

# Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Par Véronique Blais

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

Jury d'évaluation

Examinateur externe

Marie Larocque Université du Québec à Montréal

Examinateur interne

Michel Parent Commission géologique du Canada

Codirecteur de recherche

René Therrien Université Laval

Directeur de recherche

René Lefebvre INRS-Eau, Terre et Environnement

Février 2006

© droits réservés de Véronique Blais, 2006

# Résumé

Depuis la mise à jour, en 1997, du problème de contamination en trichloroéthène (TCE) de l'eau souterraine dans le secteur Valcartier, d'importants travaux de caractérisation environnementale et hydrogéologique ont été réalisés. Par contre, la distribution du panache de contamination au niveau de la municipalité de Shannon, située à l'ouest de la Garnison Valcartier, et le lien avec la rivière Jacques-Cartier étaient, jusqu'à maintenant, inconnus. Afin de combler ce manque de connaissances, des travaux de caractérisation ont été réalisés à l'automne 2004 dans la municipalité de Shannon. L'objectif de ces travaux de maîtrise était d'analyser les données de caractérisation pour mieux comprendre l'écoulement et le transport de TCE, particulièrement par rapport à la rivière Jacques-Cartier.

Un effort important a été dédié à la compréhension du contexte hydrogéologique, qui a mené à la production de coupes géologiques, de cartes d'élévation et d'épaisseur des unités géologiques et la production d'un modèle géologique 3D de la zone d'étude. Ensuite, les propriétés hydrauliques ont été compilées et l'écoulement de l'eau souterraine a été déterminé par la production de cartes et de coupes piézométriques. Une carte et des coupes ont permis la définition du panache de contamination en TCE dans la zone d'étude. Finalement, des travaux de modélisation numérique ont été réalisés.

Dans la zone d'étude, la topographie de la surface du roc est accentuée et la géométrie des deux unités aquifères principales, deltaïque et proglaciaire, est variable. L'unité de silt glaciomarin peu perméable et apparemment discontinue est intercalée entre les unités aquifères et contrôle les échanges entre ces unités. L'écoulement de l'eau souterraine se fait généralement de l'est vers l'ouest, i.e. de la Garnison Valcartier vers la rivière Jacques-Cartier. Cependant, dans la partie sud de la zone d'étude il y a une composante importante de l'écoulement qui se fait vers le nord en provenance du Mont Rolland-Auger.

La contamination en TCE dissous est présente dans la partie centrale de la zone d'étude dans une bande s'étendant de l'ouest vers l'est entre la Garnison Valcartier et la rivière Jacques-Cartier. Le TCE est présent presque exclusivement dans l'unité deltaïque, sur toute son épaisseur. Le TCE est pratiquement absent de l'unité proglaciaire et il n'est pas détecté dans le roc. Les concentrations en TCE sont observées jusqu'à la rivière Jacques-Cartier, dans deux résurgences, et dans les puits et sondages réalisés à proximité de la rivière. Il n'y a pas de TCE détecté du côté ouest de la rivière.

Le modèle numérique réussit à reproduire le patron d'écoulement dans le secteur avec un calage acceptable. L'étape du traçage de particules permet de constater que la vitesse de l'eau souterraine est plus élevée en bordure de la rivière et au nord du panache central de TCE. De plus, le transport de masse permet de reproduire la forme générale du panache de TCE dans le secteur, tant en plan qu'en profondeur.

Il y a un lien direct de la rivière Jacques-Cartier avec la nappe libre dans l'unité deltaïque au centre de la zone d'étude et un lien direct avec l'unité proglaciaire surtout dans la partie sud. Suite à toutes les preuves fournies par les données de terrain, il ne fait pas de doute que le panache présentement délimité à Shannon émergera éventuellement dans la rivière Jacques-Cartier, soit à sa berge ou plus loin sous son lit.

viano Colais

Véronique Blais Étudiante

466

René Lefebvre Directeur de recherche

ii

## Summary

Since the discovery, in 1997, of trichloroethene (TCE) in groundwater in the Valcartier area, a major environmental and hydrogeological characterization program was carried out. However, the extent of the contamination in the town of Shannon, adjacent to the western limit of the Valcartier Garrison, and the relationship with the Jacques-Cartier River were not known. A characterization program was thus carried out in the fall of 2004 in the municipality of Shannon. The objective of this M.SC. thesis project was to analyze the characterization data and to use them to answer questions regarding the extent of the TCE contamination in Shannon and the link between the TCE plume and the Jacques-Cartier River.

Major efforts were dedicated to the understanding of the hydrogeological context. This led to the production of geological sections, maps of the elevation and thickness of geological units and the production of a 3D geological model of the study area. Hydraulic properties were then compiled and groundwater flow was deduced from potentiometric maps and sections. Also, a map and sections of the TCE plume allowed its spatial delineation in the study area. Finally, a numerical modelling study was carried out.

In the study area, the bedrock surface topography is irregular and the geometry of two main aquifer units, deltaic and proglacial, is variable. The low permeability discontinuous glaciomarine silt unit, which lies between the aquifer units, controls groundwater exchanges between these units. Groundwater flows generally from east to west, i.e. from the Valcartier Garrison towards the Jacques-Cartier River. However, in the southern part of the study area, there is an important flow component to the north from Rolland-Auger Mount.

Dissolved TCE contamination is present in the central part of the study area in a band extending from east to west from the Valcartier Garrison to the JacquesCartier River. TCE is present almost exclusively in the deltaic unit over its entire thickness. TCE is almost absent from the proglacial unit and it was not detected in bedrock. TCE concentrations are observed all the way to the Jacques-Cartier River in two seeps and in the adjacent observation wells and direct push soundings. No dissolved TCE was detected in groundwater to the west of the Jacques-Cartier River.

The numerical model reproduces the groundwater flow pattern with an acceptable calibration. Particle-tracking shows that the groundwater flow velocity is higher near the river and in the northern part of the central TCE plume. Simplified mass transport allows the reproduction of the general shape of the TCE plume in the study area, in plan view and at depth.

There is a direct link between the Jacques-Cartier River and the unconfined aquifer in the deltaic unit in the center of the study area as well as with the proglacial unit mostly to the south of the area. All obtained evidence from field data show that, without control actions, the TCE plume presently delineated in Shannon will eventually emerge in the Jacques-Cartier River, either close to its edge or farther below its bed.

# Remerciements

Plusieurs personnes ont grandement contribuées à l'élaboration de ce projet. Je tiens premièrement à remercier mon directeur de recherche, René Lefebvre, pour son support extraordinaire, qui a toujours su me motiver et m'apporter les solutions nécessaires à l'évolution de ce projet. Sa grande passion et ses connaissances pour l'hydrogéologie ont permis d'accroître mon intérêt et ma compréhension du domaine. Je tiens également à remercier Bernard Michaud, de Construction de Défense Canada, pour son aide constante tout au long du projet. Merci aussi à mon co-directeur, René Therrien, professeur à l'Université Laval, pour m'avoir guidé dans la partie modélisation de mon projet. Un grand merci à Michel Parent, de la Commission géologique du Canada, qui m'a beaucoup aidée sur la portion géologique du projet. Je remercie aussi les collaborateurs de ce projet, qui m'ont permis de travailler sur des données exceptionnelles, le Ministère de la défense nationale et Justice Canada. Je veux souligner l'apport indispensable au projet fourni par Thomas Ouellon, étudiant au deuxième cycle à l'INRS-ETE. Merci également aux chercheurs de la Commission géologique du Canada, Yves Michaud, Daniel Paradis et Miroslav Nastev, pour leur support technique et intellectuel. Merci aux personnes du LCNP (Laboratoire de cartographie numérique et de photogrammétrie) pour leur aide sur la base de données et sur le système d'information géographique (SIG). Un merci bien spécial aux étudiants en hydrogéologie et les professionnels de recherches à l'INRS-ETE, pour leur support moral et intellectuel important. Et finalement, merci aussi à ma famille, mes amis et mon copain, pour leur présence et leur appui si important tout au long de ce beau projet.

