	422	433	335	333	377	395
2014	1 197	721	644	639	660	543	542	580	584
2015	910	637	587	553	584	542	495	459	505
2016	565	406	366	340	362	305	303	289	318
Total	745	504	460	416	462	359	355	371	390

Tableau VI.2 – Estimation du débit de base de la rivière entre 1980 et 2016 (1/2).

## ANNEXE VII - ÉVALUATION DE LA RECHARGE AVEC HELP

L'annexe VII détaille les travaux entrepris pour estimer la recharge distribuée spatialement avec le modèle d'infiltration *HELP* (Section 5.6.4) dont les résultats ont été utilisés, dans une moindre mesure, pour déterminer le taux de recharge au droit des puits d'observation de la CGC avec le modèle *GWHAT* (Section 5.6.5).

Afin d'utiliser convenablement le modèle *HELP*, il a été nécessaire de diviser les bassins versants étudiés en mailles de de 250 x 250 m (Section 5.6.4). En se basant sur les données géologiques et pédologiques, des séquences stratigraphiques représentatives de la région d'étude (Tableau VII.1) intégrant également les horizons de sol (Tableau VII.2) ont été attribuées à chaque maille. Les propriétés hydrauliques des dépôts meubles et du roc (Tableau VII.20) ont alors pu être associées à chaque couche. Il s'agit de la porosité (n), de la capacité au champ ( $\theta_{FC}$ ), du point de flétrissement ( $\theta_{WP}$ ) et de la conductivité hydraulique saturée (K<sub>s</sub>) (Tableaux VII.20 et VII.21).

Pour le roc et les tills, la conductivité hydraulique provient de la valeur médiane définie suite aux essais de perméabilité tandis que la valeur de porosité du roc est celle issue des essais de porosité effectués sur les carottes de forages. Pour le reste des unités, les propriétés hydrauliques ont été extraites de la littérature (Domenico et Schwartz, 1990, Rivard *et al.*, 2014, Schroeder *et al.*, 1994). Quant aux caractéristiques hydrauliques des horizons de sol, des valeurs typiques issues de Schroeder *et al.* (1994) ont été attribuées, dans un premier temps, selon la texture du sol. Ensuite, les conductivités hydrauliques de ces horizons de sol ont été ajustées lors de la procédure de calage en définissant une conductivité hydraulique équivalente proche de la valeur théorique (Tableau VII.21).

Les données climatiques quotidiennes utilisées par le modèle d'infiltration *HELP* entre 1980 et 2016 comprenaient les précipitations, les températures moyennes et le rayonnement solaire. Ce dernier a tout d'abord été estimé à Moncton à partir de divers outils (Figure VII.1) qui ont ensuite été comparés (Figure VII.2 à VII.5) dans le but de confirmer que les données de rayonnement solaire synthétiques générées par *HELP* entre 1980 et 2016 étaient réalistes (Figure VII.6 à VII.8).

Trois autres paramètres extraits des normales climatiques calculées à la station de Moncton entre 1981 et 2010 (Gouvernement du Canada, 2018) ont également été attribués aux mailles des deux bassins versants. Il s'agit de la vitesse horaire moyenne du vent (Tableau VII.4), de l'humidité relative moyenne (Tableau VII.5) et de la période sans gel (Tableau VII.6).

Le modèle *HELP* considère aussi le coefficient de ruissellement déduit de la combinaison de trois caractéristiques : les pentes, le type d'utilisation du sol et les groupes hydrologiques (Section 5.6.4). Les statistiques relatives à la distribution des pentes sur les deux bassins versants sont indiquées dans le tableau VII.6 et sur la figure VII.9. La GéoBase (2009) fournit les informations concernant la couverture du sol qui ont ensuite été rassemblées en quatre catégories d'utilisation du sol (Tableau VII.7) et dont la distribution sur la région d'étude est détaillée dans le tableau VII.8 et sur la figure VII.10. De la même façon, les unités pédologiques (Provincial Department of Agriculture, 1948a, Provincial Department of Agriculture, 1948b, Provincial Department of Agriculture, 1949) ont été regroupées en quatre groupes hydrologiques selon la texture des sols (Tableau VII.9). Le tableau VII.10 et la figure VII.11 fournissent les statistiques élémentaires des groupes hydrologiques sur la région d'étude. Ces trois paramètres ont ensuite permis de définir le numéro de courbe sur chaque maille du territoire d'étude (Tableau VII.11 et Figure VII.12). Le processus de drainage intégré dans *HELP* considère également la pente (Tableau VII.12). Le Figure VII.13) et la distance au drain (Tableau VII.13 et Figure VII.14) qui ont été déterminées respectivement à partir du MNT et selon le type d'utilisation du sol sur le territoire (Section 5.6.4).

Dans le modèle d'infiltration *HELP*, l'évapotranspiration est essentiellement contrôlée par deux caractéristiques : la densité du couvert végétal et la profondeur d'évapotranspiration (Section 5.6.4). Le couvert végétal est défini par l'indice de surface foliaire (LAI) à partir de la couverture du sol (Tableau VII.14 et Figure VII.15). À chaque type de couverture du sol a été attribué un LAI typique basé sur la littérature (Asner *et al.*, 2003, Breuer *et al.*, 2003, Croteau, 2006, Schroeder *et al.*, 1994) dont la valeur minimale a été retenue après calage (Tableaux VII.15 et VII.16, Figure VII.16). Quant à la profondeur d'évapotranspiration, elle a été déterminée à partir de la distribution des cultures sur la région d'étude (Tableau VII.17 et Figure VII.17). À chaque culture a été associée une profondeur racinaire typique selon des informations extraites de la littérature (Allen *et al.*, 1998, Canadell *et al.*, 1996, Croteau, 2006, Jackson *et al.*, 1996, Mekonnen *et al.*, 1997, Rushton, 2003, Schroeder *et al.*, 1994). La valeur minimale de profondeur des racines a finalement été retenue après calage (Tableaux VII.18). Ce paramètre a étgalement utilisé comme valeur de calage dans le modèle *GWHAT* (Section 5.6.5).

En amont de la procédure de calage, une analyse de sensibilité de l'ensemble des paramètres considérés dans le modèle d'infiltration *HELP* a également été effectuée (Figures VII.19 à VII.36), dont l'analyse est détaillée dans la section 5.6.4.

Combinaison	Colonno stratigraphiqua	Succession	Surface (%)			
Compinalson	Colonne stratigraphique	de couches <sup>2</sup>	Kennebecasis	Pollett	Total	
1	Sol <sup>1</sup> , Alluvions, Till basal, Roc	1, 2, 3, 1, 1, 1	0.65	0.05	0.51	
2	Sol <sup>1</sup> , Alluvions, Till basal	1, 2, 3, 1, 1	1.25	0.23	1.02	
3	Sol <sup>1</sup> , Colluvions, Till basal, Roc	1, 2, 3, 1, 1, 1	0.52	0.03	0.41	
4	Sol <sup>1</sup> , Colluvions, Till basal	1, 2, 3, 1, 1	0.03	0.03	0.03	
5	Sol <sup>1</sup> , Contact glaciaire, Till basal, Roc	1, 2, 3, 1, 1, 1	1.36	0.14	1.08	
6	Sol <sup>1</sup> , Contact glaciaire, Till basal	1, 2, 3, 1, 1	1.78	0.30	1.44	
7	Sol <sup>1</sup> , Fluvio-glaciaires, Till basal, Roc	1, 2, 3, 1, 1, 1	1.10	0.14	0.88	
8	Sol <sup>1</sup> , Fluvio-glaciaires, Till basal	1, 2, 3, 1, 1	1.89	0.72	1.63	
9	Roc	1	7.19	4.37	6.55	
10	Sol <sup>1</sup> , Till, (Till basal), Roc	1, 2, 3, 1, 1, 1	62.97	72.15	65.05	
11	Sol <sup>1</sup> , Till, (Till basal)	1, 2, 3, 1, 1	20.93	21.75	21.11	
12	Sol <sup>1</sup> , Till d'ablation, Till basal, Roc	1, 2, 3, 1, 1, 1	0.14	0.05	0.12	
13	Sol <sup>1</sup> , Till d'ablation, Till basal	1, 2, 3, 1, 1	0.21	0.03	0.17	

Tableau VII.1 – Séquences stratigraphiques rencontrées sur le territoire et intégrées dans HELP.

<sup>1</sup>Comprend les horizons A, B et C détaillés dans le Tableau VII.2.

<sup>2</sup>Types de couche dans HELP.

Tableau VII.2 – Unités	pédologiques	rencontrées sur le	territoire et inté	grées dans HELP.
------------------------	--------------	--------------------	--------------------	------------------

Combinaison	Description	Succession d'horizons	Surface (%)				
Compinalson	Description	de sol (pédologie)	Kennebecasis	Pollett	Total		
а	Argile	A, B, C	0.49	0.00	0.38		
b	Argile silteuse	A, B, C	6.73	17.03	9.07		
С	Limon argileux	A, B, C	0.09	0.00	0.07		
d	Silt	A, B, C	0.36	0.00	0.27		
е	Limon silteux	A, B, C	3.35	1.10	2.84		
f	Limon	A, B, C	32.97	54.56	37.86		
g	Limon sableux	A, B, C	20.67	0.88	16.19		
h	Sable limoneux	A, B, C	27.34	22.01	26.14		
i	Sable	A, B, C	0.81	0.06	0.64		
Х	Sol nu	Roc affleurant	7.19	4.37	6.55		



Figure VII.1 – Données disponibles sur le rayonnement solaire à Moncton selon les outils utilisés.



Figure VII.2 – Variations temporelles du rayonnement solaire : d'après les données de la station CWEEDS de Moncton A entre 1953 et 2005.



Figure VII.3 – Variations temporelles du rayonnement solaire : d'après les données du satellite GOES intégrées au modèle SUNY selon la localisation de Moncton entre 2002 et 2008.



Figure VII.4 – Variations temporelles du rayonnement solaire : d'après les données satellitaires du projet POWER de la NASA selon la localisation de Moncton entre 1983 et 2017.



Figure VII.5 – Variations temporelles du rayonnement solaire : d'après les données synthétiques générées par HELP à Sussex entre 1980 et 2016.



Figure VII.6 – Relation entre le rayonnement solaire et les précipitations selon les outils utilisés entre 2002 et 2005.



Figure VII.7 – Variations temporelles du rayonnement solaire selon les outils utilisés entre 2002 et 2005.



Figure VII.8 – Comparaison du rayonnement solaire selon les outils utilisés entre 2002 et 2005.

Tableau VII.3 – Vitesse horaire moyenne du vent à la station de Moncton A selon les mois : d'après les normales climatiques entre 1981 et 2010 du Gouvernement du Canada (2018).

Vitesse horaire moyenne du vent	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEPT	ост	NOV	DEC	AN
Vent (km/h)	19.2	18.7	19.2	18.5	16.7	14.9	13.5	13.2	14.6	16.5	17.8	19.1	16.8

Tableau VII.4 – Humidité relative moyenne à la station de Moncton A selon les trimestres : d'après les normales climatiques entre 1981 et 2010 du Gouvernement du Canada (2018).

Humidité relative moyenne (%)	1 <sup>er</sup> trimestre : Janvier – Mars	2 <sup>ème</sup> trimestre : Avril – Juin	3 <sup>ème</sup> trimestre : Juillet – Septembre	4 <sup>ème</sup> trimestre : Octobre – Décembre
A 6 heures	81.1	88.0	92.9	87.3
A 15 heures	66.7	60.3	60.7	69.6
Moyenne	73.9	74.1	76.8	78.5

Tableau VII.5 – Période sans gel à la station de Moncton A : d'après les normales climatiques entre 1981 et 2010 du Gouvernement du Canada (2018).

Période	Date moyenne du	Date moyenne du	Durée moyenne de
sans gel	dernier gel du printemps	premier gel d'automne	la période sans gel
Dates clefs	22 mai	4 octobre	134 jours

Pente	Code	Bassins		Kennebe	ecasis	Pollett	
		Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%
< 3 %		291	21	232	21	59	19
3 - 8 %		568	40	410	37	158	50
> 8 %		558	39	461	42	97	31
	Total	1 417	100	1 103	100	314	100

Tableau VII.6 – Distribution des pentes sur les bassins.



Figure VII.9 – Distribution des pentes sur les bassins.

Code de l'étiquette	Attribut de la couverture du sol	Utilisation du sol
30	Stérile/non végétalisé	Résidentielle, commerciale peu dense
32	Roche/blocaille	Résidentielle, commerciale peu dense
33	Terrain découvert	Résidentielle, commerciale peu dense
34	Zones développées	Résidentielle, commerciale dense
50	Arbustes	Boisé
52	Petits arbustes	Boisé
80	Terres humides	Boisé
81	Zone humide - boisée	Boisé
82	Zone humide - arbustive	Boisé
83	Zone humide - herbacée	Boisé
100	Plantes herbacées	Culture extensive
110	Prairies, herbes indigènes	Culture extensive
121	Cultures annuelles	Culture intensive
122	Cultures pérennes et pâturages	Culture extensive
210	Forêt de conifères	Boisé
211	Coniférien - dense	Boisé
212	Coniférien - ouvert	Boisé
213	Coniférien - clairsemé	Boisé
220	Forêt de feuillus	Boisé
221	Feuillu - dense	Boisé
222	Feuillu - ouvert	Boisé
223	Feuillu - clairsemé	Boisé
230	Forêt mixte	Boisé
231	Mixte - dense	Boisé
232	Mixte - ouvert	Boisé
233	Mixte - clairsemé	Boisé

Tableau VII.7 – Regroupements des attributs par type d'utilisation du sol : d'après les données de la couverture du sol de la GéoBase (2009).

Utilisation du sol		Bassins		Kennebecasis		Pollett	
		Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%
Culture intensive		48	3	41	4	7	2
Culture extensive		234	17	212	19	22	7
Boisé		1 101	78	822	75	279	89
Résidentielle, commerciale dense		20	1	18	2	1	0
Résidentielle, commerciale peu dense		13	1	9	1	4	1
	Total	1 417	100	1 103	100	314	100

Tableau VII.8 – Distribution du type d'utilisation du sol sur les bassins.



Figure VII.10 – Distribution du type d'utilisation du sol sur les bassins.
Tableau VII.9 – Regroupements des unités pédologiques par classes de sol et en groupes hydrologiques : unités de sol extraites des cartes pédologiques du Provincial Department of Agriculture (1948a), du Provincial Department of Agriculture (1948b) et du Provincial Department of Agriculture (1949).

Unités pédologiques	Classe de sol	Groupe hydrologique	
Limon sableux graveleux plus graveleux	Sabla	۸	
Sable limoneux graveleux	Sable	A	
Limon graveleux plus graveleux			
Limon sableux graveleux			
Limon sableux léger plus graveleux			
Sable limoneux	Sable limoneux	В	
Mélange de limon sableux graveleux			
Limon sableux plus graveleux	-		
Limon à limon silteux	-		
Limon graveleux			
Limon sableux léger	-		
Limon plus graveleux	-		
Limon à limon sableux plus graveleux	Limon sableux		
Limon sableux	-		
Limon fin sableux à silteux sur graviers			
Limon à limon lourd	Limon	С	
Limon argileux à sableux			
Limon silteux	Limon silteux		
Limon sableux très fin	-		
Limon argileux plus graveleux	Silt		
Limon argileux	Silt limoneux argileux		
Argile à argile limoneuse	Argile silteuse		
Argile	Argile		
Boue	Boue	D	
Tourbe	Tourbe		

Groupe	Codo	Bassins		Kennebe	casis	Pollett		
hydrologique	Coue	Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%	
А		10	1	9	1	0	0	
В		392	28	315	29	77	25	
С		1 009	71	773	70	236	75	
D		6	0	6	1	0	0	
	Total	1 417	100	1 103	100	314	100	

Tableau VII.10 – Distribution des groupes hydrologiques sur les bassins.



Figure VII.11 – Distribution des groupes hydrologiques sur les bassins.

Numéro	Codo	Bass	ins	Kennet	pecasis	Pol	lett
de courbe	Code	Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%
24		1	0	1	0	0	0
32		0	0	0	0	0	0
33		2	0	2	0	0	0
44		5	0	5	0	0	0
51		15	1	13	1	2	1
54		46	3	36	3	11	3
59		137	10	96	9	41	13
62		0	0	0	0	0	0
64		0	0	0	0	0	0
65		32	2	28	3	4	1
66		114	8	99	9	15	5
68		154	11	113	10	41	13
70		0	0	0	0	0	0
72		45	3	41	4	4	1
73		352	25	237	22	114	36
74		21	1	19	2	2	0
76		11	1	9	1	2	1
77		85	6	76	7	9	3
78		291	21	234	21	57	18
79		11	1	10	1	1	0
80		3	0	3	0	0	0
82		11	1	7	1	4	1
83		51	4	48	4	4	1
84		15	1	12	1	2	1
86		0	0	0	0	0	0
87		5	0	4	0	1	0
88		9	1	9	1	1	0
90		0	0	0	0	0	0
	Total	1 417	100	1 103	100	314	100
	Moyenne	71		7	2	7	1

	Tableau VII.11 -	- Distribution of	du numéro de	courbe sur	<sup>,</sup> les bassins.
--	------------------	-------------------	--------------	------------	---------------------------



Figure VII.12 – Distribution du numéro de courbe sur les bassins.

Donto du droin	Codo	Bass	ins	Kenneb	ecasis	Pollett	
Pente du drain	Code	Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%
0.5 - 2.5		230	16	186	17	44	14
2.5 - 5.0		321	23	229	21	92	29
5.0 - 7.5		265	19	193	18	72	23
7.5 - 10.0		185	13	141	13	44	14
10.0 - 15.0		213	15	172	16	41	13
15.0 - 25.0		157	11	137	12	20	6
25.0 - 50.0		46	3	43	4	3	1
	Total	1 417	100	1 103	100	314	100
	Moyenne	8.3	3	8.7		6.9	

Tableau VII.12 – Distribution de la pente du drain sur les bassins.



Figure VII.13 – Distribution de la pente du drain sur les bassins.

Distance de	Codo	Bass	Bassins		ecasis	Pollett	
drainage	Code	Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%
5		31	2	26	2	5	2
10		48	3	41	4	7	2
20		1 103	78	824	75	279	89
25		235	17	213	19	22	7
	Total	1 417	100	1 103	100	314	100
	Moyenne	20	20			20	

Tableau VII.13 – Distribution de la distance de drainage sur les bassins.



Figure VII.14 – Distribution de la distance de drainage sur les bassins.