# Table des matières

1 INTRODUCTION	<u> </u>
1.1 PROBLÉMATIQUE	1
1.2 OBJECTIFS	3
1.3 CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DU SECTEUR VALCARTIE	r 4
1.3.1 LOCALISATION	4
1.3.2 CONTEXTE HYDROSTRATIGRAPHIQUE	4
1.3.3 PIÉZOMÉTRIE	5
1.3.4 CONTAMINATION EN TCE	6
1.4 MÉTHODOLOGIE	7
1.4.1 COMPILATION DES INFORMATIONS DISPONIBLES	7
1.4.2 CAMPAGNE DE CARACTÉRISATION	8
1.4.3 INTÉGRATION ET ANALYSE DES DONNÉES	9
1.4.4 MODÉLISATION NUMÉRIQUE	9
2 CARACTÉRISATION HYDROGÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOCHIMI	<b>QUE 11</b>
2.1 TRAVAUX DE CARACTÉRISATION	11
2 1 1 I OCALISATION DES TRAVALIX	11
2.1.2 TRAVAUX RÉALISÉS À SHANNON EN 2004	11
2.2 CONTEXTE HYDROSTRATIGRAPHIQUE	13
2.2.1 MÉTHODOLOGIE	15
2.2.2 COUPES GÉOLOGIQUE	20
2.2.3 DISTRIBUTION ET MODÈLE 3D DES UNITÉS HYDROSTRATIGRAPHIQUES	22
2.3 PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES ET ÉCOULEMENT DE L'EAU SOUTERRAINE	26
2.3.1 MÉTHODOLOGIE	26
2.3.2 PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES DES UNITÉS	31
2.3.3 PIÉZOMÉTRIE ET ÉCOULEMENT DE L'EAU SOUTERRAINE	31
2.4 Rivière Jacques-Cartier	35
2.4.1 DESCRIPTION DE LA RIVIÈRE JACQUES-CARTIER	36
2.4.2 HYDROLOGIE	37
2.4.3 Résurgences	41
2.4.4 FLUX DE FILTRATION EN FOND DE RIVIÈRE	42
2.4.5 MINI-PIÉZOMÈTRES	43
2.5 DISTRIBUTION DU TCE DISSOUS	45
2.5.1 MÉTHODOLOGIE	45
2.5.2 DISTRIBUTION EN PLAN DE LA CONTAMINATION EN TCE	47
2.5.3 DISTRIBUTION EN PROFONDEUR DE LA CONTAMINATION EN TCE	49
2.5.4 BILAN DE MASSE	50

<u>3 MODÉLISATION NUMÉRIQUE</u>	53
3.1 MÉTHODOLOGIE	53
3.2 LOGICIEL	55
3.3 MODÈLE CONCEPTUEL	58
3.4 DOMAINE DE MODÉLISATION	59
3.5 DESCRIPTION DES CONDITIONS AUX LIMITES	61
3.6 CALAGE ET ÉTUDE DE SENSIBILITÉ	64
3.7 RÉSULTATS DE LA SIMULATION DE L'ÉCOULEMENT	68
3.7.1 PATRON D'ÉCOULEMENT	68
3.7.2 GRADIENTS HYDRAULIQUES VERTICAUX	69
3.8 SIMULATION DU TRAÇAGE DE PARTICULES ET DU TRANSPORT DE MASSE	69
3.8.1 APPROCHE UTILISÉE	69
3.8.2 RÉSULTATS TRANSPORT VERSUS PANACHE ET TRAÇAGE DE PARTICULES	70
4 DISCUSSION SUR LA RELATION AVEC LA RIVIÈRE JACQUES-CAI	RTIER
	73
5 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	77
BIBLIOGRAPHIE	<u> </u>

vii

# Liste des tableaux, planches et annexes

# Tableaux

(Tous les tableaux sont présentées à la fin du mémoire)

Tableau 1 : Travaux réalisés à Shannon en 2004 et autres données utilisées Tableau 2 : Statistiques descriptives des résultats des essais de perméabilité	91 ; à
Shannon	92
Tableau 3 : Valeurs moyennes et écarts types du logarithme des conductivité	S
hydrauliques mesurées	92
Tableau 4 – Mesures aux infiltromètres	93
Tableau 5 : Bilans d'eau et de masse simplifi.és à la limite entre la Garnison	
Valcartier et Shannon et à la bordure de la rivière Jacques-Cartier	93
Tableau 6 : Conditions aux limites initiales et après calage du modèle	94
Tableau 7 : Paramètres hydrauliques du modèle calé	94
Tableau 8 : Bilan volumétrique du modèle d'écoulement calé	95
Tableau 9 : Bilan de masse dans le modèle de transport	95

# viii

# Planches

(Toutes les figures sont présentées à l'intérieur de planches regroupées à la fin du mémoire)

Planche 1 : Localisation régionale et géologie des dépôts meubles

Planche 2 : Contexte géologique du secteur Valcartier

Planche 3 : Piézométrie de la nappe libre dans le secteur Valcartier

Planche 4 : Piézométrie de la nappe semi-captive dans le secteur Valcartier

Planche 5 : Carte de contamination en TCE de l'eau souterraine dans le secteur

Valcartier (légende présentée à la page précédente)

Planche 6 : Localisation des travaux à Shannon

Planche 7 : Localisation des coupes stratigraphiques

Planche 8 : Coupes stratigraphiques longitudinales et transversales

Planche 9 : Épaisseur totale de sédiments et élévation de la surface du roc

Planche 10 : Épaisseur et élévation de la surface de l'unité proglaciaire (incluant till)

Planche 11 : Épaisseur et élévation de la surface de l'unité de silt glaciomarin

Planche 12 : Épaisseur de l'unité de sable deltaïque et élévation de la surface du sol

Planche 13 : Modèle géologique en trois dimensions

Planche 14 : Surface libre et épaisseur saturée

Planche 15 : Piézométrie de l'unité proglaciaire et du roc

Planche 16 : Gradients hydrauliques verticaux

Planche 17 : Coupes piézométriques

Planche 18 : Bassin de la rivière Jacques-Cartier

Planche 19 : Hydrologie de la rivière Jacques-Cartier

Planche 20 : Panache de TCE

Planche 21 : Coupes de la contamination en TCE

Planche 22: Distribution de la contamination en TCE dans le modèle géologique 3D

Planche 23 : Caractéristiques du modèle d'écoulement de l'eau souterraine

Planche 24 : Calage et étude de sensibilité du modèle numérique

Planche 25 : Piézométrie simulée de l'eau souterraine

Planche 26 : Gradients hydrauliques simulés dans le modèle d'écoulement

Planche 27 : Traçage de particules en plan

Planche 28 : Traçage de particules en trois dimensions

Planche 29 : Résultats du transport de masse après 25 ans

Planche 30 : Patrons de migration simulés du TCE par transport de masse en fonction du temps

# Annexes

(Les annexes du rapport sont présentées sur le CD annexé au mémoire)

Annexe A – Propriétés des puits d'observations et des sondages réalisés en 2004

- Annexe B Données stratigraphiques
- Annexe C Conductivité hydraulique
- Annexe D Données piézométriques
- Annexe E Hydrologie de la rivière Jacques-Cartier
- Annexe F Résultats de l'échantillonnage et de l'analyse chimique de l'eau souterraine
- Annexe G Modélisation numérique
- Annexe H CD des fichiers utilisés pour la réalisation du rapport

# 1 Introduction

### **1.1 Problématique**

La présente étude a pour objet général de comprendre la relation entre l'eau souterraine contaminée du secteur Valcartier et la rivière Jacques-Cartier, à Shannon. Étant donné que l'eau souterraine et l'eau de surface constituent deux entités qui interagissent, la contamination de l'une peut affecter l'autre. C'est donc dans une optique de gestion efficace du panache de contamination qu'il est essentiel de comprendre cette interaction. De plus, malgré les importants travaux de caractérisation environnementale et hydrogéologique déjà réalisés dans le secteur Valcartier depuis la mise à jour du problème de contamination en 1997, l'extension maximale du panache de contamination vers l'ouest, en direction de la rivière Jacques-Cartier, était toujours inconnue jusqu'à 2004. Pour combler cette lacune. des travaux de caractérisation hydrogéologique et environnementale préliminaire ont été réalisés en 2004 à Shannon pour le Ministère de la Défense Nationale (MDN) par le consortium Sanexen-Amec (2005).

Le secteur Valcartier est situé à environ 35 km au nord du centre-ville de Québec, entre les municipalités de Shannon, à l'ouest, et de Québec (arrondissement 8, Val-Bélair), à l'est. Deux entités administratives du MDN se partagent ce territoire fédéral : la Garnison Valcartier, et Recherche et Développement pour la Défense Canada Valcartier (RDDC Valcartier). Au sud du secteur, on retrouve un site industriel désaffecté appartenant à SNC TEC.

Le contexte hydrogéochimique établi par Lefebvre *et al.* (2003) présente un panache de contamination, principalement formé de trichloroéthène (TCE) dissous, faisant une longueur totale de plus de 4 km et une largeur d'environ 650 m. Le TCE (C<sub>2</sub>HCl<sub>3</sub>) est l'un des contaminants majeurs des eaux souterraines en Amérique du Nord et représente un des plus grands défis selon l'EPA (Environnemental Protection Agency) au niveau de la réhabilitation des

aquifères contaminés (Pankow et Cherry, 1996). Il s'agit d'un solvant chloré qui a été largement utilisé comme agent dégraisseur et pour divers usages industriels. Sa solubilité est de 1100 mg/L à 25°C et sa densité est de 1460 kg/m<sup>3</sup> (Pankow et Cherry, 1996).

De manière générale, le secteur consiste en un vaste replat sableux dont le sous-sol est constitué d'un paléo-delta reposant sur une unité proglaciaire de sable et gravier ainsi qu'une unité de till, dont la continuité est mal définie, recouvrant le roc. Une vallée enfouie est présente sous l'ensemble du secteur et elle est comblée par des sédiments d'une épaisseur maximale de 50 m. Par rapport à une ligne de partage des eaux située au milieu du territoire de RDDC Valcartier, l'écoulement se fait principalement vers l'ouest et d'une moindre part vers l'est. Il existe également une unité silteuse prodeltaïque discontinue à l'est, qui délimite deux types d'aquifères, un aquifère libre et un aquifère semi-captif. Ces caractéristiques engendrent un caractère complexe à l'écoulement de l'eau souterraine dans ce secteur.

Le secteur Valcartier constitue un milieu où la ressource en eau souterraine est importante pour l'alimentation en eau potable. La compréhension de l'extension de la contamination en TCE vers la municipalité de Shannon est donc essentielle afin de pouvoir assurer la qualité de l'approvisionnement et la sécurité publique. De plus, la connaissance de la relation entre l'eau souterraine et la rivière Jacques-Cartier, bordant le site, permettra de pouvoir mieux établir le contrôle des émissions de contaminants vers ce milieu récepteur potentiel.

Le but de ce projet de recherche réside donc dans l'application des diverses méthodes pour évaluer les composantes hydrogéologiques, hydrostratigraphiques, hydrogéochimiques et hydrauliques qui caractérisent le secteur. Des puits conventionnels et des sondages par enfoncement (*direct push*) sont utilisés de manière conjointe. L'utilisation de puits conventionnels à longues crépines permet de détecter le TCE sur toute l'épaisseur de l'aquifère,

de définir les unités stratigraphiques en place, d'évaluer les conductivités hydrauliques (*slug test*) et de fournir des niveaux piézométriques de l'eau souterraine. Les sondages par enfoncement permettent d'évaluer les concentrations précises du TCE et sa distribution spatiale dans le sol. La portion hydraulique du projet consiste à définir la relation entre l'eau souterraine et la rivière Jacques-Cartier en se servant de plusieurs techniques : un appareil servant à la mesure du flux en fond de rivière (*seepage meters*), des minipiézomètres, l'analyse des mesures de débits des rivières et l'échantillonnage des résurgences. La compilation et l'analyse de toutes les données permettra de délimiter l'extension maximale du panache de TCE dissous et d'établir la relation numérique sera ensuite réalisée afin de mieux comprendre le système d'écoulement et la migration du TCE par le transport de masse. Ces résultats donneront la possibilité de déterminer l'impact actuel ou futur du panache de TCE sur le cours d'eau.

# 1.2 Objectifs

L'objectif général, qui est en relation avec la problématique du TCE dans le secteur Valcartier, est d'améliorer la compréhension de la situation dans la partie ouest du secteur contaminé, particulièrement dans la municipalité de Shannon en bordure de la rivière Jacques-Cartier.

Les objectifs spécifiques des travaux sont les suivants :

- Déterminer l'étendue exacte du panache de TCE vers l'ouest, tant en plan qu'en profondeur;
- Caractériser les conditions hydrauliques et l'influence relative entre l'aquifère et les cours d'eau sur le terrain;
- Définir le lien potentiel entre l'écoulement dans l'aquifère, la migration du TCE et la rivière Jacques-Cartier, qui s'écoule à l'ouest;

4) Déterminer l'évolution de la contamination dans l'espace et dans le temps, en relation avec la rivière du secteur, à l'aide de la modélisation numérique.

## 1.3 Contexte géologique et hydrogéologique du secteur Valcartier

#### 1.3.1 Localisation

Le secteur Valcartier est situé à environ 35 km au nord du centre-ville de Québec (Planche 1, Lefebvre *et al.*, 2006), entre les municipalités de Shannon, à l'ouest, et de Québec (arrondissement 8, Val-Bélair), à l'est. Deux entités administratives du MDN se partagent ce territoire fédéral : la Garnison Valcartier, et Recherche et Développement pour la Défense Canada Valcartier (RDDC Valcartier). Au sud du secteur, on retrouve un site industriel désaffecté appartenant à SNC TEC. Le secteur Valcartier est une région relativement plane, mais est bordée par deux grosses collines : le Mont Brillant au nord-est et le Mont Rolland-Auger au sud. Cette région est délimitée par la rivière Jacques-Cartier, à l'ouest, et la rivière Nelson, à l'est. La rivière Jacques-Cartier draine un bassin de 2 515 km<sup>2</sup> et son cours principal coule sur 177 km, tandis que la rivière Nelson est l'un des principaux tributaires de la rivière St-Charles dont le bassin a une superficie de 550 km<sup>2</sup>. Ces deux cours d'eau coulent du nord vers le sud.