	Oada	Bass	ins	Kenneb	ecasis	Pollett	
Couverture du soi	Code	Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%
Ombre	12	0	0	0	0	0	0
Eau	20	2	0	1	0	0	0
Stérile/non végétalisé	30	0	0	0	0	0	0
Roche/blocaille	33	13	1	9	1	4	1
Zones développées	34	16	1	16	1	1	0
Arbustes	50	0	0	0	0	0	0
Petits arbustes	52	42	3	29	3	13	4
Terres humides	80	0	0	0	0	0	0
Zone humide - boisée	81	0	0	0	0	0	0
Zone humide - arbustive	82	3	0	1	0	1	0
Zone humide - herbacée	83	0	0	0	0	0	0
Plantes herbacées	100	25	2	19	2	6	2
Prairies, herbes indigènes	110	0	0	0	0	0	0
Cultures annuelles	121	48	3	41	4	7	2
Cultures pérennes et pâturages	122	210	15	193	18	16	5
Forêt de conifères	210	7	1	5	0	2	1
Coniférien - dense	211	17	1	12	1	5	2
Coniférien - ouvert	212	370	26	280	25	90	29
Coniférien - clairsemé	213	109	8	85	8	24	8
Forêt de feuillus	220	17	1	15	1	2	1
Feuillu - dense	221	39	3	21	2	18	6
Feuillu - ouvert	222	127	9	89	8	39	12
Feuillu - clairsemé	223	1	0	1	0	0	0
Forêt mixte	230	7	0	6	1	0	0
Mixte - dense	231	327	23	252	23	74	24
Mixte - ouvert	232	36	3	27	2	8	3
Mixte - clairsemé	233	1	0	1	0	0	0
	Total	1 417	100	1 103	100	311	100

## Tableau VII.14 – Distribution du type de couverture du sol sur les bassins.



Figure VII.15 – Distribution du type de couverture du sol sur les bassins.

Converture	Codo		LAI		Sourcos	Commontairos
Couverture	Coue	Min	Моу	Max	Sources	Commentaires
Ombre	12	0.0	0.0	0.0	Schroeder <i>et al.</i> (1994)	Huit cellules seulement
Eau	20	0.0	0.0	0.0	Schroeder et al. (1994)	Pas de végétation
Stérile/non végétalisé	30	0.0	0.0	0.0	Schroeder <i>et al.</i> (1994)	Sol nu donc pas de végétation
Roche/blocaille	33	0.0	1.7	2.2	Croteau (2006)	Affleurement donc faible couvert végétal
Zones dévelopnées	34	0.2	0.9	1.6	Croteau (2006)	Ville de Sussex
	340	0.5	2.1	3.8	Croteau (2006)	Autres zones développées
Arbustes	50	0.4	2.1	4.5	Asner <i>et al.</i> (2003)	Arbustaie
Petits arbustes	52	0.4	2.1	4.5	Asner <i>et al.</i> (2003)	Arbustaie
Terres humides	80	2.0	3.5	5.0	-	Assimilée à de la forêt mixte
Zone humide - boisée	81	2.0	3.5	5.0	-	Assimilée à de la forêt mixte
Zone humide - arbustive	82	0.4	2.1	4.5	-	Assimilée à des arbustes
Zone humide - herbacée	83	1.0	2.0	3.1	-	Assimilée à des plantes herbacées
Plantes herbacées	100	1.0	2.0	3.1	Croteau (2006)	Couvert végétal bas
Prairies, herbes indigènes	110	0.3	1.7	5.0	Asner <i>et al.</i> (2003)	Maximum plafonné à 5
Cultures annuelles	121	0.2	3.6	5.0	Asner <i>et al.</i> (2003)	Maximum plafonné à 5
Cultures pérennes et pâturages	122	5.0	5.0	5.0	Breuer <i>et al.</i> (2003)	Maximum plafonné à 5
Forêt de conifères	210	1.5	3.3	5.0	Breuer <i>et al.</i> (2003)	Maximum plafonné à 5
Coniférien - dense	211	2.5	4.3	5.0	-	Forêt de conifères + 1
Coniférien - ouvert	212	1.5	3.3	5.0	-	Forêt de conifères
Coniférien - clairsemé	213	1.5	2.3	4.0	-	Forêt de conifères - 1
Forêt de feuillus	220	2.5	3.8	5.0	Breuer <i>et al.</i> (2003)	Maximum plafonné à 5
Feuillu - dense	221	3.5	4.8	5.0	-	Forêt de feuillus + 1
Feuillu - ouvert	222	2.5	3.8	5.0	_	Forêt de feuillus
Feuillu - clairsemé	223	2.5	2.8	4.0	-	Forêt de feuillus - 1
Forêt mixte	230	2.0	3.5	5.0	Breuer <i>et al.</i> (2003)	Maximum plafonné à 5
Mixte - dense	231	3.0	4.5	5.0	_	Forêt mixte + 1
Mixte - ouvert	232	2.0	3.5	5.0	_	Forêt mixte
Mixte - clairsemé	233	2.0	2.5	4.0	_	Forêt mixte - 1

Tableau VII.15 – Définition de l'indice de surface foliaire (LAI).

En gras : valeurs choisies après calage.

	Codo	Bassi	ns	Kennebe	ecasis	Pol	lett	
LAI	Code	Km <sup>2</sup>	%	Km²	%	Km <sup>2</sup>	%	
0		15	1	10	1	5	2	
0.2		64	5	56	5	8	2	
0.3		0	0	0	0	0	0	
0.4		45	3	31	3	14	5	
1		25	2	19	2	6	2	
1.5		487	34	370	34	117	37	
2		43	3	34	3	9	3	
2.5		162	11	116	11	45	14	
3		326	23	251	23	75	24	
3.5		40	3	21	2	19	6	
5		210	15	194	18	16	5	
	Total	1 417	100	1 103	100	314	100	
	Moyenne	2.4		2.5	5	2.2		

Tableau VII.16 – Distribution l'indice de surface foliaire (LAI) sur les bassins.



Figure VII.16 – Distribution l'indice de surface foliaire (LAI) sur les bassins.

Turne de cultures	Qada	Bass	ins	Kennebe	Pollett		
l ype de cultures	Code	Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%
Eau	20	1	0	1	0	0	0
Sols nus et terres stériles	30	13	1	11	1	2	1
Milieu urbain et bâti	34	46	3	41	4	5	2
Arbustaie	50	177	13	142	13	35	11
Terres humides	80	34	2	26	2	9	3
Prairies	110	0	0	0	0	0	0
Pâturage et cultures fourragères	122	111	8	102	9	9	3
Jachère	131	1	0	1	0	0	0
Orge	133	1	0	1	0	0	0
Avoine	136	1	0	1	0	0	0
Blé	140	0	0	0	0	0	0
Maïs	147	6	0	5	0	0	0
Soya	158	0	0	0	0	0	0
Pomme de terre	177	0	0	0	0	0	0
Petits fruits	181	2	0	1	0	1	0
Houblon	191	0	0	0	0	0	0
Forêt de conifères	210	466	33	357	32	110	35
Forêt de feuillus	220	250	18	177	16	72	23
Forêt mixte	230	306	22	236	21	70	22
	Total	1 417	100	1 103	100	314	100

## Tableau VII.17 – Distribution du type de cultures sur les bassins.



Figure VII.17 – Distribution du type de cultures sur les bassins.

			Profo	ndeur		
Type de cultures	Code	r	acinai	re (cm)	Source	Commentaires
		Min	Моу	Мах		
Eau	20	0	0	0	-	-
Sols nus et terres stériles	30	10	15	20	Schroeder et al. (1994)	-
Milieu urbain et bâti	34	20	20	20	Croteau (2006)	-
Arbustaie	50	25	25	25	Croteau (2006)	-
Terres humides	80	40	50	60	Jackson <i>et al.</i> (1996)	-
Prairies	110	50	75	100	Rushton (2003)	-
Pâturage et cultures fourragères	122	50	75	300 (100)	Allen <i>et al.</i> (1998)	Limitée à 100 cm
Jachère	131	50	75	225 (100)	Mekonnen <i>et al.</i> (1997)	Limitée à 100 cm
Orge	133	100	100	220 (100)	Canadell <i>et al.</i> (1996) et Allen <i>et al.</i> (1998)	Limitée à 100 cm
Avoine	136	100	100	180 (100)	Canadell <i>et al.</i> (1996) et Allen <i>et al.</i> (1998)	Limitée à 100 cm
Blé	140	80	90	300 (100)	Rushton (2003), Canadell <i>et al.</i> (1996) et Jackson <i>et al.</i> (1996)	Limitée à 100 cm
Maïs	147	80	90	240 (100)	Canadell <i>et al.</i> (1996), Jackson <i>et al.</i> (1996) et Allen <i>et al.</i> (1998)	Limitée à 100 cm
Soya	158	60	80	180 (100)	Canadell <i>et al.</i> (1996), Jackson <i>et al.</i> (1996) et Allen <i>et al.</i> (1998)	Limitée à 100 cm
Pomme de terre	177	40	70	140 (100)	Rushton (2003) et Canadell et al. (1996)	Limitée à 100 cm
Petits fruits	181	60	80	120 (100)	Allen <i>et al.</i> (1998)	Limitée à 100 cm
Houblon	191	100	100	120 (100)	Allen <i>et al.</i> (1998)	Limitée à 100 cm
Forêt de conifères	210	60	80	500 (100)	Canadell et al. (1996) et Jackson et al. (1996)	Limitée à 100 cm
Forêt de feuillus	220	60	80	440 (100)	Canadell et al. (1996) et Jackson et al. (1996)	Limitée à 100 cm
Forêt mixte	230	60	80	500 (100)	Canadell <i>et al.</i> (1996) et Jackson <i>et al.</i> (1996)	Limitée à 100 cm

Tableau VII.18 – Définition de la profondeur d'évapotranspiration.

En italique : valeurs calculées à partir des données issues de la bibliographie.

En gras : valeurs choisies après calage.

Profondeur	Codo	Bass	ins	Kennebe	Pollett		
d'évapotranspiration (cm)	Code	Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%
0		1	0	1	0	0	0
10		13	1	11	1	2	1
20		46	3	41	4	5	2
25		177	13	142	13	35	11
40		35	2	26	2	9	3
50		112	8	103	9	9	3
60		1 024	72	771	70	254	81
80		6	0	5	0	0	0
100		2	0	2	0	0	0
	Total	1 417	100	1 103	100	314	100
	Moyenne	53		52		54	





Figure VII.18 – Distribution de la profondeur d'évapotranspiration sur les bassins.

Unité	n	Source	θ <sub>FC</sub>	Source	θ <sub>WP</sub>	Source	K <sub>s</sub> (m/s)	Source
Alluvions	0.397	Schroeder <i>et al.</i> (1994) Valeur type des graviers	0.032	Schroeder <i>et al.</i> (1994) Valeur type des graviers	0.013	Schroeder <i>et al.</i> (1994) Valeur type des graviers	3.00E-03	Domenico et Schwartz (1990) Valeur médiane des graviers
Colluvions	0.417	Schroeder <i>et al.</i> (1994) Valeur type des sables grossiers	0.045	Schroeder <i>et al.</i> (1994) Valeur type des sables grossiers	0.018	Schroeder <i>et al.</i> (1994) Valeur type des sables grossiers	8.00E-06	Assimilés aux tills
Contact glaciaire	0.397	Schroeder <i>et al.</i> (1994) Valeur type des graviers	0.032	Schroeder <i>et al.</i> (1994) Valeur type des graviers	0.013	Schroeder <i>et al.</i> (1994) Valeur type des graviers	3.00E-03	Domenico et Schwartz (1990) Valeur médiane des graviers
Fluvio- glaciaires	0.397	Schroeder <i>et al.</i> (1994) Valeur type des graviers	0.032	Schroeder <i>et al.</i> (1994) Valeur type des graviers	0.013	Schroeder <i>et al.</i> (1994) Valeur type des graviers	3.00E-03	Domenico et Schwartz (1990) Valeur médiane des graviers
Roc	0.060	Valeur moyenne des analyses de porosité sur les carottes	0.090	Rivard <i>et al.</i> (2014) Valeur de la formation de Blomidon	0.050	Rivard <i>et al.</i> (2014) Valeur de la formation de Blomidon	1.80E-05	Valeur médiane des essais de perméabilité (slug-tests)
Till	0.417	Schroeder <i>et al.</i> (1994) Valeur type des sables grossiers	0.045	Schroeder <i>et al.</i> (1994) Valeur type des sables grossiers	0.018	Schroeder <i>et al.</i> (1994) Valeur type des sables grossiers	8.00E-06	Valeur médiane des essais de perméabilité (Guelph)
Till d'ablation	0.397	Schroeder <i>et al.</i> (1994) Valeur type des graviers	0.032	Schroeder <i>et al.</i> (1994) Valeur type des graviers	0.013	Schroeder <i>et al.</i> (1994) Valeur type des graviers	3.00E-03	Domenico et Schwartz (1990) Valeur médiane des graviers

Tableau VII.20 – Définition des propriétés des dépôts meubles et du roc.

Unité	n	θ <sub>FC</sub>	θ <sub>WP</sub>	K <sub>s</sub> théorique (m/s)	Source	K₅ équivalente¹ (m/s)
Argile	0.475	0.378	0.265	1.70E-07	Schroeder <i>et al.</i> (1994)	4.46E-08
Argile silteuse	0.479	0.371	0.251	2.50E-07	Schroeder et al. (1994)	6.56E-08
Limon argileux	0.464	0.310	0.187	6.40E-07	Schroeder et al. (1994)	1.68E-07
Silt	0.398	0.244	0.136	1.20E-06	Schroeder et al. (1994)	3.15E-07
Limon silteux	0.501	0.284	0.135	1.90E-06	Schroeder <i>et al.</i> (1994))	4.99E-07
Limon	0.463	0.232	0.116	3.70E-06	Schroeder et al. (1994)	9.72E-07
Limon sableux	0.453	0.190	0.085	7.20E-06	Schroeder et al. (1994)	1.89E-06
Sable limoneux	0.437	0.105	0.047	1.70E-05	Schroeder et al. (1994)	4.46E-06
Sable	0.437	0.062	0.024	5.80E-05	Schroeder <i>et al.</i> (1994)	1.52E-05

Tableau VII.21 – Définition des propriétés des unités pédologiques.

<sup>1</sup>Estimée après calage.



Figure VII.19 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction du coefficient de ruissellement.



Figure VII.20 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de la conductivité hydraulique de la couche n°1.



Figure VII.21 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de la conductivité hydraulique de la couche n°2.



Figure VII.22 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de la conductivité hydraulique de la couche n°3.



Figure VII.23 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de la conductivité hydraulique de la couche n°5.



Figure VII.24 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de la période de croissance végétale.



Figure VII.25 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de la distance au drain.



Figure VII.26 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de l'épaisseur de la couche n°1.



Figure VII.27 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de l'épaisseur de la couche n°2.



Figure VII.28 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de l'épaisseur de la couche n°3.



Figure VII.29 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de l'épaisseur des couches de sol.



Figure VII.30 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de l'épaisseur de la couche n°5.



Figure VII.31 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de l'humidité relative.



Figure VII.32 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de l'indice de surface foliaire.



Figure VII.33 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de la latitude de la station météorologique.



Figure VII.34 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de la pente du drain.



Figure VII.35 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de la profondeur d'évaporation.



Figure VII.36 – Variations des paramètres du bilan hydrologique (%) en fonction de la vitesse moyenne annuelle du vent.

## ANNEXE VIII - ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ

L'annexe VIII présente les statistiques relatives à la définition de la vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère régional rocheux sur la région d'étude. Deux méthodes ont été appliquées afin de déterminer cette vulnérabilité de surface : l'indice DRASTIC (Section 5.7.1) et le temps de transfert advectif vertical ou DAT (Section 5.7.2).

La distribution de l'indice DRASTIC sur le territoire résulte de la combinaison de sept paramètres classés par cotes dont la cote de zéro a été attribuée aux secteurs de vulnérabilité nulle (Section 5.7.1). Le premier paramètre correspond à la profondeur de la nappe (paramètre D), répartie en huit cotes (Tableau VIII.1 et Figure VIII.1) et déterminée à partir de la carte piézométrique de l'aquifère rocheux et du MNT. Le second paramètre concerne la recharge nette de l'aquifère au roc (paramètre R) établie selon les résultats du modèle d'infiltration HELP avant ensuite été regroupés en six cotes de vulnérabilité (Tableau VIII.2 et Figure VIII.2). Le type d'aquifère (paramètre A) a été divisé en trois cotes en se basant sur les informations de la carte géologique (Tableau VIII.3 et Figure VIII.3). Les dix cotes attribuées au type de sol (paramètre S) se basent sur les textures des unités de sol rencontrées sur le territoire (Tableau VIII.4 et Figure VIII.4). Les gammes de valeurs des pentes (paramètre T), retranscrites à partir du MNT, ont été regroupées en six cotes (Tableau VIII.5 et Figure VIII.5). L'impact de la vadose (paramètre I), également divisé en six cotes, tient compte des caractéristiques des unités de sol localisées dans la zone non saturée (Tableau VIII.6 et Figure VIII.6). Le dernier paramètre considère la conductivité hydraulique de l'aquifère rocheux (paramètre C) pour lequel une unique cote a été déterminée en plus des zones de vulnérabilité nulle (Tableau VIII.7 et Figure VIII.7). Finalement, les statistiques du tableau VIII.8 et de la figure VIII.8 réfèrent à l'indice DRASTIC relatif de l'aquifère rocheux établi à partir des percentiles.

La définition du temps de transfert advectif vertical (DAT) sur la région d'étude offre des informations additionnelles sur la vulnérabilité de l'aquifère rocheux face à d'éventuelles contaminations de surface (Figures VIII.9 et VIII.10). En excluant certaines zones où le délai de transfert n'a pas été évalué (Section 5.7.2), les DAT ont été regroupés en cinq classes basées sur les percentiles (Tableau VIII.9 et Figure VIII.11).

Drefendeur de le nenne (m)	Cata	Surface (%)			
Profondeur de la happe (m)	Cole -	Kennebecasis	Pollett	Bassins	
Vulnérabilité nulle	0	16.65	16.13	16.53	
> 30.5	1	4.50	0.40	3.59	
22.8 - 30.5	2	4.59	1.15	3.82	
15.2 – 22.8	3	10.36	5.37	9.25	
9.1 – 15.2	5	16.30	18.10	16.70	
4.6 - 9.1	7	19.44	30.20	21.83	
1.5 – 4.6	9	19.44	21.33	19.86	
0 – 1.5	10	8.72	7.33	8.41	

Tableau VIII.1 – Attribution des cotes de la profondeur de la nappe (paramètre D) et distribution de cet indice sur les bassins.



Figure VIII.1 – Distribution des cotes de la profondeur de la nappe (paramètre D) sur les bassins.

Tableau VIII.2 – Attribution des cotes de la recharge (paramètre R) et distribution de cet indice sur les bassins.