### 1.3.2 Contexte hydrostratigraphique

La compréhension du contexte hydrostratigraphique est issue des travaux de Michel Parent de la Commission Géologique du Canada (CGC) et tirée du rapport de Lefebvre *et al.* (2003). La zone d'étude se situe en bordure du piémont laurentien, ce qui a joué un rôle important dans la sédimentation des dépôts quaternaires du secteur. Deux coupes stratigraphiques et leur localisation, illustrant la répartition des quatre unités hydrostratigraphiques principales et les charges hydrauliques, sont présentées à la Planche 2 (Lefebvre *et al.*, 2003). La coupe A-A' présente une section longitudinale tracée d'ouest en est, tandis que la coupe B-B' est une section transversale nord-sud

(Planche 2B et C). Les unités reposent sur le socle rocheux, un gneiss granitique considéré peu fracturé, d'une topographie variable typique de la province géologique du Grenville. De la base au sommet (Planche 2A), on retrouve d'abord les sédiments proglaciaires, ensuite le silt glaciomarin et finalement, les sédiments deltaïques et prodeltaïques. L'unité de sables et graviers deltaïques constitue l'aquifère majeur du secteur, tant en étendue qu'en profondeur. Ce dépôt est plus grossier à l'ouest qu'à l'est. Du côté est, l'unité de sables et graviers deltaïques est divisée en deux par une couche silteuse prodeltaïque, qui représente l'intervalle des sédiments ayant une proportion importante de matériel silto-argileux. Hydrogéologiquement, la présence de cette couche entraîne l'existence d'une nappe libre supérieure et d'une nappe semicaptive en profondeur. Le dépôt de sables et graviers deltaïques repose sur le silt glaciomarin, sur les sédiments proglaciaires ou directement sur le socle rocheux dépendamment du secteur considéré. La présence de l'unité de silt alaciomarin, peu perméable, mince et discontinue, entre l'unité deltaïque et l'unité proglaciaire contrôle les échanges entre ces deux unités et entraîne également l'existence de deux nappes.

### 1.3.3 Piézométrie

Suite à la vaste campagne de caractérisation de 2001, environ 700 mesures de charge hydraulique ont été compilées et ont été utilisées afin de déterminer la piézométrie et l'écoulement de l'eau souterraine dans le secteur Valcartier (Lefebvre *et al.*, 2003). Deux cartes piézométriques ont été produites, une pour la nappe libre (Planche 3, Lefebvre *et al.*, 2003) et une autre pour la nappe semi-captive (Planche 4, Lefebvre *et al.*, 2003). Étant donné que ces cartes ont été réalisées avant les travaux de 2004 à Shannon, la portion des isopièzes représentés dans l'ouest, à Shannon, est inexacte. Ces cartes montrent les izopièzes, représentant la position d'une charge hydraulique spécifique de valeur constante, et la distribution de la couche silteuse prodeltaïque. Un écoulement en nappe libre se produit lorsque la surface supérieure de la nappe est à la pression atmosphérique, donc en contact avec l'atmosphère. Dans le secteur

Valcartier, des contextes de nappes libres sont rencontrés dans deux conditions différentes dans l'unité deltaïque. Dans la partie ouest du secteur, seul l'aquifère libre régional est présent puisque la séquence stratigraphique est essentiellement constituée de sables et graviers (unités deltaïgues et proglaiciaires). Par contre, dans la partie est, l'aquifère libre supérieur est présent au-dessus de la couche silteuse prodeltaïque. Comme la couche silteuse prodeltaïque agit comme unité peu perméable, elle amène un isolement hydraulique des matériaux sous-jacents, provoquant des conditions de nappe captive ou semi-captive. Ces conditions sont observées lorsque les niveaux d'eau dans l'aquifère dépassent l'élévation de la base de l'unité confinante. Un aquifère est dit semi-captif lorsque la couche peu perméable est d'étendue limitée, provoquant un isolement hydraulique partiel de l'aquifère. Il en résulte donc que l'aquifère de sables et graviers deltaïques présent sous la couche silteuse peut être défini comme semi-captif, car la couche silteuse prodeltaïque n'est pas continue dans tout le secteur. Comme l'unité de sables et graviers deltaïques est continue latéralement, l'eau souterraine sous la couche silteuse s'écoule donc latéralement vers l'ouest pour atteindre la nappe libre régionale, sans gradient horizontal important contrairement à ce qui est observé lorsque la nappe supérieure libre atteint la nappe libre régionale. L'unité de silt glaciomarin joue un rôle semblable à la couche silteuse prodeltaïque en confinant partiellement l'aquifère dans l'unité proglaciaire. Les conditions ont été mieux définies dans la région de Shannon et elles seront discutées davantage aux sections 2.2.3 et 2.3.3.

#### 1.3.4 Contamination en TCE

La Planche 5 (Lefebvre *et al.*, 2003) montre la carte de contamination en TCE dissous générée suite aux travaux de caractérisation de 2001. Différents symboles sont utilisés pour représenter le type de prélèvement : des étoiles pour les concentrations maximales obtenues avec les sondages Geoprobe, des cercles pour l'échantillonnage dans les puits d'observation conventionnels dans la nappe libre, des losanges pour les concentrations obtenues de

l'échantillonnage dans les puits conventionnels dans la nappe semi-captive et finalement, des carrés pour le suivi dans les puits d'alimentation privés à Shannon. Deux zones ont été définies sur la carte : une zone en jaune dans laquelle les concentrations en TCE rencontrées sont généralement comprises entre la limite de détection et 50 μg/L, une zone en rose pour laquelle les concentrations en TCE sont généralement au-dessus de 50 μg/L. La borne de 50 μg/L représente la concentration maximale acceptable (CMA) en TCE dans l'eau potable présentement en vigueur au Canada (Conseil canadien des ministres de l'environnement, CCME, 2002). Les concentrations plus élevées se retrouvent principalement à RDDC-Nord et sur les terrains de SNC-TEC (Secteur 214 et Lagune C). Étant donné que certaines zones sources potentielles sont localisées près de la ligne de partage des eaux dans la partie est du secteur, la migration du TCE dissous se fait vers l'ouest et vers l'est. La granulométrie plus fine des matériaux à l'est du secteur engendre une migration plus lente du contaminant qu'à l'ouest, où les sédiments sont plus grossiers.

# 1.4 Méthodologie

### 1.4.1 Compilation des informations disponibles

Cette étape consiste à passer en revue les ouvrages antérieurs reliés au présent projet de recherche. Pour ce faire, la lecture et l'évaluation de plusieurs études scientifiques ont été réalisées afin de trouver des méthodologies appropriées à la détermination de l'interaction entre les eaux de surface et les eaux souterraines. La tâche consistait donc à analyser et adapter les méthodologies des études antérieures à la problématique du présent projet. Cette étape est cruciale au niveau de l'apprentissage du sujet de la recherche et de tous les principes qui les sous-tendent. De plus, plusieurs travaux ont été réalisés dans le secteur Valcartier. Il est donc essentiel de compiler toutes les données disponibles nécessaires à la réalisation du projet concernant l'hydrologie, la géologie, les conditions hydrauliques et la contamination. Ces données sont, par exemple, les cartes topographiques, modèle numérique de terrain, les cartes de dépôts meubles, les stations de jaugeage dans les rivières et les rapports antérieurs concernant les débits, la bathymétrie et l'échantillonnage des rivières.

#### 1.4.2 Campagne de caractérisation

Afin de définir les contextes hydrogéologiques, hydrostratigraphiques, hydrogéochimiques et hydrauliques associées à la ville de Shannon, une caractérisation importante a été faite par le Ministère de la défense Nationale (MDN). Les travaux ont été exécutés par le consortium Sanexen-Amec dans la municipalité de Shannon.

Dans ce secteur, la définition des différents contextes a impliqué des forages de type ODEX et l'installation de puits conventionnels afin de déterminer la profondeur au roc, la distribution et les types de dépôts quaternaires, la piézométrie, les gradients hydrauliques et les conductivités hydrauliques (*slug test*). L'aménagement de puits, à quatre niveaux de crépines par site, a aussi été réalisé afin de pouvoir faire un suivi adéquat de la contamination.

Des sondages par enfoncement (*direct push*) ont également été faits dans le but de permettre l'échantillonnage ponctuel de l'eau souterraine à des profondeurs spécifiques, la mesure de niveaux d'eau et la réalisation d'essais de perméablilité.

Afin d'évaluer la relation entre l'eau souterraine et la rivière, des mesures de flux d'infiltration en fond de rivière et du gradient hydraulique vertical ainsi que l'échantillonnage des résurgences ont été réalisés. La comparaison des niveaux d'eau dans les puits à proximité des rivières avec le niveau de la rivière permet aussi d'établir le type de lien hydraulique entre les deux entités. L'évolution des niveaux d'eau a été établie par l'utilisation de capteurs de pression avec enregistrement continu des mesures. L'interaction entre l'eau souterraine et l'eau de surface est souvent définie par l'utilisation de traceurs, il est donc important de reconnaître que la contamination en TCE de l'eau souterraine, dont

la migration a été caractérisée par l'échantillonnage des résurgences de la rivière, tient lieu de traceur.

### 1.4.3 Intégration et analyse des données

Les données de terrains recueillies sont ajoutées à la base de données du secteur Valcartier et sont présentées sous forme de profils et de coupes illustrant la distribution de la contamination, la stratigraphie et les liens hydrauliques. De plus, l'extension de la carte de contamination en TCE est produite pour la partie ouest du secteur Valcartier. Des calculs de flux de masse ont été faits afin de connaître les concentrations de TCE sortant vers la rivière Jacques-Cartier.

### 1.4.4 Modélisation numérique

L'analyse des résultats est basée d'abord sur l'interprétation qualitative des données recueillies et ensuite par la modélisation numérique de l'écoulement et du transport de masse. Pour ce faire, le logiciel de modélisation FEFLOW a été sélectionné. L'élaboration de ce modèle permettra de simuler l'évolution du panache de contamination vers l'ouest, et d'évaluer l'étendue de celui-ci dans l'espace et dans le temps. L'utilisation du modèle numérique peut être validée par les observations de terrains à l'aide d'un calage des données simulées en fonction des données mesurées.

# 2 Caractérisation hydrogéologique et hydrogéochimique

# 2.1 Travaux de caractérisation

### 2.1.1 Localisation des travaux

La municipalité de Shannon se retrouve à l'ouest de la Garnison Valcartier et occupe les deux rives de la rivière Jacques-Cartier. Elle est bordée au sud par le Mont Rolland-Auger. La Planche 6 (Lefebvre *et al.*, 2006) montre une carte de localisation des travaux réalisés à Shannon en 2004. Toutes les données et les cartes sont géoréférencées par rapport au système de coordonnées UTM NAD 83, Zone 19. Plusieurs planches réfèrent à Lefebvre *et al.* (2005), ce qui signifie que ces figures ont été faites par moi, dans le cadre de mon projet de maîtrise, mais elles ont d'abord été intégrées à ce rapport à des fins contractuelles.

### 2.1.2 Travaux réalisés à Shannon en 2004

Le consortium Sanexen-Amec était mandaté pour réaliser les travaux à Shannon en 2004 et les résultats détaillés de la caractérisation sont contenus dans le rapport Sanexen-Amec (2005). Le tableau 1.1 résume ces travaux. Globalement, trois types de travaux ont été effectués : 1) des forages, 2) des sondages par enfoncement (*direct push*), et 3) des investigations en bordure de la rivière Jacques-Cartier. Les forages et les sondages ont été positionnés pour couvrir l'ensemble de la zone d'étude et pour examiner plus en détail le secteur formant un triangle compris entre les rues King, de la Station et le boulevard Jacques-Cartier où le suivi du Ministère de l'environnement du Québec (MENV) avait déjà identifié des concentrations plus importantes en TCE. Les sondages par enfoncement ont été localisés à des endroits complétant la couverture des puits d'observation, aux endroits plus contaminés ou aux sites où des puits d'observation ne pouvaient pas être mis en place avec des forages conventionnels. Les caractéristiques des puits d'observation et des sondages réalisés à Shannon en 2004 sont compilées à l'annexe A.

En tout, 53 nouveaux forages ont été réalisés, dont 10 (carrés sur Planche 6) ont été fait avec l'échantillonnage de sols en continu afin de pouvoir améliorer la compréhension de la stratigraphie dans le secteur. L'identification des types de dépôts a tout de même été faite dans les autres forages (cercles noirs sur Planche 6) par observation des déblais de forage. De façon générale, deux forages ont été effectués à chaque site afin de pourvoir installer deux puits d'observations par site, chaque puits ayant des crépines à deux profondeurs. Ce qui permet d'avoir quatre niveaux de crépine disponibles par site pour pouvoir investiguer l'épaisseur totale de la nappe par rapport à la contamination (échantillons d'eau), la piézométrie (niveaux d'eau) et la conductivité hydraulique (essais de perméabilité) en fonction de la profondeur. Dans la majorité des cas, deux crépines sont installées dans l'unité supérieure de sable deltaïque et deux autres dans l'unité inférieure de sable et gravier proglaciaire. Évidemment, cette approche a été adaptée en fonction de l'épaisseur de ces deux unités et c'est pourquoi la longueur des crépines varie de 1.5 m à 6 m par endroits. Afin de caractériser le roc, cinq forages ont également été réalisés dans cette unité, avec l'installation de cinq puits d'observations, à simple niveau cette fois, sur toute la longueur du roc foré.

Afin de mieux définir la distribution du panache en fonction de la profondeur, 25 sondages par enfoncement (étoiles bleues sur Planche 6) ont été effectués. Ce type de sondage permet l'échantillonnage relativement ponctuel (crépine de 1.09 m) de l'eau souterraine à plusieurs profondeurs sans devoir installer des puits d'observation permanents. De façon générale, l'intervalle d'échantillonnage était de 3 m. Ces sondages ont également permis de mesurer l'élévation des niveaux d'eau à 57 endroits et de réaliser huit essais de perméabilité.

Les investigations en bordure de la rivière Jacques-Cartier se divisent en deux cibles principales, 1) les résurgences, 2) le lit de la rivière. Dans le premier cas, la mesure de l'élévation des résurgences de la nappe d'eau souterraine a été réalisée à cinq endroits et l'eau de celles-ci a été échantillonnée et analysée.

Deuxièmement, cinq essais de filtration en fond de rivière à l'aide d'infiltromètres (seepage meters) ont été tentés mais seulement 3 ont été fructueux, car deux des essais sont indiqués comme ayant un flux nul dans le rapport de Sanexen-Amec (2005). De plus, à ces cinq sites, la mesure de la différence de niveau d'eau entre le lit de la rivière et l'eau dans la rivière a été effectuée à l'aide de mini-piézomètres.

# 2.2 Contexte hydrostratigraphique

Le contexte géologique a été déterminé à l'aide de la carte des dépôts meubles régionale (Planche 1, Lefebvre *et al.*, 2006) produite par la Commission géologique du Canada (Michaud *et al.*, 1999) ainsi que sur les travaux réalisés dans le secteur Valcartier en 2001 (Lefebvre *et al.*, 2003). La Planche 1 montre la distribution des unités géologiques retrouvées régionalement. Les unités jugées perméables (aquifères) sont les sédiments proglaciaires et deltaïques. Les sédiments prodeltaïques et le silt glaciomarin sont considérés semi-perméables, à cause de leur discontinuité et de leur faible conductivité hydraulique. Enfin, le till et le roc sont des unités relativement imperméables.