Booharga (mm/an)	Coto	Surface (%)					
Recharge (mm/an)	Cole -	Kennebecasis	Pollett	Bassins			
Vulnérabilité nulle	0	16.65	16.13	16.53			
0 - 50	1	6.48	14.60	8.28			
50 - 102	3	17.07	10.32	15.58			
102 - 178	6	1.25	0.25	1.03			
178 - 254	8	21.77	25.18	22.53			
> 254	10	36.77	33.52	36.05			



Figure VIII.2 – Distribution des cotes de la recharge (paramètre R) sur les bassins.

Tableau VIII.3 – Attribution des cotes du type d'aquifère (paramètre A) et distribution de cet indice sur les bassins.

	Coto	Surface (%)			
i ype u aquilere	Cole -	Kennebecasis	Pollett	Bassins	
Vulnérabilité nulle	0	16.65	16.13	16.53	
Socle cristallin	5	9.63	43.33	17.10	
Roc sédimentaire fracturé	7	73.72	40.54	66.37	



Figure VIII. 3 – Distribution des cotes du type d'aquifère (paramètre A) sur les bassins.

	Coto	Surface (%)			
Type de Sol	Cole -	Kennebecasis	Pollett	Bassins	
Vulnérabilité nulle	0	16.65	16.13	16.53	
Argiles	1	0.42	0.00	0.33	
Argiles silteuses	2	6.52	15.04	8.41	
Silt, Silt limoneux argileux	3	0.47	0.00	0.37	
Limons silteux	4	2.41	0.07	1.89	
Limons	5	30.32	46.47	33.90	
Limons sableux	6	17.17	0.56	13.49	
Sables limoneux	8	23.33	21.09	22.84	
Sables	9	0.78	0.09	0.63	
Sol mince ou absent	10	1.93	0.56	1.62	

Tableau VIII.4 – Attribution des cotes du type de sol (paramètre S) et distribution de cet indice sur les bassins.



Figure VIII.4 – Distribution des cotes du type de sol (paramètre S) sur les bassins.

Surface (%) Topographie (%) Cote Pollett Kennebecasis **Bassins** Vulnérabilité nulle 0 16.65 16.13 16.53 > 18 1 9.43 2.98 8.00 12 - 18 3 12.47 7.85 11.45 6 - 12 5 27.53 27.21 28.67 9 2 - 6 37.25 29.03 26.69

Tableau VIII.5 – Attribution des cotes de la topographie (paramètre T) et distribution de cet indice

sur les bassins.





Figure VIII.5 – Distribution des cotes de la topographie (paramètre T) sur les bassins.

Impact de la zone vedere	Coto	Surface (%)			
impact de la zone vauose	Cole -	Kennebecasis	Pollett	Bassins	
Vulnérabilité nulle	0	16.65	16.13	16.53	
4	4	2.08	3.88	2.48	
5	5	5.43	24.96	9.76	
6	6	41.78	30.23	39.22	
7	7	31.29	24.28	29.73	
8	8	2.77	0.52	2.27	

Tableau VIII.6 – Attribution des cotes de l'impact de la zone vadose (paramètre I) et distribution de cet indice sur les bassins.



Figure VIII.6 – Distribution des cotes de l'impact de la zone vadose (paramètre I) sur les bassins.

Tableau VIII.7 – Attribution des cotes de la conductivité hydraulique de l'aquifère (paramètre C) et distribution de cet indice sur les bassins.

Conductivité hydroulique de l'aquifère (m/s)	Coto	Surface (%)			
conductivite hydraunque de l'aquitere (m/s)	Cole	Kennebecasis	Pollett	Bassins	
Vulnérabilité nulle	0	16.65	16.13	16.53	
Conductivité hydraulique médiane du roc = 1.8E-5 m/s	1	83.35	83.87	83.47	



Figure VIII.7 – Distribution des cotes de la conductivité hydraulique de l'aquifère (paramètre C) sur les bassins.

Tableau VIII.8 – Attribution	des cotes d	e l'indice	DRASTIC	de l'aquifère	rocheux et	distribution d	e
cet indice sur les bassins.							

	Coto	Surface (%)			
	Cole	Kennebecasis	Pollett	Bassins	
Vulnérabilité nulle	0	16.65	16.13	16.53	
Très faible	< 106 (< 10 <sup>ème</sup> percentile)	7.93	6.40	7.59	
Faible	106 - 116 (10 - 25 <sup>ème</sup> percentile)	11.83	12.74	12.04	
Moyenne	116 - 150 (25 - 75 <sup>ème</sup> percentile)	40.84	47.28	42.26	
Élevée	150 - 165 (75 - 90 <sup>ème</sup> percentile)	12.26	14.43	12.75	
Très élevée	> 165 (> 90 <sup>ème</sup> percentile)	10.48	3.02	8.83	



Figure VIII.8 – Distribution de la vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère rocheux sur les bassins selon l'indice DRASTIC.


Figure VIII.9 – Fréquence des temps de transfert advectif vertical (DAT) sur les bassins et vulnérabilité associée.



Figure VIII.10 – Fréquence des temps de transfert advectif vertical (DAT) sur les bassins et vulnérabilité associée : zoom de la figure précédente.

Tableau VIII.9 – Attribution des cotes du temps de transfert advectif vertical (DAT) vers la nappe e
distribution de ce temps de transfert advectif vertical sur les bassins.

DAT		Surface (%)			
DAI		Kennebecasis	Pollett	Bassins	
Non évalué		6.99	4.45	6.43	
Résurgence		9.66	11.67	10.11	
Recharge non significative		1.47	2.64	1.73	
Recharge nulle		4.54	11.44	6.07	
Très faible	< 522	7.32	8.40	7.56	
Faible	522 – 835	11.89	9.41	11.34	
Moyenne	835 – 2 724	36.80	41.53	37.85	
Élevée	2 724 – 5 560	12.80	6.27	11.35	
Très élevée	> 5 560	8.53	4.19	7.57	



Figure VIII.11 – Distribution de la vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère rocheux sur les bassins selon le temps de transfert advectif vertical.

# ANNEXE IX - DESCRIPTIONS DES PUITS D'OBSERVATION

L'annexe IX présente les descriptions stratigraphiques des dix forages de la CGC forés entre 2015 et 2016 sur la région d'étude. Des précisions sur l'installation de ces puits d'observation sont disponibles dans la section 4.1.

Ces puits ont notamment permis de suivre en continu les fluctuations de la nappe (Section 4.2), de réaliser des essais de perméabilité à choc hydraulique (Section 4.3.1) (*slug tests*), d'échantillonner régulièrement les eaux souterraines (Section 4.4) et d'effectuer des diagraphies dans le but de caractériser l'aquifère rocheux (Section 2.4.5). De plus, sur les puits d'observation PO-07 à PO-10 ont été récupérées des carottes de forages (Section 4.3.4).

Toutes les données recueillies à partir de ces puits ont ainsi permis de déterminer la conductivité hydraulique de l'aquifère rocheux (Section 5.3.2), de caractériser le degré de fracturation du roc (Section 5.3.1) ainsi que sa porosité et sa perméabilité (Section 5.3.3). De plus, les données collectées ont aussi permis de préciser les conditions de confinement de la nappe (Section 5.4) et de définir le taux de recharge avec le modèle *GWHAT* (Section 5.6.5). L'échantillonnage des déblais de forages a également permis de préciser la granulométrie des dépôts meubles traversés (Section 5.1.1).













	RAPPORT DE FORAGE											
1+1	Ressources naturelles Natural Resources Canada Canada	Ide P( (1)	ntifiant <b>D-07</b> 65540)	Coordonnées (NADE X: 310116 m Y: 5067620 m 7: 58 m (nivea	33 Zone20)	Nom:	Proje Mc-Cully 43	et - Elgin	Date Début: Fin:			
Localis Municij Entrepi Type d Remar Le fora Précisio	Info ation: Forage stratigraphi palité: reneur: e foreuse: que: <u>Forage diamanté ré</u> ge est situé à proximité de on du GPS : 3m	que diama que diama  ealisé par L e PO-04.	énérale nté situé à c ogan Drillin	230 m(invea	Détails ( Prof. forage: Diam. forage Long. tubage Type de tuba Diam. tubage Margelle:	de constru m : m :: m ge: :: m	n n	Niveau d'a No. capteur Prof. capteu Niv. d'eau 2.71 2.5 2.47	eau (p/r haut du m _ (m) Dat 2016-0 2016-0 2016-0	tubage) 		
rof. (m)	Échantillons	rof (m)	Diag.	Description lithologique	S	tratigra	ohie	Const Capteur pressio	de de Bento	uits Ē		
<u>ā</u>	туре р	iiii)			Code	CGQ	PIOL(III)	Viv. Ea	u <u>L</u> Puits	ouvert 🖬		
— 0 - -				remblai rouge till rouge début du roc			<u>2.1336</u> 2.4257 2.4384	2	2.71	0 -		
- 5 -				mudstone rouge	ne		6.096	<u>6.15</u>		5 -		
- - - 10	PO-07-27.5'	8.23		mudstone rouge	s		9.144		·	10 -		
- 10 - -				inclusions mudstone rouge avec altératic blanche (calcite?)	n		<u>    10.668</u> <u>    12.192</u>		·	10 -		
- - - 15				mudstone rouge altéré			15.24		· _ · -	15 -		
-				grès rouge avec lamination visi	ible		16.764					
- - - 20				brèche avec grosses inclusion de gravier	ns		18.90776 19.4945		 	20 -		
- - - 25	PO-07-82.5'	25.04		de calcite à 30%	x		21.336		·	25 -		
-				Mudstone			28.0416		·			
- 30 - -				Brèche avec stratification visit	ble		30.11424		·····	30 -		
- 35 -	PO-07-112.5' PO-07-116.5' PO-07-120'	34.16 35.43 36.58		Brèche			33.8328		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	35 -		
- - - 40 -				Siltstone très uniforme avec inclusions d'argilite à 127'-128 Siltstone rouge vésiculaire	'6"		<u>39.1668</u> <u>39.624</u>		· ·	40 -		
- - - 45				Grès rouge fin Siltstone avec inclusions d'argi Grès avec fracture 150' qui	lite		43.37304 43.98264 44.25696			45 -		
-				contient des cristaux de gyps (aiguilles) Interlits de grès	e		47.18304 47.27448		· ·			
- 50 - -	PO-07-165.5'	49.5					50.292	<u>50.29</u>	) <u>-</u>	50 -		
5										55		
Forage	e supervisé par: <u>X. Malet</u>			No miso d	à iour · 1 -			Préparé Date de	e par: X. Male	t		

				RAPPORT D	E FORAG	E				
1+1	Ressources naturelles Natural Resources Canada Canada	Ide P( (1	ntifiant <b>D-08</b> 65538)	Coordonnées (N/ X: <u>336133</u> m Y: <u>5078234</u> m Z: 136 m (niv	AD83 Zone20) eau du sol)	Nom: No.:	Proj Mc-Cully 43	et - Elgin	Date Début: Fin:	
Localis Municip Entrepr Type de Remarc Suite à Précisio	Information générale Localisation: Forage localisé sur un pad de forage de Corridor ressour Municipalité: Entrepreneur: Type de foreuse: Remarque: _Forage diamanté réalisé par Logan Drilling le 2016-07-08 Suite à un bris hydraulique, le forage est contaminé. Précision du CRS: 2 m			Corridor ressource.	Détails Prof. forage: Diam. forage Long. tubage Type de tuba Diam. tubage Margelle:	de constru m e:mr e:m age:m	n m	Niveau d'u No. capteur Prof. capteu Niv. d'eau 38.1	eau (p/r haut du m m	tubage) te 8-10 18:30
of. (m)	Échantillons	rof (m)	Diag.	Description lithologique	S	stratigra	phie	Construction du p		uits E
ā	iype p	101.(11)				eCGQ	PI0I.(III)	Viv. Ea	u <u>L</u> Puits	ouvert 🚡
— 0 -				Grès fin, altération noir	e		1.524	2		0 —
-			-	Gres moyen mai trie, bru altération noire de 6'10" à	n, 7'7"		3.048			-
- 5 -	PO-08-14'	4.09		Grès fin, gris, brun au nivea fractures	u des		5.4864			- 5 — -
-	PO-08-27.5'	8.28		Grès fin brun						-
— 10 - -				Grès fin gris			<u> </u>			10 — - -
-				Grès fin brun			14.1732	<u>13.71</u>	6	-
— 15 - -	PO-08-57.5'	14.1	-	Gres fin gris, remplissage avec pyrite dans la fracture Grès moyen brun très frial altération noire entre 50'-5 52'2"-53'	noir 47'3" ble, 1' et		14.5288		- · <u>- · -</u> · <u>- · -</u>	15 — -
-				Grès gris avec altération niveau des fractures	au		19.6596		· <u> </u>	- - 20
- 20 - -				Alternance de grès brun et avec SO inclinée, altération niveau des fractures, remplissage d'argile à la fra de 77'6"	gris, n au cture				· — ·	- 20
- 25   -	PO-08-82'	24.84		Conglomérat et grès moy	/en		24.511		- · <u> </u>	25 — -
- - -				Argilite, dont une partie es	t de <u>"-89')</u>		27.432		- · <u>- · -</u>	-
— 30 - -				Alternance de grès brun et avec veinules noires ent	gris re		30.50794		··	30 — -
- 35	PO-08-112.5'	34.16		Grès gris passant de moyer	n à fin		32.8168		··	
_				Alternance de grès fin brun Grès fin et congloméra	et gris		<u>36.0172</u> 37.1856 37.4904 37.719		38.1 	-
- 40				Argilite grise avec veinules i Conglomérat gris avec veir noires. Grès gris avec zone d'arg	noires jules		37.8968 38.2016 39.624	<u>39.62</u>		- 40 —
_				entre 127'8'-128'3"	/					-
- - 45 -										45 —
-										-
- 50 - -										- UC -
55										- - 55
Forage Vérifié	supervisé par: <u>X. Malet</u> par: <u>C.Rivard, D.Lavoie</u>		ıl	No. mis	e à jour : <u>1 -</u>			Préparé Date de	e par: <u>X. Male</u> modification: <u>2</u>	t 016-08-31

RAPPORT DE FORAGE											
•	Ressources naturelles Natural Resources Canada	Identif PO- (1655.	fiant • <b>09</b> 39)	Coordonnées (NA           X:         314941 m           Y:         5070570 m           Z:         71 m (niv)	AD83 Zone20) eau du sol)	Nom: ) No.:	Proje Mc-Cully 43	et - Elgin	Date Début: Fin:		
Localis Municip Entrepi Type de Reman Le fora Précisio	Information générale Localisation: Forage localisé à 5 m du forage PO-06 existant. Municipalité: Entrepreneur: Type de foreuse: Remarque: Forage diamanté réalisé par Logan Drilling le 2016-07-10. Le forage est situé à proximité de PO-06.			istant	Dét Prof. for Diam. fo Long. tu Type de Diam. tu Margelle	tails de constru rage: m orage: m ibage: m e tubage: ubage: mr e: m	n n	Niveau d'a No. capteur: Prof. capteu Niv. d'eau 26.175 26 25.98	eau (p/r haut d r:m (m) Da 2016-0 2016-0	u tubage) ate 08-09 09:35 07-30 15:00 07-29 15:00	
of. (m)	Échantillons	I	Diag.	Description lithologique		Stratigra	ohie	Construction du puits Capteur de proposion			
Pro	Type pr	rof.(m)			C	Code CGQ	Prof.(m)	Viv. Eau	I ET Puits	ouvert <b>ដ័</b>	
0 - -			-	remblai brun composé d compost et de sable.	e		3.048	 2		0	
- 5 - -				Argile rouge sec puis humic 17'	de à					5	
- - 10 - -			-	Silt et sable fin rouge. Till: Argile rouge avec un pe gravier fin à moyen Till: Argile rouge avec beau de gravier fin à moyen	eu de coup		9.7536 10.9728 12.192 13.4112			10 -	
- 15 	PO-09-57.5	17.22		Grès brun-jaune Conglomérat gris très frac Argilite verte Grès fin à moyen mal trié a intertits de arès rouge bian	turé		13.53312 16.1544 16.24584	18.2		15 -	
- 20 				Grès grossier gris-vert, ma Grès fin Argilite verte Conglomérat avec gross inclusions de gravier ve Grès moyen gris-vert	l trié		19.29384 19.812 20.05584 20.54352 21.336		······	20 -	
_ — 25 -	PO-09-82.5'	25.04		Alternance de conglomér gris-vert et d'argilite vert Alternance de siltstone vert grès gris avec grains noi	at te et de irs		24.384		26.17 •	<b>5</b> 25 -	
- - - - 30			-	Conglomerat avec grain grossiers avec inclusion d'argilite rouge (84'-84'5' 92'4''-93') Alternance de conglomérat et de grès fin avec inclusi	s s ", gris		28.956		·	30 -	
-			-	d'argilite rouge de 98'-99 Alternance de siltstone roug de grès fin-moyen gris Conglomérat gris à grain moyens	i5". ge et		<u>31.30296</u> <u>32.73552</u> <u>33.528</u>		·····		
- 35 - - -	PO-09-112.5'	34.14		Alternance de siltstone rou siltstone gris et conglomé (115'-118', 120'10"-125'	ige, rat ')				· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	35 -	
- 40 -				Mudstone gris-bleu avec int de siltstone rouge Conglomérat gris	erlits		<u>41.148</u> 41.4528		·	40 -	
- - 45 -				Alternance de grès et de silt gris-vert Conglomérat à grains gross Alternance de siltstone bleu grès fin gris	stone siers. et de		<u>43.5864</u> 43.8912 <u>46.39056</u>		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	45 -	
- - 50	PO-09-162.5'	49.38	-	Conglomérat à grains gross gris et rouge et bitume prés en inclusions de 155' à 16	siers sent 35'.		50.292		· ·	50 -	
- - - <u>55</u>				Conglomérat gris ou brun a argilite à 174'2"	avec				· · · - · - · - · - · - · - · - · - · -	55	
Forage Vérifié	supervisé par: <u>X. Malet</u> par: <u>C.Rivard, D.Lavoie</u>			No. mis	e à jour : <u>1</u>	-		Préparé _ Date de	par: <u>X. Mal</u>	et 2016-08-31	

	RAPPORT DE FORAGE											
1+1	Ressources naturelles Natural Resources Canada Canada	Ide <b>P(</b> (1	entifiant <b>D-09</b> 65539)	Coordonnées (N X: <u>314941</u> m Y: <u>5070570</u> m Z: <u>71</u> m (niv	AD83 Zone20) reau du sol)	Nom: No.:	Proje Mc-Cully 43	et - Elgin	Début: _ Fin:	)ate		
Localis Munici	Info ation: <u>Forage localisé à s</u> palité:	5 m du fora	énérale ge PO-06 e	xistant.	Déta Prof. fora Diam. fora	<b>ils de constru</b> ge: m age: mm	ction	Niveau d' No. capteur Prof. capteu	eau (p/r h :n ur:n	aut du	tubage)	
Type d Remar Le fora Précisi	le foreuse: que: <u>Forage diamanté re</u> ge est situé à proximité d on du GPS : 3 m	éalisé par L le PO-06.	ogan Drillin	g le 2016-07-10.	Long. tub Type de tr Diam. tub Margelle:	age: m ubage: page: mn m	1	26.175 26 25.98	u (m)	2016-08 2016-07 2016-07	e 3-09 09:35 7-30 15:00 7-29 15:00	
of. (m)	Échantillons	S	Diag.	Description lithologique		Stratigraphie		Construction du puits Capteur de pression Bentonite			uits E nite 5	
<u> </u>	l ype p	prot.(m)		1	Co	ode CGQ	Prof.(m)	Viv. Ea	u E·-	Puits	uvert 🚡	
_ 55	PO-09-181.5	55.17	-				56.388		L.		55	
-				Interlits de conglomérats e	et de					- • -	-	
-				Conglomérat fin et move	en		57.912		Ľ		-	
-				gris-bleu avec argilite d	e		59.436			<u> </u>	-	
- 60				1900-191					•		60 —	
-				Conglomérat grossier							-	
-							62.57544		F		-	
-									·		-	
				Interlits de grès fin gris	et is de				• •		-	
- 65				215')	ii de				L.		65 —	
-							67.056		-	·	-	
									F	<u> </u>		
_				Mudstone bleu avec inter bréchiques qui sentent l'h	lits uile				Ŀ	·	-	
- 70							70.104		•		70 —	
				Altornonce de congleméro	t aria						-	
-	PO-09-236	71.83	-	(odeur), d'argilite et de g	rès				-	-•-	-	
-							73.152		·		-	
-				grains grossiers et présenc	avec ce de		74 676			·	-	
- 75				bitume entre les grains INterlits de grès fin et d'argi	s. lite en		75.07224				75 —	
-				lits millimétriques gris-bl	eu				_	- • -	-	
-				bitume (forte odeur) entre	les		77.1144		-		-	
-				Grains. Conglomérat rouge	/		78.3336		-	·	-	
-		70.55	-	Siltstone rouge	t bleu			80.16	52	• —	-	
- 80	PO-09-261.5	79.55	1	gris de 259'8".			80.1624	4		<b>— • -</b>	80 —	
-											-	
-											-	
_											-	
_ 95											95	
_ 00											- 00	
_											-	
_											-	
_											-	
- 90											90 —	
F											-	
F											-	
F											-	
- 95											95 —	
Ľ											-	
Ĺ											-	
L											-	
- 100											100 —	
+												
F											-	
F											-	
$\vdash$											-	
- 105	i										105 —	
-											-	
F											-	
F											-	
-											-	
- 110											110 -	
Ĺ												
Forage	e supervisé par: X. Malet							Préparé	e par: X	. Malet		
Vérifié	par: C.Rivard D Lavoie			No mis	e à jour · <b>1 -</b>			Date de	e modificat	ion 20	)16-08-31	
v crine	Par. S. Ward, D.Lavole								. mounical			



# ANNEXE X - ARTICLE DE CONFÉRENCE : AIH GÉOOTTAWA 2017

L'annexe X inclut l'article de conférence (en anglais) présenté lors de la conférence de l'Association Internationale des Hydrogéologiques (AIH) à Ottawa en 2017 et intitulé :

Huchet F, Rivard C et Lefebvre R (2017) Hydrogeological characterization above two gas fields, Moncton sub-basin, southern New Brunswick. *GeoOttawa 2017, Joint CGS/AIH-CNC Groundwater Conference,* Ontario, Canada, 1-4 October 2017, pages 1-8.

La version originale de l'article est également disponible dans l'annexe numérique.

# Hydrogeological characterization above two gas fields, Moncton sub-basin, southern New Brunswick



François Huchet<sup>1,2</sup>, Christine Rivard<sup>2</sup> & René Lefebvre<sup>1</sup>

1: Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau Terre Environnement, Québec, QC, Canada 2: Natural Resources Canada, Geological Survey of Canada, Québec, QC, Canada

## ABSTRACT

A groundwater study is being carried out in southern New Brunswick to assess the potential link between gas reservoirs and the shallow fractured rock aquifer. Fieldwork included the drilling of ten shallow monitoring wells, hydraulic tests in wells open in the rock aquifer, permeameter tests in surficial deposits and continuous water-level recording. Hydrogeological conditions were defined based on the analysis of existing and acquired data, allowing the development of a piezometric map and a 2-D numerical model representing deep groundwater flow in the hydrogeological system that includes the intermediate zone located between gas reservoirs and shallow rock aquifers. Most of the active gravitydriven groundwater flow was found to occur in the first 100 m of the unconfined rock aquifer.

### RESUME

Une étude hydrogéologique est présentement réalisée dans le sud du Nouveau-Brunswick afin d'évaluer le lien potentiel entre des réservoirs gaziers et l'aquifère superficiel du roc fracturé. Les travaux de terrain ont inclus le forage de dix puits d'observation peu profonds, des essais hydrauliques dans les puits ouverts au roc, des essais au perméamètre dans les sédiments de surface et un suivi piézométrique continu. Les conditions hydrogéologiques ont été définies à partir de l'analyse des données existantes et acquises durant les travaux de terrain, permettant de développer une carte piézométrique et un modèle numérique 2D de l'écoulement de l'eau souterraine dans le système hydrogéologique qui comprend la zone intermédiaire entre les réservoirs gaziers et les aquifères superficiels dans le roc fracturé. La majorité de l'écoulement actif induit par la topographie se fait dans le 100 m supérieur des aquifères rocheux en condition libre.

## 1 INTRODUCTION

The fast-growing development of shale gas extraction technologies has been accompanied by environmental concerns, which are largely related to groundwater quality degradation. In response to these concerns, a moratorium on hydraulic fracturing was adopted by the provincial government of New Brunswick in 2014 until uncertainties surrounding this process are resolved.

Potential groundwater contamination mechanisms related to the development of unconventional gas resources include faulty casings of active wells, inadequately sealed decommissioned wells, spills or inappropriate surface storage of fracturing fluids and produced water, and linkage between the gas reservoir and shallow aquifers (Lefebvre, 2017). While the first three mechanisms have a higher probability to lead to groundwater contamination, they are related to engineering performance issues. No evidence of aquifer contamination has been formally established for hydraulically fractured reservoirs located more than 1 000 m deep (Lange et al., 2013). Nevertheless, there is currently no proven method allowing the assessment of aquifer vulnerability stemming from deep industrial activities and, therefore, uncertainty remains regarding the presence of preferential migration pathways between shallow and deep units. Jackson et al. (2013) recommended a site scale study including geochemical, geological and hydrogeological data. This project follows this perspective at both regional and local scales based

on the methodology and results obtained from two previous projects carried out in the Saint-Edouard and Haldimand areas (both in Quebec) (Ladevèze et al., 2016, Lavoie et al., 2016, Raynauld et al., 2016).

Within the framework of the larger project, the main objective of this study is to define the hydrogeological system conditions using 1) the development of a piezometric map, 2) different methods of recharge assessment and 3) numerical groundwater flow models. This paper provides preliminary results for items 1 and 3 derived from the analysis of existing and fieldwork data.

## 2 CONTEXT

Figure 1 presents the location of both sites operated by Corridor Resources: the McCully gas field and the Elgin prospected condensate field. The first field is located about 10 km northeast of Sussex, about midway between Saint John and Moncton. This gas field is located in the Kennebecasis River watershed (1 103 km<sup>2</sup> at the Apohaqui streamflow station) comprising a dense river network. The elevation ranges from 7 to 410 m. The highest elevations and steeper slopes are located in the southern part of the watershed, corresponding to the foothills of the Caledonia Highlands. The Elgin area is located in the Pollett River watershed (314 km<sup>2</sup>), 30 km east of Sussex. The elevation ranges from 14 to 400 m.

According to climate normals at the Sussex weather station between 1981 and 2010 (GC, 2010), the climate

can be described as humid and temperate due to the proximity of the Bay of Fundy. The minimum monthly average temperature (-8.5 °C) is in January and the maximum is recorded in July (19.2 °C). The mean annual total precipitation (rainfall and snowfall) is 1 170 mm.

This region is mainly rural (only 2% of urban areas). Both watersheds are primarily covered by forest (78%) and the remainder is agricultural land (20%) (NRCAN, 2000). As a result, groundwater is pumped mainly by residential wells. Well depths range from 6.1 to 188.0 m. Most of the wells are open boreholes through the rock aquifer, having an average depth of 43.7 m.

The McCully gas field comprises 46 wells, including 32 wells in production on 11 different pads (Séjourné, 2017). The target formations are the Hiram Brook Member tight sandstone (9 wells) and the Frederick Brook Member shale (31 wells) (Séjourné, 2017). In the Elgin area, 5 exploration wells were drilled (4 within the Frederick Brook Member), including an inclined well showing inconclusive results after hydraulic fracturing (Séjourné, 2017).



Figure 1. Location of the two study areas and of the monitoring wells

## 3 GEOLOGY

### 3.1 Surficial deposits

The surficial sediments map in Figure 2 shows the 6 main units. Tills can be subdivided into 20 distinct classes according to their grain size and source lithology (Pronk et al., 2005) and cover 91% of the two watersheds. Tills are mainly composed of sand and silt; they often have a high content of coarse sand and gravels (Rampton et al., 1984). Ice-contact and glaciofluvial outwash deposits are well described in Brinsmead et al. (1977). Alluvium terraces and floodplains are located in the valleys. Upstream, alluvium comprises mainly coarse material (gravels to boulders) with sand and silt content increasing toward the downstream limit of the watershed (Rampton et al., 1984). Ablation till and colluvium are the least extended deposits. Ablation till consists of sandy coarse material from gravel to boulder (Rampton et al., 1984).

Prior to using the provincial database (2 210 wells) to define surficial sediment thickness, a preliminary filtering was carried out by removing all data based on the following criteria: 1) abnormal stratigraphic description, 2) unspecified bedrock depth, 3) wells located outside the study area, 4) wells with undefined surficial deposits and 5) wells without location coordinates.



Figure 2. Surficial sediments (Pronk et al., 2005)

The second data filtering uses a similar approach as the one presented in Talbot Poulin et al. (2013). Around each well, the local average sediment thickness is calculated over a 250 m radius and data with a discrepancy of more than 5 m from this average is deleted. Then, each well having a difference between the sediment thickness and local average higher than the standard deviation calculated over a 500 m radius is deleted. The third step consists in making a visual inspection to remove abnormal data. At the end of this validation process, a total of 1 020 wells remained.



Figure 3. Boxplot of unconsolidated sediment thickness

Data from the 10 GSC wells were added as well as 40 synthetic points in areas without data based on the median value of each deposit (Figure 3.). The surficial deposit thickness was obtained using ordinary kriging with the AR2GEMS software (Remy et al., 2009). A cross-validation performed with 95% of the data showed that the predictive performance of this kriging was quite good (Figure 4). The spatial distribution of surficial sediment total thickness is presented in Figure 5.







Figure 5. Surficial deposit thickness estimated by ordinary kriging

### 3.2 Rock geology

The Moncton sub-basin is part of the major composite structure of the Maritimes Basin (St. Peter et al., 2009). Such sub-basins are oriented along the northeast to east direction and separated by basement uplifts along major faults (Rivard et al., 2008b). From the pre-Carboniferous crystalline basement to the top, the overall stratigraphic column is divided into six main groups: Horton, Sussex, Windsor, Mabou, Cumberland and Pictou (Figure 6). These carboniferous sedimentary rocks have a continental origin, except for the Windsor Group, which has a marine origin (Rivard et al., 2008b). The Hiram Brook Member and the Frederick Brook Member, belonging to the Albert Formation of the Horton Group, are targeted for natural gas. The Hiram Brook Member is mainly composed of tight sandstone to minor coarse conglomerate interbedded by shale and siltstone (Hinds et al., 2006). The Frederick Brook Member is mainly an organic-rich shale with minor sandstone, siltstone, conglomerate and limestone (Hinds et al., 2006). The Sussex Group, overlying the Horton Group, is a red sandstone with inter-beds of conglomerate and shale. Above, the Windsor Group is a carbonate formation including limestone interbedded with gypsum, anhydrite, halite and potash deposits with mudstone and conglomerate (Hinds et al., 2006). In the McCully area, a structural salt dome is present at a depths of about 500 to 1 100 m. This dome contains potash deposits that were exploited until late 2015. The Mabou Group consists of conglomerate, sandstone and mudstone (Hinds et al., 2006) and hosts, in its upper part, the regional fractured rock aquifer.



Figure 6. Local rock geology (St. Peter et al., 2009)

## 4 FIELDWORK

To better characterize the hydrogeological system, 10 monitoring wells were drilled (see Figure 1): PO-01 to PO-06 in 2015 and PO-7 to PO-10 in 2016. The last 4 wells were diamond-drilled to have core samples for various analyses. Each borehole was equipped with a datalogger to record water-level fluctuations every 15 min, even the flowing artesian well (PO-02). Barometric and water level data are downloaded four times a year. A few additional water levels were obtained from 11 residential wells. Geophysical logging was performed to obtain data on the fracture network, except in PO-08 and PO-10 whose walls had collapsed. A visual inspection of core samples showed that some of the wells (e.g. PO-08) are highly fractured. Some of the core samples will be sent to a laboratory for porosity and permeability measurements.

Pneumatic slug tests were carried out in 8 of the monitoring wells to estimate hydraulic conductivity of the upper part of the rock aquifer (< 80 m depth). Guelph permeameter tests were also carried out to assess the hydraulic conductivity (K) of the dominant surficial sediment units (locations shown in Figure 1). Since tills are widespread in this region (Figure 2), they were targeted for the 20 sites (3 tests per site). Tests were conducted at depths ranging between 0.22 and 0.80 m. In addition, soil was sampled at each of these sites for grainsize analyses.

Groundwater is sampled in the 10 monitoring wells every 4 months for chemical analyses including alkanes (methane, ethane, propane) and methane isotopes for the geochemical study. A structural survey was also carried out to obtain more information on fractures.

#### 5 RESULTS

#### 5.1 Hydraulic conductivity

Results obtained from permeameter tests for till units (Figure 7), as well as results obtained for different sites supposedly belonging to a same unit, exhibit a relative heterogeneity of K values at site scale, especially for the Boss Point and Brown's Flat units. Nevertheless, median K values for the different tills are all comprised between  $4.6 \times 10^{-6}$  and  $1.8 \times 10^{-5}$  m/s, providing a median value for the entire set of  $8 \times 10^{-6}$  m/s. These values corroborate the soil descriptions. Tills are mainly sandy, but present local variations of grain size – and K – according to their fine (silt and loam) and coarse (gravel) material content.



Figure 7. Boxplot of hydraulic conductivity values of main till units. Median values are provided for each unit in m/s

Lithological well logs from monitoring wells corroborated the description of Hinds et al. (2006) with core samples mainly composed of siltstone, sandstone, mudstone and conglomerates. Slug tests were interpreted using 2 solutions adapted to unconfined aquifers: Bouwer and Rice (Bouwer, 1989) and KGS (Hyder et al., 1994) models. Although PO-2 is flowing artesian, this well is unconfined, being located at the bottom of the valley and influenced by a vertical hydraulic gradient related to topographic highs. Values obtained with both methods are similar. K values range from  $9.4 \times 10^{-7}$  to  $1.5 \times 10^{-4}$  m/s, with a median value of  $1.8 \times 10^{-5}$  m/s (Table 1), showing that the Mabou sandstone can be relatively to very permeable.

Table 1. Slug test results

	Mean values of K (m/s)							
WeilID	Bouwer and Rice	KGS	Mean					
PO-01	1.2E-05	2.8E-05	2.0E-05					
PO-03	1.3E-04	1.6E-04	1.5E-04					
PO-04	1.5E-05	1.6E-05	1.6E-05					
PO-05 <sup>1</sup>	1.0E-06	1.5E-06	1.2E-06					
PO-06	5.6E-05	5.5E-05	5.5E-05					
PO-07	1.1E-05	1.0E-05	1.1E-05					
PO-10	1.1E-06	8.2E-07	9.4E-07					
ID-39528 <sup>2</sup>	5.3E-05	7.3E-05	6.3E-05					
Median	1.3E-05	2.2E-05	1.8E-05					

<sup>1</sup>Only one slug test carried out in this well

<sup>2</sup>Water supply well of Corridor Resources close to PO-03

#### 5.2 Piezometric map

The development of the piezometric map follows the methodology presented in Lefebvre et al. (2012) and Comeau (2009). The first step is related to the rejection of abnormal data from the provincial well database (2 603 wells). A median value for the water level was calculated when several wells had the same geographic coordinates. Other discrepancies have also led to the removal of the wells: 1) various well coordinates for the same well ID, 2) lack of well coordinates and 3) non-flowing artesian wells (as stated in the database) with water level above ground surface. With the addition of the GSC wells, a total of 1 390 data points (observation points) were used.

Despite the imperfect spatial distribution of these data, a first interpolation was carried out using ordinary kriging  $(OK_{op})$  in the AR2GEMS software (Remy et al., 2009).

This preliminary piezometric map revealed that the groundwater flow system is strongly correlated with the surface water network. However, the OKop does not provide realistic results over topographic highs, and all minor streams appear disconnected from the water table, as can be seen from the cross-section of Figure 8 (red line). These observations are reinforced by the strong correlation between the digital elevation model (DEM) and hydraulic heads (R=0.979) measured in domestic wells, as well as between river/brook bed elevation and water table data from wells located within a buffer zone of 100 m from this water course (R=0.976). Based on these correlations, 1 183 river bed elevations (imposed points) were extracted from the DEM and 28 synthetic points were added according to the correlation between the DEM and the water table data to provide data in areas where few or no wells were available.



Figure 8. Topography and estimated water table profiles from 3 interpolation methods along cross-section CC' (see Figure 1). OK: ordinary kriging. KED: kriging with external drift. op: wells only. all: wells, rivers and synthetic levels.



Figure 9. Piezometric maps with areas where water table exceeds the DEM (grey shades) for the three interpolation methods. The precision of the DEM is 2.5 m

Ordinary kriging (OK<sub>all</sub>) was then applied with the new enlarged set of data (2 601 points). The addition of the river water levels and of the 28 artificial control points added in the process improved the appearance of the water table (green line in Figure 8) compared to the initial  $OK_{op}$ . Nonetheless, Figure 8 shows that in higher topographic areas, the water table elevation is still greatly underestimated and that the majority of minor streams appear disconnected.