Voici la description des unités de la base au sommet. Le roc est formé par des gneiss granitiques d'âge précambrien, peu fracturés et peu altérés et il forme une surface irrégulière. Le till n'a été identifié qu'à quelques endroits à Shannon à cause du faible taux de récupération des échantillons près du roc (Sanexen-Amec, 2005). À la Garnison Valcartier, le till de fond est constitué d'un diamicton très compact à matrice silto-sableuse dominante (Lefebvre *et al.*, 2003). Une couche avec des blocs a été identifiée dans 14 forages au contact du roc par Sanexen-Amec (2005) dans la zone d'étude (ces sites sont identifiés sur la Planche 10, Lefebvre *et al.*, 2006).

L'unité de sédiments proglaciaires est hétérogène et composée principalement de sable fin à grossier avec des blocs et des proportions variables de silt et de gravier. Cette unité forme un réseau de couches et d'amas proglaciaires mis en place au fond de la vallée par des eaux de fonte sous-glaciaires et proglaciaires.

L'unité de silt argileux gris d'origine glaciomarine est directement superposée à l'unité proglaciaire et est surmontée par les sédiments deltaïques. Cette unité est peu épaisse par endroits et elle apparaît presque continue et il semble que sa présence n'ait pas toujours été identifiée lors des forages destructifs. Le dépôt de cette unité a été suivi d'un intervalle au cours duquel des faunes marines, notamment *Hiatella arctica,* ont envahi cette paléo-baie de la Mer de Champlain et des fragments de coquillages ont été observés à 6 localisations par Sanexen-Amec (2005). Cette unité proglaciaire sous-jacente à Shannon.

L'unité de sables marins deltaïques est bien triée et stratifiée. Elle est subdivisée en deux groupes de faciès : les sédiments deltaïques grossiers (Md grossier) et les sédiments deltaïques fins (Md fin), ces derniers jouant un rôle important au niveau de l'écoulement à l'est du secteur Valcartier (Lefebvre *et al.*, 2003). Les sédiments deltaïques grossiers sont déposés soit sur le roc, le till ou sur les sédiments proglaciaires. Les sédiments deltaïques fins, composés principalement de sables fins ou très fins, se trouvent dans la zone de transition avec les silts prodeltaïques auxquels ils sont d'ailleurs souvent interdigités ou qu'ils surmontent.

Les sédiments prodeltaïques, caractérisés par des alternances de lits de silt, silt argileux et de sable silteux, séparent l'aquifère libre et l'aquifère semi-captif. Lefebvre *et al.* (2003) réfèrent à cette unité en tant que « couche silteuse prodeltaïque » pour indiquer qu'il ne s'agit pas d'un silt homogène et continu latéralement ou verticalement, mais plutôt d'un intervalle où les lits silteux sont abondants. Une telle unité silteuse distincte n'a pas été identifiée à Shannon bien que les faciès deltaïques fins aient été identifiés par endroits.

Les alluvions des terrasses fluviales sont une mince unité (entre 0.5 et 5 m d'épaisseur) localisée dans la zone d'étude entre la rivière Jacques-Cartier et la base de la terrasse à l'ouest des terrains de la Garnison Valcartier. Les alluvions des terrasses fluviales sont constituées de sables fins à moyens reposant sur l'unité Md grossière. En raison du contexte local, cette unité n'a pu être distinguée de l'unité deltaïque sous-jacente lors des descriptions de forage dans la zone d'étude à Shannon.

#### 2.2.1 Méthodologie

D'autres données ont été utilisées pour la réalisation de notre étude en plus des données acquises dans le cadre des travaux de caractérisation effectués à Shannon en 2004 (Tableau 1). Ainsi, la stratigraphie des dépôts meubles a été définie à l'aide de données provenant de forages existants à la Garnison Valcartier ainsi que de puits répertoriés dans le secteur dans la base de données des puisatiers du MENV. Afin de bien définir la distribution spatiale des unités géologiques, une approche en plusieurs étapes a été utilisée.

D'abord, tous les forages de la campagne de caractérisation de 2004 réalisée par Sanexen-Amec (2005) et certains forages de la Garnison Valcartier ont été assignés par différents intervalles de profondeurs en fonction des différentes unités hydrostratigraphiques définies. Ensuite, le montage de 7 coupes stratigraphiques préliminaires a été effectué pour comprendre la géométrie et la distribution des unités dans la zone d'étude (Planche 7, Lefebvre *et al.*, 2006). Trois coupes sont localisées dans le sens général de l'écoulement de l'eau souterraine (A-A', B-B' et C-C') tandis que quatre autres coupes sont généralement perpendiculaires à l'écoulement (D-D', E-E', F-F' et G-G'). Tous les nouveaux forages réalisés au cours de la caractérisation de 2004 à Shannon sont intégrés dans les coupes stratigraphiques (Planche 8, Lefebvre *et al.*, 2006). Bien que les sondages par enfoncement ne soient pas utiles pour définir la stratigraphie, il ont aussi été intégrés aux coupes (sauf C-C') dans le but de les utiliser pour la représentation de la piézométrie (Planche 17, Lefebvre *et al.*,

2006) et de la distribution du TCE (Planche 21, Lefebvre *et al.*, 2006) sur les mêmes coupes. Les coupes B-B' et F-F' ont un meilleur contrôle stratigraphique car elles utilisent les forages avec échantillonnage de sol.

Suite à l'élaboration des coupes stratigraphiques, des cartes d'élévation de la surface et de l'épaisseur des unités géologiques, incluant la surface du sol et du roc (Planche 9 à 12, Lefebvre et al., 2006) ont été produites. Pour générer les cartes d'élévation de la surface et de l'épaisseur des unités, le même type d'interpolation a été utilisé dans le logiciel Surfer (Golden Software Inc., 1999) : krigeage ordinaire (sans enlever la tendance linéaire), omnidirectionnel et linéaire avec un modèle de variogramme linéaire sans effet de pépite. Selon les conditions du terrain et la nature des unités géologiques, deux approches ont été utilisées pour produire ces cartes. D'abord, il était parfois plus efficace et adéquat de débuter par l'interpolation de l'élévation de la surface de l'unité ainsi que de l'unité sous-jacente et de produire ensuite une carte d'épaisseur de l'unité par soustraction des mailles d'interpolation des deux surfaces des élévations De façon alternative, pour certaines unités, il était délimitant une unité. préférable d'interpoler leur épaisseur et ensuite de produire la carte d'élévation de la surface de cette unité en ajoutant ou en soustrayant cette épaisseur à la carte d'élévation de la surface de l'unité supérieure ou inférieure. Toutes les données utilisées pour l'interpolation des surfaces et des épaisseurs des unités sont compilées à l'annexe B. La séquence suivante a été suivie pour dériver les cartes :

 Élévation de la surface du sol (Planche 12) : cette carte a été produite à l'aide 1) des courbes topographiques de la surface du sol (obtenues du laboratoire de cartographie de la CGC-Québec, le LCNP), 2) des levés d'arpentage de l'élévation du sol à chaque puits dans la zone d'étude (Shannon et Garnison Valcartier) et 3) des coupes bathymétriques de la rivière Jacques-Cartier obtenues du Centre des Ressources hydriques du Québec (Godin et Hébert, 1993). L'ensemble de ces points de contrôle a permis l'interpolation d'une carte d'élévation de la surface du sol;