To improve the representation of the flow system, kriging with external drift (KED<sub>all</sub>) using topography as a secondary variable was used. Figure 8 shows that this method "forces" the water table to remain close to the ground surface and that all water courses are connected to the water table (blue line), in agreement with the correlations presented above and field observations. The accuracy of the interpolation method was assessed, among other things, using a comparison between estimated hydraulic head elevations and topography, similarly to Guekie simo et al. (2015). Figure 9 presents the areas where the interpolated water table exceeds the DEM for the three kriging methods. When considering the precision of the DEM (2.5 m), the area that appears to have an unrealistically high water table (above ground surface, shown in grey) decreases significantly with the

use of an external drift: 16.7, 10.3 and 3.8% for  $OK_{op}$ ,  $OK_{all}$  and  $KED_{all}$ , respectively. A cross-validation was also performed with results from  $KED_{all}$  and it showed a very good correlation between estimated and observed water levels (Figure 10). For all these reasons, kriging with external drift was retained for the final piezometric map (Figure 11).







Figure 11. Piezometric map estimated by kriging with external drift

#### 5.3 Numerical flow model

A preliminary 2-D numerical model was developed to represent the hydrogeological system. Cross-section AA' shown in Figure 1 is 8.55 km long and 1 500 m deep and goes through the McCully gas field area. The finite elements simulator FLONET (Molson et al., 2014) was used to compute groundwater streamflow and hydraulic heads under steady state. FLONET was selected due to its accuracy, robustness and efficiency.

The simplified surficial sediment cover used in the preliminary model is composed of a 8 m layer of tills based on the median value compiled by Rivard et al. (2008a) and an alluvial deposit in the Kennebecasis valley. The rock geology mainly comprises the Mabou and Windsor groups, as well as a very small part of the Cumberland Group to the north-west. The boundary between the Windsor Group and the Sussex Group (not represented in the model) was considered as impermeable since the first one consists of low permeable

lithology at a considerable depth where the open fractures are considered insignificant. Flow boundary conditions are presented in Figure 12.



Figure 12. Flow boundary conditions of the 2-Dxz model

Since hydraulic conductivities are known only for the upper part of the bedrock, and based on the fact that very few fractures are open below ~100 m (Francis et al., 1988), K values were gradually reduced at depth. As shown in Figure 13, a horizontal hydraulic conductivity (K<sub>x</sub>) of  $5x10^{-6}$  m/s was applied for the upper part of the Mabou Group (Rivard et al., 2008a), while  $5x10^{-10}$  m/s was used at the base. The Windsor Group represents the base of the model and a quasi-impermeable layer (K<sub>x</sub> =  $6x10^{-11}$  m/s). Vertical hydraulic conductivity (K<sub>z</sub>) of the bedrock corresponds to K<sub>x</sub>/100.







Figure 14. Preliminary results of the 2-D<sub>xz</sub> model

Figure 14 shows results of the steady-state simulation when the water table elevation is fixed as equivalent to the topography. As expected, the highest values of hydraulic heads are encountered in topographic highs and the Kennebecasis River acts as the main drain in this hydrogeological system. The model provides a first assessment of the recharge (338 mm/y). Most of the flow (> 99%) occurs within the first 100 m of the rock aquifer.

Results of a sensitivity analysis revealed a significant influence of the till hydraulic conductivity on the recharge rate. As the values of K and till thickness come from several previous studies and estimates from the provincial database, this preliminary 2D<sub>xz</sub> model requires additional sensitivity scenarios. Several improvements are planned in the following months, including modifying boundary conditions, rock aquifer hydraulic conductivities and surficial deposit K and thickness.

### 6 CONCLUSION AND FUTURE WORK

Due to the dominant surficial sediment cover (relatively thin sandy till) and the nature of the Mabou Group, mainly composed of sandstone, the fractured rock aquifer is unconfined. The preliminary 2-D flow model showed that most of the groundwater flow occurs within the first 100 m of the rock aquifer where almost all the residential wells are located. Groundwater flow is topography-driven and recharge areas are located in topographic highs, while rivers and brooks correspond to discharge zones.

In the next few months, recharge rates will be using: 1) recession curves from well estimated hydrographs coupled with a simplified water balance with the code WHAT (Gosselin, 2016), 2) baseflows from river hydrographs and 3) quasi 2-D infiltration software HELP (Schroeder et al., 1994). In addition, the 2-D<sub>xz</sub> model will be improved and calibrated with additional field and laboratory data, including grain-size analyses of soil samples and core sample analyses ("plugs") to obtain porosity and K values. A second 2-Dxz model will be developed in the Elgin area (see cross-section BB' in Figure 1). A 3-D numerical model will also be developed, based on the understanding gained from the 2-Dxz models, to obtain more insights into the hydrodynamics of this system. In order to complete the hydrogeological characterization of the area, the DRASTIC index (Aller et al., 1987) will be used to assess the aquifer vulnerability to surface contamination. This work will contribute to support the sustainable management of the aquifers in a region where hydrocarbons are exploited.

#### REFERENCES

- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J., Petty, R. et Hacket, G. 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution using hydrological settings, Environmental Protection Agency, U.S.A.
- Bouwer, H. 1989. The Bouwer and Rice slug test—An update, *Ground Water*, 27(3): 304-309.
- Brinsmead, R.A. et Finamore, P.F. 1977. Aggregate ressources of the Sussex map area (21H/12) and part

of the Hampstead map area (21G/9E) including surficial geology of Sussex East (21H/12E), New Brunswick Department of Natural Resources, Mineral Resources Branch, New Brunswick.

- Comeau, G. 2009. Caractérisation hydrogéologique et bilan en eau à la base des Forces canadiennes de Petawawa, Ontario, Canada, Institut national de la recherche scientifique, Québec.
- Francis, R.M. et Gale, J.E. 1988. Permeability distribution in a fractured sedimentary aquifer system International Association of Hydrogeologists (IAH)-Canadian National Chapter (CNC), Proceedings, Atlantic region, Halifax, Nova Scotia, May 1988: 72-79.
- GC. 2010. *Canadian climate normals,* Environment and natural resources of Canada, Ottawa.
- Gosselin, J.S. 2016. Estimation de la recharge à partir de séries temporelles de la température du sol, des niveaux d'eau dans les puits et de données météorologiques : développement méthodologique et évaluation de l'incertitude, Institut national de la recherche scientifique, Québec.
- Guekie simo, A.T., Marache, A., Lastennet, R. et Breysse, D. 2015. Geostatistical investigations for suitable mapping of the water table: the Bordeaux case (France), *Hydrogeology Journal*, 24(1): 231-248.
- Hinds, S.J. et St. Peter, C.J. 2006. Stratigraphy and structure of the Moncton Subbasin in the Urney– Waterford area, Maritimes Basin, New Brunswick: implications for the McCully Natural Gas Field, New Brunswick Department of Natural Resources; Minerals, Policy and Planning Division, New Brunswick.
- Hyder, Z., Butler Jr, J.J., McElwee, C.D. et Liu, W. 1994. Slug tests in partially penetrating wells, *Water Resources Research*, 30(11): 2945-2957.
- Jackson, R.E., Gorody, A.W., Mayer, B., Roy, J.W., Ryan, M.C. et Van Stempvoort, D.R. 2013. Groundwater protection and unconventional gas extraction: the critical need for field-based hydrogeological research, *Ground Water*, 51(4): 488-510.
- Ladevèze, P., Rivard, C., Lefebvre, R., Lavoie, D., Parent, M., Malet, X., Bordeleau, G. et Gosselin, J. 2016. *Travaux de caractérisation hydrogéologique dans la plateforme sédimentaire du Saint-Laurent, région de Saint-Édouard-de-Lotbinière, Québec,* Commision Géologique du Canada, Québec, Canada.
- Lange, T., Sauter, M., Heitfeld, M., Schetelig, K., Brosig, K., Jahnke, W., Kissinger, A., Helmig, R., Ebigbo, A. et Class, H. 2013. Hydraulic fracturing in unconventional gas reservoirs: risks in the geological system part 1, *Environmental Earth Sciences*, 70(8): 3839-3853.
- Lavoie, D., Pinet, N., Bordeleau, G., Ardakani, O.H., Ladevèze, P., Duchesne, M.J., Rivard, C., Mort, A., Brake, V. et Sanei, H. 2016. The Upper Ordovician black shales of southern Quebec (Canada) and their significance for naturally occurring hydrocarbons in shallow groundwater, *International Journal of Coal Geology*, 158(2016): 44-64.
- Lefebvre, R. 2017. Mechanisms leading to potential impacts of shale gas development on groundwater quality, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 4(1): 1-15.

- Lefebvre, R., Carrier, M.-A., Tremblay, L., Gagné, S., Benoit, N. et Rivard, C. 2012. *Protocole pour la préparation des Livrables 19 et 20 - Piézométrie,* INRS, Centre Eau Terre Environnement, Québec.
- Molson, J. et Frind, E. 2014. FLONET/TR2. A Two-Dimensional Simulator for Groundwater Flownets, Contaminant Transport and Residence Time, Université Laval and University of Waterloo, Quebec.
- NRCAN. 2000. GeoBase Land Cover, circa 2000-Vector (LCC2000-V), Natural resources Canada, Ottawa.
- Pronk, A.G., Allard, S. et Boldon, R. 2005. Surface materials of the Sussex map area (NTS 21 H/12), southeastern New Brunswick, New Brunswick Department of Natural Resources, Minerals, Policy and Planning Division, New Brunswick.
- Rampton, V.N., Gauthier, R.C., Thibault, J. et Seaman, A.A. 1984. *Quaternary geology of New Brunswick,* Commision Géologique du Canada, Ottawa.
- Raynauld, M., Peel, M., Lefebvre, R., Molson, J.W., Crow, H., Ahad, J.M., Ouellet, M. et Aquilina, L. 2016. Understanding shallow and deep flow for assessing the risk of hydrocarbon development to groundwater quality, *Marine and Petroleum Geology*, 78(728-737.
- Remy, N., Boucher, A. et Wu, J. 2009. *Applied* geostatistics with SGeMS: A user's guide, Cambridge University Press, Cambridge.
- Rivard, C., Michaud, Y., Deblonde, C., Boisvert, V., Carrier, C., Morin, R., Calvert, T., Vigneault, H., Conohan, D. et Castonguay, S. 2008a. Canadian groundwater inventory: Regional hydrogeological characterization of the south-central part of the maritimes basin, *Bulletin of the Geological Survey of Canada*, 589): 1-96.
- Rivard, C., Michaud, Y., Lefebvre, R., Deblonde, C. et Rivera, A. 2008b. Characterization of a Regional Aquifer System in the Maritimes Basin, Eastern Canada, *Water Resources Management*, 22(11): 1649-1675.
- Schroeder, P.R., Dozier, T.S., Zappi, P.A., McEnroe, B.M., Sjostrom, J.W. et Peyton, R.L. 1994. The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model: engineering documentation for version 3, Environmental Protection Agency, U.S.A.
- Séjourné, S. 2017. Caprock integrity of the Carboniferous Frederick Brook Shale analyzed by oil and gas well logs: McCully gas field and Elgin area, New Brunswick, Geological Survey of Canada, Ottawa, Canada.
- St. Peter, C.J. et Johnson, S.C. 2009. Stratigraphy and structural history of the late Paleozoic Maritimes Basin in southeastern New Brunswick, Canada, New Brunswick Department of Natural Resources; Minerals, Policy and Planning Division, New Brunswick.
- Talbot Poulin, M.C., Comeau, G., Tremblay, Y., Therrien, R., Nadeau, M.M., Lemieux, J.M., Molson, J., Fortier, R., Therrien, P., Lamarche, L., Donati-Daoust, F. et Bérubé, S. 2013. Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire de la Communauté métropolitaine de Québec, Rapport final, Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, Québec.

# ANNEXE XI - FICHIERS DE TRAVAIL (SIG)

L'annexe XI répertorie la liste des fichiers de travail du Système d'information Géographique (SIG) générés avec le logiciel ArcGIS at ayant permis de réaliser l'ensemble des cartes visualisables dans la section 9 du mémoire.

Tous ces fichiers sont joints à l'annexe électronique de ce mémoire aux formats « shapefile » ou « raster ». La nomenclature utilisée, également disponible en version Excel, permet à l'utilisateur de facilement retrouver le ou les fichier(s) souhaité(s).

# Tableau XI.1 – Liste des fichiers SIG créés dans le cadre du projet (1/4).

Paramètre	Source	Fichier Raster	Fichier Polygones	Fichier Points	Fichier Lignes	Échelle
Couverture du sol	Couverture du sol. circa 2000-vectorielle - Agriculture et Agroalimentaire Canada - 2008	c s a	Couverture Sol Global			Global
Couverture du sol	Couverture du sol, circa 2000-vectorielle - Agriculture et Agroalimentaire Canada - 2008	csb	Couverture Sol Bassins			Bassins
Couverture du sol	Couverture du sol, circa 2000-vectorielle - Agriculture et Agroalimentaire Canada - 2008	csk	Couverture Sol Kennebecasis			BV Kennebecasis
Couverture du sol	Couverture du sol, circa 2000-vectorielle - Agriculture et Agroalimentaire Canada - 2008	C S D	Couverture Sol Pollet			BV Pollett
Indice de surface foliaire (LAI)	Cf Excel Indice Surface Foliaire	lai ini k		LAL Kennebecasis Pts		BV Kennebecasis
Indice de surface foliaire (LAI)	Cf Excel Indice Surface Foliaire	lai ini p		I AL Pollett Pts		BV Pollett
Indice de surface foliaire (LAI)	Cf Excel Indice Surface Foliaire	lai mod k		I Al Kennebecasis Pts		BV Kennebecasis
Indice de surface foliaire (LAI)	Cf Excel Indice Surface Foliaire	lai mod p		I AL Pollett Pts		BV Pollett
Cultures	Inventaire annuel des cultures - Agriculture et Agroalimentaire Canada - 2016	с а	Cultures Global			Global
Cultures	Inventaire annuel des cultures - Agriculture et Agroalimentaire Canada - 2018	c_g	Cultures Kennebecasis			BV Kennebecasis
Cultures	Inventaire annuel des cultures - Agriculture et Agroalimentaire Canada - 2019	с <u>р</u>	Cultures Pollett			BV Pollett
Profondeur d'évaporation	Cf. Excel Profondeur, EVP	o_p n evn ini k		Profondeur EVP Kennebecasis Pts		BV Kennebecasis
Profondeur d'évaporation	Cf Excel Profondeur EVP	p_evp_ini_r		Profondeur EVP Pollett Pts		BV Pollett
Profondeur d'évaporation	Cf. Excel Profondeur, EVP	p_evp_mod_k		Profondeur EVP Kennebecasis Pts		BV Kennebecasis
Profondeur d'évaporation	Cf Excel Profondeur_EVP	p_evp_mod_n		Profondeur EVP Pollett Pts		BV Pollett
Évapotranspiration	HEI P	evnsk		EVP Kennebecasis Sussex Pts		BV Kennebecasis
Recharge	HELP	rsk		R Kennehecasis Sussex Pts		BV Kennebecasis
Ruissellement hypodermique	HELP	rhsk		RH Kennebecasis Sussex Pts		BV Kennebecasis
Ruissellement de surface	HELP	rssk		RS Kennebecasis Sussex Pts		BV Kennebecasis
Évapotranspiration	HELP			EVP Pollett Sussex Pts		BV Pollett
Recharge	HELP	rs p		R Pollett Sussex Pts		BV Pollett
Ruissellement hypodermique	HELP	rhsn		RH Pollett Sussex Pts		BV Pollett
Ruissellement de surface	HELP	rssn		RS Pollett Sussex Pts		BV Pollett
Évapotranspiration	HELP	evn ms n		EVP Pollett Mechanic Pts		BV Pollett
Recharge	HELP	r ms n		R Pollett Mechanic Pts		BV Pollett
Ruissellement hypodermique	HELP	rh ms n		RH Pollett Mechanic Pts		BV Pollett
Ruissellement de surface	HELP	rs ms n		RS Pollett Mechanic Pts		BV Pollett
Recharge nulle	Cf. Excel Recharge Nulle	rn k	Recharge Nulle Kennebecasis	Recharge Nulle Kennebecasis Pts		BV Kennebecasis
Recharge nulle	Cf Excel Recharge Nulle	rn p	Recharge Nulle Pollett	Recharge_nulle_Pollett_Pts		BV Pollett
Grille	HELP	p	Grille HELP	Grille HELP Pts		Global
Grille	HELP			Grille HELP Kennebecasis Pts		BV Kennebecasis
Grille	HELP			Grille HELP Pollet Pts		BV Pollett
Pente du drain	Cf. Excel Pente Drain	pdk		Pente Drain Kennebecasis Pts		BV Kennebecasis
Pente du drain	Cf. Excel Pente Drain	a b a		Pente Drain Pollett Pts		BV Pollett
Distance de drainage	Cf. Excel Distance Drainage	d d k		Distance Drainage Kennebecasis Pts		BV Kennebecasis
Distance de drainage	Cf. Excel Distance Drainage	a b b		Distance Drainage Pollett Pts		BV Pollett
Couverture du sol	Couverture du sol, circa 2000-vectorielle - Agriculture et Agroalimentaire Canada - 2008	C S O	Couverture Sol Original			Original
Cultures	Inventaire annuel des cultures - Agriculture et Agroalimentaire Canada - 2016	 c o	Cultures Original			Original
Utilisation du sol	Cf. Excel Curve Number	u s o	Utilisation Sol Original			Original
Utilisation du sol	Cf. Excel Curve Number	us g	Utilisation Sol Global	Utilisation Sol Global Pts		Global
Utilisation du sol	Cf. Excel Curve Number	u s k	Utilisation Sol Kennebecasis	Utilisation Sol Kennebecasis Pts		BV Kennebecasis
Utilisation du sol	Cf. Excel Curve Number	u s p	Utilisation Sol Pollett	Utilisation Sol Pollett Pts		BV Pollett
Utilisation du sol	Cf. Excel Curve Number		Utilisation Sol Bassins			Bassins
Pente	Cf. Excel Curve Number	pg		Pente Global Pts		Global
Pente	Cf. Excel Curve Number	p k		Pente Kennebecasis Pts		BV Kennebecasis
Pente	Cf. Excel Curve Number	рр		Pente Pollett Pts		BV Pollett
Pédologie	Experimental Farms Service - Ottawa - 1948 & Aalund et Wicklund - 1972		Pedologie Sol Global			Global
Classes pédologiques	Cf. Excel Curve Number	cpq		Classes Pedologiques Global Pts		Global
Classes pédologiques	 Cf. Excel Curve_Number	c_p_k		Classes_Pedologiques Kennebecasis Pts		BV Kennebecasis
Classes pédologiques	Cf. Excel Curve Number	срр		Classes Pedologiques Pollett Pts		BV Pollett
Groupes hydrologiques	Cf. Excel Curve Number	ghg		Groupes Hydrologiques Global Pts		Global
Groupes hydrologiques	Cf. Excel Curve Number	g h k		Groupes Hydrologiques Kennebecasis Pts		BV Kennebecasis
Groupes hydrologiques	Cf. Excel Curve Number	g h p		Groupes Hydrologiques Pollett Pts		BV Pollett
Coefficient de ruissellement	Cf. Excel Curve Number	crg		Coefficient Ruissellement Kennebecasis Pts		Global
Coefficient de ruissellement	 Cf. Excel Curve_Number	c_r_k		Coefficient_Ruissellement Kennebecasis Pts		BV Kennebecasis
Coefficient de ruissellement	Cf. Excel Curve Number	crp		Coefficient Ruissellement Pollett Pts		BV Pollett
	_					

Tableau XI.2 – Liste des fichiers SIG créés dans le cadre du projet (2/4).

Paramètre	Source	Fichier Raster	Fichier Polygones	Fichier Points	Fichier Lignes	Échelle
Granulométrie	Études du Gouvernement du NB		,,,	Granulométrie GNB Pts		Global
Dépôts meubles	Gouvernement du NB - Pronk et al 2005		Depots Meubles Global			Global
Dépôts meubles	Cf. Excel Depots Meubles	dmg		Depots Meubles Global Pts		Global
Dépôts meubles	Cf. Excel Depots Meubles	d m k		Depots Meubles Kennebecasis Pts		BV Kennebecasis
Dépôts meubles	Cf. Excel Depots_Meubles	 d_m_p		Depots_Meubles_Pollett_Pts		BV Pollett
Dépôts meubles	Cf. Excel Depots_Meubles		Tills_Global			Global
Dépôts meubles	Cf. Excel Depots_Meubles	t_g		Tills_Global_Pts		Global
Dépôts meubles	Cf. Excel Depots_Meubles	t_k		Tills_Kennebecasis_Pts		BV Kennebecasis
Dépôts meubles	Cf. Excel Depots_Meubles	t_p		Tills_Pollett_Pts		BV Pollett
Géologie du roc	Gouvernement du NB - Barr et al 2005		Roc_Global			Global
Géologie du roc	Cf. Excel Géologie	r_g		Roc_Global_Pts		Global
Géologie du roc	Cf. Excel Géologie	r_k		Roc_Kennebecasis_Pts		BV Kennebecasis
Géologie du roc	Cf. Excel Géologie	r_p		Roc_Pollett_Pts		BV Pollett
Géologie du roc	Cf. Excel Géologie		Type_Roche_Global			Global
Géologie du roc	Cf. Excel Géologie	t_r_g		Type_Roche_Global_Pts		Global
Géologie du roc	Cf. Excel Géologie	t_r_k		Type_Roche_Kennebecasis_Pts		BV Kennebecasis
Géologie du roc	Cf. Excel Géologie	t_r_p		Type_Roche_Pollett_Pts		BV Pollett
Géologie du roc	Cf. Excel Géologie		Groupes_Majeurs_Global			Global
Géologie du roc	Cf. Excel Géologie	g_m_g		Groupes_Majeurs_Global_Pts		Global
Géologie du roc	Cf. Excel Géologie	g_m_k		Groupes_Majeurs_Kennebecasis_Pts		BV Kennebecasis
Géologie du roc	Cf. Excel Géologie	g_m_p	_	Groupes_Majeurs_Pollett_Pts		BV Pollett
Géologie du roc	Cf. Excel Géologie		Roches_Cristallines_Bassins			Bassins
Failles	Géologie du substrat rocheux - Ministère des ressources naturelles du NB - 2008				Failles_Majeures_Bassins	Bassins
Topographie	Modèle numérique de terrain - Gouvernement du NB - 2002	mnt_g		MNT_Global_Pts		Global
Topographie	Modèle numérique de terrain - Gouvernement du NB - 2002	mnt_k		MNT_Kennebecasis_Pts		BV Kennebecasis
Topographie	Modèle numérique de terrain - Gouvernement du NB - 2002	mnt_p		MNT_Pollett_Pts		BV Pollett
Topographie	Modèle numérique de terrain - Gouvernement du NB - 2002	p_o				Original
Topographie	Modèle numérique de terrain - Gouvernement du NB - 2002	mnt_o_g		MNT_Ombre_Global_Pts		Global
Topographie	Modèle numérique de terrain - Gouvernement du NB - 2002	mnt_o_k		MNI_Ombre_Kennebecasis_Pts		BV Kennebecasis
	Modele numerique de terrain - Gouvernement du NB - 2002	mnt_o_p		MN1_Ombre_Pollett_Pts	MNT Or the or 50 to Olah di	BV Pollett
Topographie	Modele numerique de terrain - Gouvernement du NB - 2002				MNT_Contours_50m_Global	Global
Topographie	Modèle numérique de terrain - Gouvernement du NB - 2002				MNT_Contours_50m_Rennebecasis	BV Kennebecasis
l'opographie	Modele numerique de terrain - Gouvernement du NB - 2002		Obamas Osaiam Olabal		MINT_Contours_50m_Pollett	BV Pollett
Limites	Limites provinciales. Conversement du NP. 2005		Limite Province			Brovinco
Cadastro	Carte andestrole numérique. Conversement du NP 2003					Clobal
Cadastro	Carte cadastrale numérique - Gouvernement du NB - 2017		Cadastre_Global			Bassing
Cadastre	Carte cadastrale numérique - Gouvernement du NB - 2017		Cadastre_Dassills			BV Konnobocasis
Cadastre	Carte cadastrale numérique - Gouvernement du NB - 2017		Cadastre_Nellite			BV Relinebecasis
Cantages protégés	Champs de cantage protégés - Gouvernement du NB - 2017		Cantages Proteges Global			Global
Infrastructures	Réseau ferroviaire national - Gouvernement du NB - 2015				Voies Ferres Global	Global
Infrastructures	Réseau routier du Nouveau-Brunswick - Gouvernement du NB - 2017				Routes Global	Global
Hydrologie	Réseau hydrographique du Nouveau-Brunswick - Gouvernement du NB - 2014		Bassins		100000_01000	Bassins
Hydrologie	Réseau hydrographique du Nouveau-Brunswick - Gouvernement du NB - 2014		Bassin Kennebecasis			BV Kennebecasis
Hydrologie	Réseau hydrographique du Nouveau-Brunswick - Gouvernement du NB - 2014		Bassin Pollett			BV Pollett
Hydrologie	Orthophotos cartes SNB (1996-2002) - Gouvernement du NB - 2002		Baje Fundy Global			Global
Hydrologie	Orthophotos cartes SNB (1996-2002) - Gouvernement du NB - 2002		Lacs Majeurs Global			Global
Hydrologie	Réseau hydrographique du Nouveau-Brunswick - Gouvernement du NB - 2014				Rivieres Global	Global
Hydrologie	Réseau hydrographique du Nouveau-Brunswick - Gouvernement du NB - 2014				Rivieres Majeures Global	Global
Hydrologie	Gouvernement du Canada - 2017			Stations Hydrometriques Global Pts		Global
Hydrologie	Gouvernement du Canada - 2017			Station Hydrometrique Apohagui Global Pts		Global
Météorologie	Gouvernement du Canada - 2017			Stations_Meteorologiques_Global Pts		Global
Météorologie	Gouvernement du Canada - 2017		Polygones_Thiessen_Global			Global
Météorologie	Gouvernement du NB - 2017			Station_Meteorologique_Parlee_Brook_Global_Pts		Global
Météorologie	Gouvernement du Canada - 2017			Stations_Meteorologiques_Sussex_Mechanic_Global_Pts		Global

Tableau XI.3 – Liste des fichiers SIG créés dans le cadre du projet (3/4).

Paramètre	Source	Fichier Raster	Fichier Polygones	Fichier Points	Fichier Lignes	Échelle
Coupes	Aucune source particulière				Coupe_Bassin	Bassins
Coupes	Aucune source particulière				Coupe_Kennebecasis	<b>BV Kennebecasis</b>
Coupes	Aucune source particulière				Coupe_Pollett	BV Pollett
Coupes	Aucune source particulière			Coupe_Bassin_Pts		Bassins
Coupes	Aucune source particulière			Coupe_Kennebecasis_Pts		BV Kennebecasis
Coupes	Aucune source particulière			Coupe_Pollett_Pts		BV Pollett
Coupes	Aucune source particulière				Coupes_Global	Global
Coupes	Modèle numérique de terrain - Gouvernement du NB - 2002			Sismique_MNT_Pollett_Pts		BV Pollett
Coupes	Cf. Excel Piézométrie			Sismique_Piezometrie_Pollett_Pts		BV Pollett
Coupes	Travaux en interne			Sismique_Interface_Sussex_Windsor_Pollett_Pts		BV Pollett
Coupes	Cf. Excel Epaisseur_Depots_Meubles			Sismique_Toit_Roc_Pollett_Pts		BV Pollett
Épaisseur dépôts meubles	Cf. Excel Epaisseur_Depots_Meubles	e_d_m_ko_g		Epaisseur_Depots_Meubles_KO_Global_Pts		Global
Épaisseur dépôts meubles	Cf. Excel Epaisseur_Depots_Meubles	e_d_m_ko_b				Bassins
Épaisseur dépôts meubles	Cf. Excel Epaisseur_Depots_Meubles		Etendues_Sans_Donnees_Global			Global
Épaisseur dépôts meubles	Cf. Excel Epaisseur_Depots_Meubles		Grille_Interpolation_Epaisseur_Depots_Meubles_Global			Global
Épaisseur dépôts meubles	Cf. Excel Epaisseur_Depots_Meubles	e_d_m_x_g		Epaisseur_Depots_Meubles_XVal_Interpoles_Global_Pts		Global
Épaisseur dépôts meubles	Cf. Excel Epaisseur_Depots_Meubles			Epaisseur_Depots_Meubles_XVal_Controle_Global_Pts		Global
Épaisseur dépôts meubles	Cf. Excel Epaisseur_Depots_Meubles			Epaisseur_Depots_Meubles_XVal_95_Global_Pts		Global
Épaisseur dépôts meubles	Cf. Excel Epaisseur_Depots_Meubles			Epaisseur_Depots_Meubles_XVal_5_Global_Pts		Global
Épaisseur dépôts meubles	Cf. Excel Epaisseur_Depots_Meubles			Epaisseur_Depots_Meubles_Synthetiques_Global_Pts		Global
Épaisseur dépôts meubles	Cf. Excel Epaisseur_Depots_Meubles			Epaisseur_Depots_Meubles_Observation_Global_Pts		Global
Épaisseur dépôts meubles	Cf. Excel Epaisseur_Depots_Meubles			Epaisseur_Depots_Meubles_Interpolation_Global_Pts		Global
Toit du roc	Aucune source particulière	a_t_r_g				Global
Toit du roc	Aucune source particulière	a_t_r_b				Bassins
Toit du roc	Aucune source particulière	r_a_g				Global
Toit du roc	Aucune source particulière	r_a_b				Bassins
Piézométrie	Cf. Excel Piézométrie			Piezometrie_Synthetiques_Global_Pts		Global
Piézométrie	Cf. Excel Piézométrie			Piezometrie_Observation_Global_Pts		Global
Piézométrie	Cf. Excel Piézométrie			Piezometrie_Imposes_Global_Pts		Global
Piézométrie	Cf. Excel Piézométrie			Piezometrie_Interpolation_Global_Pts		Global
Piézométrie	Cf. Excel Piézométrie			Piezometrie_XVal_95_KDEpopips_KOpopips_Global_Pts		Global
Piézométrie	Cf. Excel Piézométrie			Piezometrie_XVal_5_KDEpopips_KOpopips_Global_Pts		Global
Piézométrie	Cf. Excel Piézométrie			Piezometrie_XVal_95_KOpo_Global_Pts		Global
Piézométrie	Cf. Excel Piézométrie			Piezometrie_XVal_5_KOpo_Global_Pts		Global
Piézométrie	Cf. Excel Piézométrie		Grille_Interpolation_Piezometrie_Global			Global
Piézométrie	Cf. Excel Piézométrie			MNT_Piezometrie_KDEpopips_Pts		Global
Piézométrie	Cf. Excel Piézométrie	p_kdepois_g		Piezometrie_KDEpopips_Global_Pts		Global
Piézométrie	Cf. Excel Piézométrie	p_kdepois_b				Bassins
Piezométrie	Cf. Excel Piezométrie	p_kdepois_z_g				Global
Piezometrie	Cf. Excel Piezometrie	p_kdepois_z_b				Bassins
		p_kaepois_p_g				Giobal
Piezometrie	U. EXCEL PIEZOMETRE	p_kaepois_p_b		Diazamatria (/DEnonina X)/cl. Interpolati Olabel Di		Bassins
Plezometrie	Cf. Excel Piezometrie	p_kaepois_x_g		Piezometrie_KDEpopips_XVal_Interpoles_Global_Pts		Global
riezometrie Diózomótrie	UI. EXUEI FIEZUIIIEUIIE Of Excel Diázomátria	n kong g		Piezometrie_KDEpopips_Aval_Controle_Global_P(S		Global
Piezométrie	CI. Excel Piezometrie	p_kopo_g		Plezometrie_ROpo_Global_Pts		Giobal
Piezométrio	Cf. Excel Piezométria	p_kopo_z_a				Global
Diázomátria		$p_{x0p0_z_y}$				Bassine
Piézométrie	Cf. Excel Piezométrie	p_kopo_z_b				Global
Piézométrie	Cf. Excel Piézométrie	p_wopo_p_g				Bassins
Piézométrie	Cf. Excel Piézométrie	p_kopo_p_b		Piezometrie KOno XV/al Interpoles Global Pts		Global
Piézométrie	Cf. Excel Piézométrie	р_коро_х_д		Piezometrie KOno XVal Controle Global Pts		Global
Piézométrie	Cf Excel Piézométrie	n konois a		Piezometrie KOpopins Global Pts		Global
Piézométrie	Cf. Excel Piézométrie	p_kopois_g				Bassins
Piézométrie	Cf. Excel Piézométrie	p kopois z a				Global
Piézométrie	Cf. Excel Piézométrie	p kopois z b				Bassins
Piézométrie	Cf. Excel Piézométrie	p kopois p a				Global
Piézométrie	Cf. Excel Piézométrie	p kopois p b				Bassins
		r				

Tableau XI.4 – Liste des fichiers SIG créés dans le cadre du projet (4/4).	

Paramètre	Source	Fichier Raster	Fichier Polygones	Fichier Points	Fichier Lignes	Échelle
Piézométrie	Cf. Excel Piézométrie	p_kopois_x_g		Piezometrie_KOpopips_XVal_Interpoles_Global_Pts		Global
Piézométrie	Cf. Excel Piézométrie			Piezometrie KOpopips XVal Controle Global Pts		Global
Piézométrie	Cf. Excel Piézométrie			Piezometrie KDEpopips PZ MNT Bassins Pts		Bassins
Piézométrie	Cf. Excel Piézométrie			Piezometrie KOpopips PZ MNT Bassins Pts		Bassins
Piézométrie	Cf. Excel Piézométrie			Piezometrie KOpo PZ MNT Bassins Pts		Bassins
Puits	Aucune source particulière			Puits Eau Corridor Resources Pts		Global
Puits	Cf. Excel Puits Observation CGC			Puits Observation CGC Pts		Global
Puits	Base de données des puits d'alimentation en eau - Gouvernement du NB - 2016			Puits Eau GNB 1 Piezometrie Initiale Pts		Global
Puits	Base de données des puits d'alimentation en eau - Gouvernement du NB - 2016			Puits_Eau_GNB_2_Piezometrie_Initiale_Pts		Global
Puits	Cf. Excel Puits Eau GNB			Puits Eau GNB Piezometrie Finale Pts		Global
Puits	Cf. Excel Puits Observation GNB			Puits Observation GNB Pts		Global
Forages	Cf. Excel Forages Gaziers GNB			Forages Gaziers GNB Pts.shp		Global
Forages	Cf. Excel Forages Gaziers Corridor Resources			Forages Gaziers Corridor Resources Pts.shp		Global
Terrain	Cf. Excel Flux			Terrain Flux Pts		Global
Terrain	Cf. Excel Slug Tests			Terrain Slug Tests		Global
Terrain	Cf. Excel Permeametres Guelph			Terrain Permeametres Guelph		Global
Terrain	Cf. Excel Analyses Rivieres			Terrain Analyses Rivieres		Global
Terrain	Cf. Excel Puits Domestiques			Terrain Puits Domestiques		Global
Vulnérabilité intrinsèque	Cf. Excel DRASTIC			Grille DRASTIC Kennebecasis Pts		BV Kennebecasis
Vulnérabilité intrinsèque	Cf. Excel DRASTIC			Grille DRASTIC Pollett Pts		BV Pollett
Vulnérabilité intrinsèque	Cf. Excel DRASTIC	vn_k	Vulnerabilite_Nulle_Kennebecasis			BV Kennebecasis
Vulnérabilité intrinsèque	Cf. Excel DRASTIC	vn_p	Vulnerabilite_Nulle_Pollett			BV Pollett
Vulnérabilité intrinsèque	Cf. Excel DRASTIC	drastic_k		DRASTIC_Kennebecasis_Pts		BV Kennebecasis
Vulnérabilité intrinsèque	Cf. Excel DRASTIC	drastic_p		DRASTIC_Pollett_Pts		BV Pollett
Vulnérabilité intrinsèque	Cf. Excel DRASTIC	d_drastic_k		D_DRASTIC_Kennebecasis_Pts		BV Kennebecasis
Vulnérabilité intrinsèque	Cf. Excel DRASTIC	d_drastic_p		D_DRASTIC_Pollett_Pts		BV Pollett
Vulnérabilité intrinsèque	Cf. Excel DRASTIC	r_drastic_k		R_DRASTIC_Kennebecasis_Pts		<b>BV Kennebecasis</b>
Vulnérabilité intrinsèque	Cf. Excel DRASTIC	r_drastic_p		R_DRASTIC_Pollett_Pts		BV Pollett
Vulnérabilité intrinsèque	Cf. Excel DRASTIC	a_drastic_k		A_DRASTIC_Kennebecasis_Pts		BV Kennebecasis
Vulnérabilité intrinsèque	Cf. Excel DRASTIC	a_drastic_p		A_DRASTIC_Pollett_Pts		BV Pollett
Vulnérabilité intrinsèque	Cf. Excel DRASTIC	s_drastic_k		S_DRASTIC_Kennebecasis_Pts		BV Kennebecasis
Vulnérabilité intrinsèque	Cf. Excel DRASTIC	s_drastic_p		S_DRASTIC_Pollett_Pts		BV Pollett
Vulnérabilité intrinsèque	Cf. Excel DRASTIC	t_drastic_k		T_DRASTIC_Kennebecasis_Pts		BV Kennebecasis
Vulnérabilité intrinsèque	Cf. Excel DRASTIC	t_drastic_p		T_DRASTIC_Pollett_Pts		BV Pollett
Vulnérabilité intrinsèque	Cf. Excel DRASTIC	i_drastic_k		I_DRASTIC_Kennebecasis_Pts		BV Kennebecasis
Vulnérabilité intrinsèque	Cf. Excel DRASTIC	i_drastic_p		I_DRASTIC_Pollett_Pts		BV Pollett
Vulnérabilité intrinsèque	Cf. Excel DRASTIC	c_drastic_c_k		C_DRASTIC_Conv_Kennebecasis_Pts		BV Kennebecasis
Vulnérabilité intrinsèque	Cf. Excel DRASTIC	c_drastic_c_p		C_DRASTIC_Conv_Pollett_Pts		BV Pollett
Vulnérabilité intrinsèque	Cf. Excel DRASTIC	c_drastic_m_k		C_DRASTIC_Mod_Kennebecasis_Pts		BV Kennebecasis
Vulnérabilité intrinsèque	Cf. Excel DRASTIC	c_drastic_m_p		C_DRASTIC_Mod_Pollett_Pts		BV Pollett
Vulnérabilité intrinsèque	Cf. Excel DAT	dat_jours_k		DAT_Kennebecasis_Pts		BV Kennebecasis
Vulnérabilité intrinsèque	Cf. Excel DAT	dat_jours_p		DAT_Pollett_Pts		BV Pollett
Vulnérabilité intrinsèque	Cf. Excel DAT_Nul	dat_n_k		DAT_Nul_Kennebecasis		BV Kennebecasis
Vulnérabilité intrinsèque	Cf. Excel DAT_Nul	dat_n_p		DAT_Nul_Pollett		BV Pollett
Réserve utile en eau	Cf. Excel RU	ru_moy_b		RU_Bassins_Pts		Bassins
Réserve utile en eau	Cf. Excel RU	ru_moy_k		RU_Ken_Pts		BV Kennebecasis
Reserve utile en eau	Ct. Excel RU	ru_moy_p		RU_Pol_Pts		BV Pollett
Hydrofaciès	Ct. Excel Hydrofacies		Hydrotacies_Bassins			Bassins
Puits	Aucune source particuliere			Putts_Observation_Complementaire_CGC_Pts		Global
Puits résidentiels	Ct. Excel Puits domestiques			Puits_Residentiels_Pts		Global
Reseau d'approvisionnement en eau	Plan - Gouvernement du NB - 2011		Codester Develles	Forages_Reservoir_Pts		Global
Reseau d'approvisionnement en eau	Carte cadastrale numerique - Gouvernement du NB - 2017		Cadastre_Parcelles			Global
Reseau d'approvisionnement en eau	Plan - Gouvernement du NB - 2011		Nine Outers DOD		Canalisations_Reseau	Global
wine Mine	Rapport America 2017		IVIIIIE_SUITACE_POS			Global
wine	Rappon Amec - 2017		Extension_Souterraine_PCS			Giodai
# ANNEXE XII - FICHIERS DE TRAVAIL (ANNEXE ÉLECTRONIQUE)