- 2. Élévation de la surface du roc et épaisseur totale de sédiments (Planche 9) : la carte d'élévation de la surface du roc a été obtenue par l'interpolation des valeurs d'élévation du roc obtenues de chaque puits avant cette information dans la zone d'étude de même qu'en utilisant des points de contrôle manuels imposés à l'élévation du sol où le roc est affleurant. L'élévation de la surface du roc respecte bien les valeurs d'élévations du roc provenant des forages réalisés sur le terrain. Pour s'assurer de la cohérence de la surface du roc avec la surface du sol, la carte initiale de surface du roc a été corrigée en ramenant la surface du roc à la valeur de la surface du sol lorsque l'élévation interpolée du roc la dépassait. La valeur de la correction appliquée était égale aux valeurs négatives obtenues de la maille d'élévation du roc soustraite de la maille d'élévation du sol. La carte d'épaisseur totale de sédiments a été simplement obtenue de la soustraction des mailles de la carte d'élévation de la surface du sol moins la maille de l'élévation de la surface du roc;
- 3. Épaisseur et élévation de la surface de l'unité proglaciaire (Planche 10) : les points de contrôle pour générer la carte d'épaisseur de l'unité proglaciaire proviennent des forages de la caractérisation de 2004 à Shannon et de ceux faits en 2001 à la Garnison Valcartier. L'unité de till n'a pas pu être distinguée clairement de l'unité proglaciaire dans les descriptions des forages (Sanexen-Amec, 2005), de sorte que l'épaisseur de l'unité proglaciaire incorpore une certaine épaisseur de till à maints endroits. La décision de générer une carte d'épaisseur de cette unité plutôt qu'une carte d'élévation de sa surface a été prise parce que l'irrégularité du sommet de cette unité ainsi que son prolongement de chaque côté de la rivière Jacques-Cartier rendaient l'interpolation de l'élévation de cette unité problématique. La carte initiale interpolée de l'épaisseur de l'unité proglaciaire a tout de même dû être corrigée par rapport à l'épaisseur totale de sédiments (Planche 9) pour enlever les endroits où l'épaisseur interpolée de l'unité proglaciaire était plus grande que l'épaisseur totale de sédiments. Cette opération permettait en fait de

tenir compte de l'effet de la vallée de la rivière Jacques-Cartier qui découpe les sédiments dans la zone d'étude. La carte d'élévation de la surface de l'unité proglaciaire a ensuite été dérivée par l'addition du maillage de son épaisseur corrigée au maillage de l'élévation de la surface du roc (Planche 9);

- 4. Épaisseur et élévation de la surface de l'unité de silt glaciomarin (Planche 11) : la carte de l'épaisseur de l'unité de silt glaciomarin a été interpolée à l'aide des données des forages réalisés à Shannon en 2004 et à la Garnison Valcartier en 2001, de même qu'en imposant des points de contrôle manuels pour réduire l'expansion produite par l'interpolation dans les endroits où il y a moins de contrôle sur l'épaisseur de cette unité, soit à l'ouest, à l'extrême nord et à l'extrême sud de la zone d'étude. Tout comme pour l'unité proglaciaire. l'irrégularité de l'épaisseur de l'unité de silt glaciomarin ainsi que sa faible épaisseur et sa discontinuité ont initialement exigé l'interpolation d'une carte d'épaisseur plutôt qu'une carte d'élévation de la surface de l'unité. Cette unité discontinue est absente à plusieurs des forages réalisés dans la zone d'étude. Ceci fait en sorte que l'interpolation de l'épaisseur de l'unité génère des valeurs négatives par endroits. Ces valeurs négatives dans la carte interpolée initialement ont d'abord été ramenées à zéro pour obtenir une version corrigée de l'épaisseur de l'unité. Ensuite, une version initiale de la carte d'élévation de la surface du silt a été obtenue en additionnant le maillage de l'épaisseur de silt glaciomarin au maillage de l'élévation de l'unité de proglaciaire (Planche 10) qui est sous-jacente à l'unité glaciomarine. Cette élévation a finalement été corrigée par rapport à l'élévation du sol surtout pour tenir compte de l'effet de la vallée de la rivière Jacques-Cartier. Enfin, la carte finale de l'épaisseur de l'unité de silt glaciomarin a été obtenue par la soustraction du maillage de l'élévation de la surface de l'unité de silt glaciomarin au maillage de l'élévation de l'unité proglaciaire;
- 5. <u>Épaisseur de l'unité de sable deltaïque</u> (Planche 12) : comme l'unité de sable deltaïque est l'unité sommitale de toute la séquence sédimentaire (si

18

on y incorpore les alluvions des terrasses fluviales et le remblai), sa surface est limitée par la surface du sol aux endroits où le sable deltaïque est présent. L'épaisseur de l'unité de sable deltaïque peut donc être obtenue simplement par la soustraction du maillage de la surface du sol au maillage de l'élévation de la surface de l'unité de silt glaciomarin qui est sous-jacente à l'unité deltaïque.

L'approche utilisée pour la génération des cartes des surfaces et des épaisseurs des unités sédimentaires assure la cohérence des résultats. Grâce à cette démarche, toutes les surfaces et épaisseurs sont cohérentes entre elles et il n'y a pas de croisement entre les surfaces des différentes unités. De plus, le type d'interpolation utilisé assure que les cartes interpolées respectent tous les points de contrôle disponibles grâce aux forages présents dans la zone d'étude, i.e. les élévations et les épaisseurs des cartes correspondent aux valeurs des forages à ces localisations dans les cartes. Enfin, lorsque l'épaisseur d'une unité est nulle (unité absente), la surface de cette unité correspond exactement à la surface de l'unité sous-jacente. Suite aux résultats obtenus, les coupes stratigraphiques ont été ajustées pour produire des versions finales qui sont cohérentes par rapport aux différentes cartes cartes produites.

Finalement, un modèle géologique en trois dimensions dans le logiciel gOcad (Earth Decision Sciences, 2001) a été produit par l'intégration des surfaces des unités (Planche 13, Lefebvre *et al.*, 2006). L'intégration de l'information géologique en trois dimensions a pour avantage de permettre une bien meilleure compréhension de la géométrie des unités et de leur agencement dans l'espace. Des coupes dans toutes les directions peuvent être générées pour répondre à différentes questions une fois qu'un tel modèle est disponible. De plus, le vidéo d'une animation du modèle géologique 3D a été généré pour illustrer la distribution de la stratigraphie : une coupe verticale ouest-est est montrée en se déplaçant du nord vers le sud de la zone d'étude (Annexe H sur CD). La surface libre (Planche 14, Lefebvre *et al.*, 2006) délimitant les sédiments non saturés en

eau et l'aquifère en surface a aussi été intégrée dans le modèle géologique 3D, illustrée par une surface bleue et une ligne bleue à l'intersection des coupes (Planche 13). Enfin, les concentrations en TCE mesurées dans l'eau souterraine sur échantillons prélevés dans les puits d'observation et les sondages par enfoncement ont aussi été intégrées au modèle géologique 3D (Planche 22, Lefebvre *et al.*, 2006).