L'annexe XII inclut l'arborescence des fichiers de travail qui ont été générés durant cette maîtrise. Elle s'organise en sections, soit de façon similaire au mémoire. Le lecteur pourra ainsi retrouver les fichiers cités et/ou utilisés dans des dossiers correspondants à chacune des sections.

Dossier racine	Dossier	Sous-dossier	Contenu	Nom du ou des fichier(s)	Format					Taxta Dassiar Autros	
					inage	Auobe	word	Excei	Texte	Dossiei	Autres
Cartes	-	-	36 cartes de la section 9 du mémoire	Carte_1_Territoire à Carte_36_Vulnerabilite_DAT	« .tif »						
	Annexe IX		Descriptions stratigraphiques des forages de la CGC	Annexe_IX_Descriptions_Puits_Observation		« .pdf »					
Anneves	Annexe X	-	Article de conférence original présenté lors de l'AIH en octobre 2017	Annexe_X_Article_Conference_AIH		« .pdf »					
AIIIICXCS	Annexe XI	-	Liste et nomenclature des fichiers générés dans ArcGIS	Annexe_XI_Fichiers_Travail_SIG		« .pdf » « .docx » « .xlsx »					
	Annexe XII	-	Détail du contenu de l'annexe électronique	Annexe_XII_Arborescence		« .pdf » « .docx »					
	1 Mémoire	-	Liste bibliographique des références intégrées dans le corps du texte du mémoire	1_Memoire		« .pdf »			« .txt »		ENDNOTE
Références	2 Cartes	-	Liste bibliographique des références citées sur les cartes du mémoire	2_Cartes		« .pdf »			« .txt »		ENDNOTE
	3 Annexes	-	Liste bibliographique des références citées dans les annexes du mémoire	3_Annexes		« .pdf »			« .txt »		ENDNOTE
	4 Articles	-	Ensemble des articles ou rapports lus ou parcourus pendant ce mémoire	AAC_2010 à Zoback_&_al_2010		« .pdf »					
			Méconismos potentials de contamination des aquifères								
	1 Introduction	1.2 Problématiques liées à l'exploitation gazière	superficiels dans les zones d'exploitation de gaz de shale utilisant la fracturation hydraulique (Figure 1.1 de la page 3 du mémoire)	Figure 1.1	« .png »						
		1.3 Objectifs du mémoire	Coupe de la zone d'étude du projet de caractérisation hydrogéologique recoupant le champ gazier de McCully (Figure 1.2 de la page 4 du mémoire)	Figure 1.2	« .png »						
			Localisation des zones d'étude des quatre documents consultés (Figure 2.1 de la page 7 du mémoire)	Figure 2.1	« .tif »						
		2.1 Données locales extraites de documents existants	Localisation approximative des puits et forages échantillonnés (Figure 2.2 de la page 10 du mémoire)	Figure 2.2	« .tif »						
Données			Localisation du réseau de stations sismiques autour des puits stimulés (Figure 2.3 de la page 12 du mémoire)	Figure 2.3	« .tif »						
	2 Données existantes		Signature sismique du remplissage sédimentaire carbonifère sur le secteur du champ gazier de McCully (Figure 2.4 de la page 17 du mémoire)	Figure 2.4	« .png »						
		2.4 Données compilées par	Distribution des fractures ouvertes selon la profondeur des puits d'observation de la CGC sur le site de McCully obtenue par interprétation des diagraphies puis en normalisant en fonction du nombre de puits (Figure 2.10 de la page 24 du mémoire)	Figure 2.10	« .png »						
		la CGC dans le cadre du projet	Analyse des diagraphies de vitesses d'écoulement dans le roc superficiel réalisées dans les puits d'observation de la CGC	Flux				« .xlsx »			
			Analyse des propriétés géomécaniques du roc profond basées sur les diagraphies effectuées durant les opérations de forage des puits gaziers profonds	Geomecanique				« .xlsx »			

## Tableau XII.1 – Contenu de l'annexe électronique contenant les fichiers reliés aux travaux du mémoire (1/7).

Dossier racine	Dossier	Sous-dossier	Contenu	Nom du ou des fichier(s)				Format			
	2000101				Image	Adobe	Word	Excel	Texte	Dossier	Autres
		3.2 Démographie, occupation des sols et cultures	Couverture du sol sur le territoire d'étude couvrant les deux bassins (Figure 3.1 de la page 29 du mémoire)	Figure 3.1	« .png »						
			Distribution des cultures sur le territoire d'étude couvrant les deux bassins (Figure 3.2 de la page 30 du mémoire)	Figure 3.2	« .png »						
			Normales climatiques à la station de Sussex entre 1980 et 2017 (Figure 3.3 de la page 32 du mémoire)	Normales_Climatiques_Sussex		« .pdf »					
		3.3 Climat	Caractéristiques des stations météorologiques de la région d'étude	Stations_Meteo				« .xlsx »			
			Données climatiques brutes de la station de Sussex entre 1980 et 2017	Sussex_1980-2017					« .out »		
	3 Description de la zone d'étude		Caractéristiques des forages gaziers de Corridor Resources Inc. du territoire incluant le toit de chaque formation traversée	Forages_Gaziers_Corridor_Resources				« .xlsx »			
		dans le sud du Nouveau-Brunswick	Caractéristiques de l'ensemble des forages gaziers du territoire extraits de la BD provinciale	Forages_Gaziers_GNB				« .xlsx »			
		stude 3.5 Géologie	Distribution des sous-bassins, des soulèvements du socle et des principales structures du bassin des Maritimes au sud-est du Nouveau-Brunswick (Figure 3.4 de la page 34 du mémoire)	Figure 3.4	« .png »						
			Coupe géologique et structurale du sous-bassin de Moncton au droit des zones d'intérêt (Figure 3.5 de la page 35 du mémoire)	Figure 3.5	« .png »						
Données			Profil de sol type du sud-est du Nouveau- Brunswick (Figure 3.11 de la page 42 du mémoire)	Figure 3.11	« .png »						
			Colonne stratigraphique de la région d'étude (Figure 3.8 de la page 39 du mémoire)	Figure 3.8	« .png »						
			Statistiques de la distribution spatiale de la géologie sur les deux bassins versants	Geologie_Couverture				« .xlsx »			
			Statistiques de la distribution spatiale des dépôts meubles sur les deux bassins versants	Depots_Meubles_Couverture				« .xlsx »			
			Photographie du puits résidentiel (R03) (Figure 3.13 de la page 45 du mémoire)	Figure 3.13	« .jpg »						
			Photographie d'un ancien puits jaillissant (Figure 3.23 de la page 49 du mémoire)	Figure 3.23	« .jpg »						
		3.6 Hydrogóologia rógiopolo	Aménagement du réseau d'eau potable de Springdale après l'assèchement de puits domestiques suite au dénoyage de la mine de Penobsquis (Figure 3.26 de la page 50 du mémoire)	Figure 3.26	« .png »						
		3.6 Hydrogéologie régionale	Caractéristiques des puits domestiques identifiés sur le territoire ; certains ayant ensuite servi pour l'échantillonnage des eaux souterraines	Puits_Domestiques				« .xlsx »			
			Statistiques sur les puits résidentiels de la BD provinciale	Puits_Eau_GNB_Stats				« .xlsx »			
			Statistiques sur le rendement des puits résidentiels de la BD provinciale	Puits_Eau_GNB_Stats_Rendement				« .xlsx »			

### Tableau XII.2 – Contenu de l'annexe électronique contenant les fichiers reliés aux travaux du mémoire (2/7).

### Tableau XII.3 – Contenu de l'annexe électronique contenant les fichiers reliés aux travaux du mémoire (3/7).

Dossier racine	Dossier	Sous-dossier	Contenu	Nom du ou des fichier(s)
			Photographie du puits PO-05 (Figure 4.1.a de la page 53 du mémoire)	Figure 4.1.a
		4.1 Installation de puits d'observation	Photographie de la plateforme des puits PO-04 et PO-07 (Figure 4.1.b de la page 53 du mémoire)	Figure 4.1.b
			Photographie du puits PO-09 (Figure 4.1.c de la page 53 du mémoire)	Figure 4.1.c
			Caractéristiques du puits d'alimentation en eau de Corridor Resources Inc. localisé à proximité du puits d'observation PO-03	Puits_Eau_Corridor_Resources
			Caractéristiques des puits d'observation de la CGC implantés sur le territoire	Puits_Observation_CGC
			Dossiers classés par date de relève contenant les données brutes de niveau de nappe extraites des loggers et de pression atmosphérique extraites des barologgers SOLINST	Données brutes
			Dossier contenant les données piézométrique traitées et formatées pour être intégrées dans le logiciel GWHAT	Données traitées
		4.2 Suivi piézométrique	Configuration type de suivi piézométrique dans un puits (Figure 4.2 de la page 55 du mémoire)	Figure 4.2
			Traitement des données du suivi continu de la nappe réalisé entre 2015 et 2017 sur les 9 puits d'observation de la CGC	Suivi_Piezometrique
			Dossier incluant 2 dossiers ainsi que les données brutes des essais à choc hydraulique : - Données brutes : dossier avec les données brutes des essais de perméabilité réalisés sur les puits de la CGC et le puits d'alimentation en eau de Corridor Resources Inc. ; - Données brutes : dossier avec les données traitées des essais de perméabilité intégrées dans le logiciel AQTESOLV	Slug-tests
			Propriétés hydrauliques des sections de carottes de forages des puits PO-07, PO-08, PO-09 et PO-10 issus du Core Laboratories (Phase 1)	Core_Lab_Phase_1
			Propriétés hydrauliques des sections de carottes de forages des puits PO-07, PO-09 et PO-11 issus du Core Laboratories (Phase 1)	Core_Lab_Phase_2
Données	4 Acquisition des données		Principe d'un essai pneumatique avec pour exemple le puits PO-04 (Figure 4.3 de la page 57 du mémoire)	Figure 4.3
			Photographie de l'installation pour effectuer des essais pneumatiques (slug tests) sur le puits PO-01 (Figure 4.4.a de la page 58 du mémoire)	Figure 4.4.a
			Photographie de l'installation pour effectuer des essais pneumatiques (slug tests) sur le puits PO-06 (Figure 4.4.b de la page 58 du mémoire)	Figure 4.4.b
			Photographie de l'installation pour effectuer des essais pneumatiques (slug tests) sur le puits d'alimentation en eau de Corridor Resources Inc. (ID-39528) situé à proximité du puits PO-03 (Figure 4.4.c de la page 58 du mémoire)	Figure 4.4.c
		4.3 Caractérisation des propriétés	Principe d'un essai au perméamètre de Guelph (Figure 4.7 de la page 60 du mémoire)	Figure 4.7
		nyardanques et de la grandiometrie	Photographie de la réalisation des essais au perméamètre de Guelph sur le site PG-12 : trou effectué à l'aide d'une tarière (Figure 4.8.a de la page 60 du mémoire)	Figure 4.8.a
			Photographie de la réalisation des essais au perméamètre de Guelph sur le site PG-19 : prise de mesure de niveau d'eau sur le cylindre gradué (Figure 4.8.b de la page 60 du mémoire)	Figure 4.8.b
			Photographie de la réalisation des essais au perméamètre de Guelph sur le site PG-20 : déploiement typique sur chaque site (Figure 4.8.c de la page 60 du mémoire)	Figure 4.8.c
			Photographie de prélèvements d'échantillons de dépôts Meubles sur le terrain à partir d'une carotte réalisée avec une tarière manuelle sur le site PG-01 (Figure 4.9.a de la page 62 du mémoire)	Figure 4.9.a
			Photographie de prélèvements d'échantillons de dépôts meubles sur le terrain par l'intermédiaire de prélèvements de sol pour les dépôts les plus grossiers tels que sur le site PR-13 (Figure 4.9.b de la page 62 du mémoire)	Figure 4.9.b
			Photographie de prélèvements d'échantillons de dépôts meubles sur le terrain par l'intermédiaire de prélèvements de sol pour les dépôts les plus grossiers tels que sur le site PR-23 (Figure 4.9.c de la page 62 du mémoire)	Figure 4.9.c
			Localisation des sites d'échantillonnages des dépôts granulaires (Figure 4.10 de la page 64 du mémoire)	Figure 4.10
			Analyse des essais à choc hydraulique réalisés sur 9 puits	Slug_Tests_Analyse

			Form	at		
Image	Adobe	Word	Excel	Texte	Dossier	Autres
« .jpg »						
« .jpg »						
« .jpg »						
			« .xlsx »			
			« .xlsx »			
				« .CSV »	Dossier	SOLINST
				« .csv » « .txt »	Dossier	SOLINST
« .png »						
			« .xlsx »			
				« .prn » « .csv » « .txt »	Dossier	AQTESOLV
			« .xlsx »			
			« .xlsx »			
« .png »						
« .jpg »						
« .jpg »						
« .jpg »						
« .png »						
« .jpg »						
« .jpg »						
« .jpg »						
« .jpg »						
« .jpg »						
« .jpg »						
« .tif »						
			« .xlsx »			

### Tableau XII.4 – Contenu de l'annexe électronique contenant les fichiers reliés aux travaux du mémoire (4/7).

Dossier racine	Dossier	Sous-dossier	Contenu	Nom du ou des fichier(s)
		4.4 Échantillonnages et analyses d'eau souterraine	Sites d'échantillonnages et types d'eau souterraine (Figure 4.11 de la page 66 du mémoire)	Figure 4.11
	1 Acquisition des dennées		Photographie de l'échantillonnage des eaux souterraines par pompe submersible sur le site des puits d'observation PO-04 et PO-07 (Figure 4.12.a de la page 67 du mémoire)	Figure 4.12.a
	4 Acquisition des données		Photographie de l'échantillonnage des eaux souterraines par pompe submersible sur le site des puits d'observation PO-06 et PO-09 (Figure 4.12.b de la page 67 du mémoire)	Figure 4.12.b
			Résultats préliminaires des analyses géochimiques de l'eau souterraine effectuées sur 16 puits du territoire	Geochimie_Datation
			Interprétation des analyses granulométriques faites à partir de prélèvements de dépôts meubles représentatifs de la région d'étude	Granulometrie_CGC
			Interprétation des analyses granulométriques issues de rapports d'étude antérieurs concernant le potentiel en granulats de la région d'étude	Granulometrie_GNB
		5.1 Propriétés hydrauliques des dépôts meubles	Essai de détermination de la conductivité hydraulique à partir des analyses granulométriques effectuées sur les dépôts meubles du territoire	Granulometrie_vs_Conductivite_Hydrau
			Détermination de la distribution spatiale des hydrofaciès sur les deux bassins versants et dans les puits d'observation de la CGC selon les résultats des analyses granulométriques effectuées sur les dépôts meubles	Hydrofacies
			Interprétation des essais au perméamètre de Guelph réalisés sur les unités de tills représentatives du territoire	Permeametres_Guelph_Resultats
		5.2 Épaisseur des dépôts meubles	Dossier contenant les fichiers de travail et les résultats de l'interpolation de l'épaisseur des dépôts meubles réalisés avec le logiciel SGEMS	SGeMS
Données			Traitement et tri des données stratigraphiques issues de la BD des puits résidentiels de la province puis statistiques relatives à l'épaisseur des dépôts meubles	Epaisseur_Depots_Meubles
Donnees			Diagramme décisionnel du processus d'interpolation de l'épaisseur des dépôts meubles (Figure 5.11 de la page 80 du mémoire)	Figure 5.11
			Variogramme omnidirectionnel du krigeage ordinaire	Variogramme_KO
	5 Conditions hydrogeologiques		Synthèse des propriétés hydrauliques du roc superficiel déterminées à partir des carottes de forages de la CGC	Carottes_McCully_Elgin
		5.3 Propriétés	Fichier utilisé pour convertir la perméabilité déduite des analyses des carottes de forages en conductivité hydraulique	Conversion_k_K
		hydrauliques et suivi piézométrique de l'aquifère rocheux	Présentation des résultats des essais de perméabilité et du débitmètre dans le roc selon quatre classes (Figure 5.14 de la page 90 du mémoire)	Figure 5.14
			Interprétation des essais de perméabilité à choc hydraulique réalisés sur les puits d'observation de la CGC	Slug_Tests_Resultats
			Courbes de réponse barométrique cumulative (FRB) des puits d'observation de la CGC extraites de GWHAT	FRB
			Détail des diverses approches utilisées pour déterminer les conditions de confinement des puits d'observation de la CGC	Confinement_Puits_CGC
		5.4 Conditions de confinement de l'aquifère rocheux	Courbes théoriques de réponse barométrique selon le type d'aquifère et l'effet d'emmagasinement (Figure 5.17 de la page 99 du mémoire)	Figure 5.17
			Puits jaillissant PO-02 (Figure 5.20.a de la page 102 du mémoire)	Figure 5.20.a
			Schéma d'un puits jaillissant contrôlé topographiquement (Figure 5.20.b de la page 102 du mémoire)	Figure 5.20.b

				Format			
	Image	Adobe	Word	Excel	Texte	Dossier	Autres
	« .tif »						
	« .jpg »						
	« .jpg »						
				« .xlsx »			
				« .xlsx »			
				« .xlsx »			
lique				« .xlsx »			
				« .xlsx »			
				« .xlsx »			
	« .png »				« .txt »	Dossier	SGEMS
				« .xlsx »			
	« .png »						
	« .png »						
				« .xlsx »			
				« .xlsx »			
	« .tif »						
				« .xlsx »			
		« .pdf »				Dossier	
	« .png »						
	« .jpg »						
	« .png »						

### Tableau XII.5 – Contenu de l'annexe électronique contenant les fichiers reliés aux travaux du mémoire (5/7).

Dossier racine	Dossier	Sous-dossier	Contenu	Nom du ou des fichier(s)	Image	Adobe Word	Excel	Texte	Dossier	Autres
			Dossier contenant les fichiers de travail et les résultats de l'interpolation de la surface piézométrique réalisés avec le logiciel SGEMS	SGeMS	« .png »			« .txt »	Dossier	SGEMS
			Cours d'eau retenus comme points synthétiques dans la procédure d'interpolation de la piézométrie	Cours_Eau			« .xlsx »			
			Diagramme décisionnel du processus d'interpolation de la piézométrie de la nappe (Figure 5.21 de la page 105 du mémoire)	Figure 5.21	« .png »					
		E E Diázomátria	Traitement et tri des données de niveau de nappe issues de la BD des puits résidentiels de la province puis statistiques relatives à la distribution spatiale de la surface de la nappe sur le territoire	Piezometrie			« .xlsx »			
		5.5 Piezometrie	Compilation des puits de la BD provinciale répertoriés dans la région d'étude	Puits_Eau_GNB			« .xlsx »			
			Variogramme omnidirectionnel du krigeage avec dérive externe basé sur la topographie utilisant les points d'observation ainsi que des points synthétiques (altitude des rivières) et des points de forçage (secteur sous-échantillonnés)	Variogramme_KDEpopips	« .png »					
			Variogramme omnidirectionnel du krigeage ordinaire utilisant uniquement les points d'observation	Variogramme_KOpo	« .png »					
			Variogramme omnidirectionnel du krigeage ordinaire utilisant les points d'observation ainsi que des points synthétiques (altitude des rivières) et des points de forçage (secteur sous-échantillonnés)	Variogramme_KOpopips	« .png »					
Données	5 Conditions hydrogéologiques	s 5.6 Évaluation de la recharge de l'aquifère rocheux	Dossier contenant 5 fichiers au format Excel : - Comparaison_Chapman_HELP : comparatif entre les composantes du bilan hydrique calculées avec le filtre de Chapman et HELP ; - Comparaison_Filtres : résultats des filtres de Chapman et de Furey et Gupta mis en œuvre pour estimer le débit de base ; - Comparaison_GW_TOOLBOX : résultats des outils graphiques de calcul du débit de base par séparation des hydrogrammes de rivière ; - Comparaison_GWHAT_HELP : comparatif entre le taux de recharge calculé avec GWHAT aux puits et les estimations de HELP ; - Comparaison_GW_FAT_HELP : comparatif entre le taux de recharge calculé avec GWHAT aux puits et les estimations de HELP ; - Comparaison_Gb : résultats des approches utilisées pour estimer le débit de base par séparation des hydrogrammes de rivière	Comparatif			« .xlsx »		Dossier	
			Dossier comprenant 2 répertoires contenant les données utilisées ou issues du logiciel GWHAT ainsi que 2 fichiers au format Excel : - Projet McCully-Elgin : dossier de travail du modèle GWHAT incluant les données climatiques et les niveaux de nappe enregistrés dans les puits d'observation de la CGC (McCully-Elgin) de même que les résultats de la courbe de récession (MRC) et du bilan hydrique (WTF) ; - TSoft-Marées : dossier incluant les fichiers générés par TSOFT intégrant les marées puis utilisés dans l'estimation de la FRB avec GWHAT ; - Meteo_GWHAT : traitement et comblement des données météorologiques manquantes sur certaines stations du territoire ; - Recharge GWHAT : estimation de la recharge sur chaque puits d'observation de la CGC avec GWHAT	GWHAT	« .png »	« .pdf »	« .xlsx »	« .dat » « .out » « .csv » « .txt »	Dossier	GWHAT TSOFT
			Dossier comprenant 4 répertoires contenant les données utilisées ou issues du modèle HELP ainsi qu'un fichier au format Excel : - Analyse_Sensibilité : dossier incluant les résultats de l'analyse de sensibilité des divers paramètres de HELP ; - Grilles : dossier contenant les fichiers des mailles d'extraction de HELP utilisées dans ARCGIS ; - Input : dossier contenant les fichiers d'entrée de HELP au format adéquat ainsi que plusieurs fichiers Excel détaillant les secteurs de recharge nulle, les données climatiques et les caractéristiques des couches de sols intégrés dans le modèle d'infiltration ; - Output : dossier contenant les résultats des estimations du taux de recharge distribué sur les deux bassins versants (Kennebecasis et Pollett) selon les stations météorologiques utilisées (Sussex Bis et Mechanic Settlement) entre 1980 et 2016 ;	HELP		.pdf »	« .xlsx » « .xls »	« .lst » « .out » « .csv » « .txt »	Dossier	HELP
			<ul> <li>Procedure_Fichier_HELP : détail de la procédure mise en œuvre pour traiter les fichiers d'entrée du modèle HELP</li> <li>Dossier comprenant un répertoire contenant les données hydrométriques enregistrées à la station d'Apohaqui ainsi qu'un fichier au format Excel :</li> <li>Données brutes : données brutes de débit collectées à la station ;</li> <li>Station_Hydrométriques_Apohaqui 1961_2016 : donpées de débit après traitement</li> </ul>	Hydrométrie			« .xlsx »	« .CSV »	Dossier	
			Dossier comprenant 3 répertoires contenant les résultats des approches d'estimation du débit de base de la rivière Kennebecasis : - Filtres : dossier incluant les résultats des deux filtres appliqués soit le filtre de Chapman et celui de Furey et Gupta ; - GW TOOLBOX : dossier contenant les fichiers utilisés puis générés par la boîte à outils GW TOOLBOX ainsi que les résultats des diverses approches mises en œuvre entre 1962 et 2016 ; - PART : dossier contenant les fichiers utilisés par le modèle PART ainsi que les résultats issus de ce modèle en utilisant toutes les données de débit (Apohaqui Base Haute) ou seulement les données à l'étiage (Apohaqui Base Basse)	Qb			« .xlsx »	« .CSV » « .txt »	Dossier	GW TOOLBOX PART
			Composantes du bilan hydrologique utilisées dans les diverses approches d'estimation de la recharge (Figure 5.26 de la page 120 du mémoire)	Figure 5.26	« .png »					
			Modèle conceptuel de recharge de l'aquifère régional utilisé avec HELP dans les zones de recharge préférentielle et contenant six couches dans le cas d'une séquence stratigraphique complète (Figure 5.31 de la page 133 du mémoire)	Figure 5.31	« .png »					
			Diagramme décisionnel du processus d'estimation de la recharge distribuée avec HELP utilisé sur le bassin de la rivière Kennebecasis (Figure 5.32 de la page 135 du mémoire)	Figure 5.32	« .png »					
			Procédure de production du coefficient de ruissellement à partir de la méthode du numéro de courbe et statistiques associées sur les bassins visés utilisée pour le bassin versant Kennebecasis (Figure 5.33 de la page 137 du mémoire)	Figure 5.33	« .png »					
			Détermination de la réserve en eau utile maximale dans le sol	RASmax			« .xlsx »			

« .png »		
« .png »		
« .png »		
« .png »		
	« .xisx »	

### Tableau XII.6 – Contenu de l'annexe électronique contenant les fichiers reliés aux travaux du mémoire (6/7).

Dossier racine	Dossier	Sous-dossier	Contenu	Nom du ou des fichier(s)
			Calcul du temps de transfert advectif vertical (DAT) sur les deux bassins versants	DAT
			Procédure appliquée pour déterminer les secteurs où le DAT n'a pas été considéré	DAT_Nul
			Comparaison entre la distribution du DAT et de l'indice DRASTIC sur la région d'étude	DAT_vs_DRASTIC
			Validation des estimations du DAT à partir des analyses géochimiques et plus particulièrement du tritium (TU)	DAT_vs_TU
		5.7 Vulnérabilité de l'aquifère rocheux régional	Calcul des paramètres intégrés dans l'indice DRASTIC sur les deux bassins versants puis évaluation de cet indice sur le territoire	DRASTIC
	5 Conditions hydrogéologiques		Définition de l'indice de vulnérabilité DRASTIC en fonction des 7 paramètres d'entrée (Figure 5.42 de la page 156 du mémoire)	Figure 5.42
			Détermination de l'impact de la zone vadose a) dans un système monocouche avec une cote unique et b) dans un système multicouche avec le calcul d'un indice équivalent (Figure 5.43 de la page 159 du mémoire)	Figure 5.43
			Evaluation du risque à partir des secteurs sensibles et des activités de surface potentiellement polluantes	Risque
			Procédure appliquée pour déterminer les secteurs où l'indice DRASTIC n'a pas été considéré	Vulnerabilite_Nulle
		5.8 Synthèse et développement du modèle conceptuel	Modèle conceptuel géologique selon la coupe BB' (Figure 5.48.a de la page 169 du mémoire)	Figure 5.48.a
			Modèle conceptuel hydrogéologique selon la coupe BB' (Figure 5.48.b de la page 169 du mémoire)	Figure 5.48.b
		6.2 Localisation et conceptualisation de la coupe 2D modélisée	Modèle conceptuel de la coupe BB' définissant les conditions géologiques représentées par la simulation numérique (Figure 6.1 de la page 172 du mémoire)	Figure 6.1
			Paramètres intégrés dans le modèle numérique 2D de la coupe BB'	Modele_2D_Kennebecasis_Paran
Données		6 3 Dáveloppement	Dossier comprenant 3 répertoires contenant les fichiers utilisés ou générés par le modèle FLONET : - Calage : dossier avec les données de calage des charges hydrauliques extraites le long de la coupe BB' à partir de la carte piézométrique ; - Maillage : dossier avec les fichiers créés pour générer le maillage utilisé par la suite dans le modèle FLONET ; - Modele_Ecoulement : dossier avec l'intégralité des fichiers résultants de la modélisation du système d'écoulement par le modèle FLONET et visualisables ou éditables avec TECPLOT	FLONET
			Résultats de la procédure de calage des charges hydrauliques le long de la coupe BB' en modifiant les paramètres du modèle 2D	Calage_Modele_FLONET_Kennel
			Conditions limites et maillage du modèle d'écoulement de la coupe BB' (Figure 6.2 de la page 176 du mémoire)	Figure 6.2
		du modèle numérique	Distribution des conductivités hydrauliques et de l'anisotropie sur le domaine modélisé de la coupe BB' (Figure 6.3 de la page 177 du mémoire)	Figure 6.3
	6 Modélisation numérique du		Charges hydrauliques simulées après calage et comparées aux charges observées extraites de la carte piézométrique le long du profil BB' (Figure 6.4 de la page 180 du mémoire)	Figure 6.4
	systeme aquilere		Visualisation des flux entrants et sortants du domaine après calage des charges hydrauliques le long du profil BB' (Figure 6.6 de la page 181 du mémoire)	Figure 6.6
			Définition du maillage complexe et déformable utilisé dans le modèle FLONET	Maillage_Ken
		6.4 Simulation de l'âge	Dossier comprenant un unique répertoire contenant l'intégralité des fichiers utilisés ou générés par le modèle FLONET afin de simuler le temps de résidence des eaux souterraines	FLONET
		moyen des eaux souterraines	Modèle numérique 2D présentant les vitesses des eaux souterraines et les lignes d'écoulement en régime permanent sur la coupe BB' (Figure 6.8 de la page 184 du mémoire)	Figure 6.8
			Modèle numérique 2D présentant les charges hydrauliques et les lignes d'écoulement en régime permanent sur la coupe BB' (Figure 6.9 de la page 186 du mémoire)	Figure 6.9
		6.5 Résultats des simulations	Modèle numérique 2D simulant l'âge advectif-dispersif des eaux souterraines et les lignes d'écoulement sur la coupe BB' (Figure 6.10 de la page 188 du mémoire)	Figure 6.10
			Principaux résultats du modèle d'écoulement et de simulation de l'âge moyen des eaux souterraines après calage	Modele_2D_Kennebecasis_Resul

	Format							
	Image	Adobe	Word	Excel	Texte	Dossier	Autres	
				« .xlsx »				
				« .xlsx »				
				« .xlsx »				
				« .xlsx »				
				« .xlsx »				
	« .png »							
	« .png »							
				« .xlsx »				
				« .xlsx »				
	« .png »							
	« .png »							
	« .png »							
etres				« .xlsx »				
					<ul> <li>« .dat »</li> <li>« .lst »</li> <li>« .out »</li> <li>« .csv »</li> <li>« txt »</li> </ul>	Dossier	FLONET TECPLOT	
ecasis				« .xlsx »	« 10 tt »			
	« .png »							
	« .png »							
	« .png »							
	« .png »							
				« .xlsx »				
					« .dat » « .out »	Dossier	FLONET TECPLOT	
	« .png »							
	« .png »							
	« .png »							
ats				« .xlsx »				

Dossier racine	Dossier	Contenu	Sous-dossier	Description	Format Autre	
			Bedrock	Distribution spatiale de la géologie du roc	ARCGIS	
			Cadastre	Contours cadastrales	ARCGIS	
			Carte_Piezometrie	Distribution spatiale de la surface piézométrique selon les diverses interpolations utilisées dont le krigeage avec dérive externe basé sur la topographie et données ponctuelles du niveau de nappe associées	ARCGIS	
			Coupe	Localisation des coupes	ARCGIS	
			Couverture_Sol	Distribution spatiale de la couverture du sol	ARCGIS	
			Cultures	Distribution spatiale des cultures	ARCGIS	
			Depots_Meubles	Distribution spatiale des unités de dépôts meubles	ARCGIS	
			Epaisseur_Depots_Meubles	Distribution spatiale de l'épaisseur des dépôts meubles selon d'après le krigeage ordinaire et données ponctuelles de stratigraphie associées	ARCGIS	
			Forages	Localisation des forages gaziers profonds sur le territoire	ARCGIS	
			Granulométrie	Localisation des points de prélèvements des dépôts de surface issus de la littérature utilisés pour l'analyse granulométrique	ARCGIS	
			Hydrofacies	Distribution spatiale des hydrofaciès	ARCGIS	
				Infrastructures	Localisation des infrastructures sur le territoire	ARCGIS
			Limites	Divers limites administratives et autres	ARCGIS	
		Ensemble des couches SIG nécessaires à la reproduction	Meteorologie	Localisation des stations météorologiques sur le territoire	ARCGIS	
	Couches_SIG	des 36 cartes de la section 9 du mémoire et dont la nomenclature est conforme à l'annexe XI	Pedologie	Distribution spatiale des unités de sol	ARCGIS	
Géomatique			Puits	Localisation des puits résidentiels, des puits d'observation de la CGC et du puits d'alimentation de Corridor Resources Inc. sur le territoire	ARCGIS	
			Recharge	Distribution spatiale des divers paramètres intégrés dans le modèle d'infiltration HELP pour le calcul du taux de recharge distribué sur le territoire, soit les classes pédologiques, la couverture du sol, les cultures, le numéro de courbe, la distance de drainage, le groupe hydrologique, l'indice de surface foliaire, la pente du sol, la pente de drainage, la profondeur racinaire, l'utilisation du sol. Ce dossier inclut également les secteurs de recharge nulle et bien sûr les résultats issus du modèle d'infiltration HELP.	ARCGIS	
			Reseau_Approvisonnement_Eau	Éléments du réseau d'approvisionnement en eau de Penobsquis	ARCGIS	
			Reserve_Utile	Distribution spatiale de la réserve en eau utile maximale dans le sol	ARCGIS	
			Rivieres	Localisation des étendues d'eau sur le territoire	ARCGIS	
			Terrain	Données ponctuelles collectées lors des campagnes de terrain sur les deux bassins versants	ARCGIS	
			Toit_Roc	Distribution spatiale de l'altitude du toit du roc	ARCGIS	
			Topographie	Modèle Numérique de Terrain (MNT)	ARCGIS	
			Toponymie	Identification des municipalités et des territoires de la région d'étude	ARCGIS	
			Utilisation_Sol	Distribution spatiale de l'utilisation du sol	ARCGIS	
			Vulnerabilite_Intrinseque	Distribution spatiale des divers paramètres intégrés dans le calcul de l'indice DRASTIC, soit la profondeur de la nappe, la recharge nette, le type d'aquifère, le type de sol, la pente de la surface du sol, l'impact de la zone vadose et la conductivité hydraulique de l'aquifère tout en intégrant également les résultats de l'indice DRASTIC en tenant compte des secteurs de vulnérabilité nulle. Ce dossier inclut aussi la distribution spatiale du temps de transfert advectif vertical (DAT) et les secteurs où ce temps de transfert n'a pas été évalué.	ARCGIS	
	Package_SIG	Ensemble des couches visualisables avec ARCGIS et leurs propriétés dans un format similaire aux 36 cartes de la section 9 du mémoire	-	-	ARCGIS	

### Tableau XII.7 – Contenu de l'annexe électronique contenant les fichiers reliés aux travaux du mémoire (7/7).