#### 2.2.2 Coupes géologique

La Planche 7 montre la localisation des sept coupes stratigraphiques qui sont présentées sur la Planche 8. Ces coupes ont été développées pour montrer la distribution des unités rencontrées dans les forages. Trois coupes longitudinales est-ouest (A-A', B-B' et C-C') sont orientées dans le sens général de l'écoulement de l'eau souterraine qui se fait de l'est vers la rivière Jacques-Cartier à l'ouest. Quatre coupes nord-sud (D-D', E-E', F-F' et G-G') sont transversales par rapport à l'écoulement de l'eau souterraine. La position de la surface libre est indiquée sur les coupes pour mieux définir la section d'écoulement de l'eau souterraine. Pour faciliter leur comparaison, les coupes utilisent toutes le même intervalle d'élévation par rapport au niveau moyen de la mer, soit entre 100 et 180 m. Une exagération verticale de 15x est utilisée sur les sections pour bien montrer les variations dans la distribution de l'épaisseur des unités. Les coupes longitudinales et transversales sont toutes alignées par rapport à leurs coordonnées et les coupes longitudinales montrent la position de la valeur de X=308500 m, tandis que les coupes transversales montrent la valeur de Y=5195400 m (Système UTM NAD 83, Zone 19). La localisation des contrôles stratigraphiques utilisés pour dessiner les coupes est indiquée sur les coupes.

Toutes les coupes, tant longitudinales que transversales, permettent de montrer la grande variabilité dans la topographie de la surface du roc ainsi que de l'épaisseur totale de sédiments. Il y a une dépression importante dans le roc, jusqu'au niveau d'environ 115 m (Coupes C-C', E-E' et F-F'). Il y a un remplissage partiel des dépressions de la surface du roc par l'unité proglaciaire mais celle-ci forme tout de même des monticules qui ne sont pas nécessairement coïncidents avec la position des dépressions. Ces monticules de forte épaisseur de sédiments proglaciaires sont apparents sur les coupes longitudinales A-A' et B-B' de même que sur la coupe transversale D-D'. L'unité de silt glaciomarin est relativement mince (moins de 5 m) et d'épaisseur variable. Cette unité est discontinue et absente par endroits bien que cette absence puisse être parfois remise en question à cause de la difficulté de reconnaître la présence de cette unité lors des forages destructifs lorsqu'elle est mince. Les coupes montrent bien que la surface du sol n'offre que de faibles dénivellations alors que sous la surface du sol, il y a de fortes variations dans l'élévation et l'épaisseur des unités géologiques. Ceci fait en sorte que l'épaisseur totale ainsi que la section d'écoulement (sous la surface libre) de l'unité deltaïque sont très variables car les sédiments de cette unité ont comblé les reliefs formés par les unités sous-jacentes. Ce comblement de la topographie préexistante par les sédiments deltaïques fait que cette unité est moins épaisse aux endroits qui étaient en relief au moment de sa mise en place. Ainsi, on constate qu'il y a un amincissement important de l'unité deltaïque au sud des coupes transversales E-E', F-F' et G-G' aux abords du Mont Rolland-Auger. Enfin, la rivière Jacques-Cartier a eu un effet important sur l'épaisseur des sédiments deltaïques puisque la rivière s'est encaissée à travers ces sédiments avant d'atteindre son lit actuel.

La distribution des unités géologiques montrée sur les coupes stratigraphiques de la Planche 8 a des incidences importantes sur l'écoulement de l'eau souterraine dans la zone d'étude. Ces effets sur l'écoulement seront mis en évidence par les coupes piézométriques (Planche 17) à la section 2.3.3, mais nous allons en discuter ici de façon générale. Rappelons d'abord que les unités aquifères dans la zone d'étude sont les unités deltaïque et proglaciaire alors que l'unité de silt glaciomarin, lorsque présente, joue un rôle d'unité semi-confinante sur l'écoulement dans l'unité proglaciaire. L'unité rocheuse n'est pas considérée comme jouant un rôle important sur l'écoulement dans les sédiments à cause de

sa conductivité hydraulique réduite (voir section 2.3.2). Les coupes de la Planche 8 montrent d'abord que la section d'écoulement est très variable, tant dans l'unité proglaciaire que dans l'unité deltaïque. Ceci est apparent dans les sections longitudinales A-A' et B-B' où l'irrégularité de l'épaisseur de l'unité proglaciaire engendre des changements correspondants dans l'épaisseur saturée de l'unité deltaïque. Cette variabilité dans la section d'écoulement dans les unités proglaciaire et deltaïque est aussi apparente dans les coupes transversales D-D' à G-G' qui vont de l'amont de la zone d'étude (Coupe D-D' dans la Garnison Valcartier) jusqu'à la bordure de la rivière Jacques-Cartier (Coupe G-G'). Les sections transversales mettent aussi en évidence l'effet sur l'écoulement du haut topographique du Mont Rolland-Auger dans le sud de la zone d'étude. Les niveaux de la surface libre, surtout dans les coupes E-E' et F-F', sont beaucoup plus élevés dans la partie sud, ce qui implique une composante d'écoulement importante du sud vers le nord. De plus, l'unité deltaïque apparaît peu épaisse et avec très peu de section d'écoulement au sud de la zone d'étude (surtout dans la coupe G-G'). Enfin, les coupes longitudinales montrent qu'il y a continuité des sédiments perméables de l'unité deltaïque au contact de la rivière Jacques-Cartier. Ce contact hydraulique est apparent dans l'abaissement de l'élévation de la surface libre à l'approche de la rivière. L'absence apparente de l'unité de silt glaciomarin, au moins sous une partie de la rivière, implique également que l'eau souterraine circulant dans l'unité proglaciaire pourrait aussi être drainée par la présence de la rivière.

#### 2.2.3 Distribution et modèle 3D des unités hydrostratigraphiques

Les Planches 9 à 12 présentent les cartes de l'élévation et de l'épaisseur des unités géologiques qui ont été générées. Ces cartes montrent la distribution des sédiments qui ont été montrés dans les coupes stratigraphiques. Lorsqu'une unité est absente (épaisseur nulle), la surface montrée sur les cartes correspond en fait à l'élévation de l'unité sous-jacente.
D'abord, la Planche 9 montre l'élévation de la surface du roc et l'épaisseur totale des sédiments dans la zone d'étude. Cette carte montre la poursuite à Shannon de la vallée enfouie décrite suite à la caractérisation du secteur Valcartier en 2001 (Lefebvre et al., 2003). En fait, dans la zone d'étude, la vallée enfouie est plus profonde encore que sous la Garnison Valcartier, mais cette vallée est en partie « fermée » à l'ouest par la remontée de l'élévation de la surface du roc. Il y a tout de même poursuite de cette vallée vers le sud à l'extrémité sud-ouest de la zone d'étude. Le haut topographique identifié à la limite sud-est de la zone d'étude avait été reconnu lors de la caractérisation de 2001. Ce haut fond correspond au prolongement en sous-surface vers le nord du Mont Rolland-Auger. Compte tenu du faible relief en général de la surface du sol dans la zone d'étude, la distribution de l'épaisseur totale de sédiments suit la même configuration que celle de la topographie du roc. L'épaisseur totale de sédiments atteint 40 m au centre de la vallée enfouie avec une accumulation maximale de plus de 50 m. Il n'y a pas de sédiments à la marge sud de la zone d'étude à cause de la remontée du roc sur le flanc du Mont Rolland-Auger. Il y a aussi une épaisseur limitée de sédiments dans la partie nord de la zone d'étude où la surface du roc remonte également. Dans la partie ouest de la zone d'étude, la rivière Jacques-Cartier a érodé considérablement les sédiments pour créer une dépression de l'ordre de 10 m dans l'épaisseur des sédiments.

La Planche 10 illustre l'épaisseur et l'élévation de la surface de l'unité proglaciaire, laquelle inclut le till qui ne pouvait être généralement distingué des sédiments proglaciaires principalement en raison de la méthode de forage. L'élévation de la surface de l'unité proglaciaire est encore plus irrégulière que la surface du roc (Planche 9), cette irrégularité s'expliquant principalement par le style de mise en place (amas proglaciaires) de l'unité. Cependant, la surface de l'unité proglaciaire présente encore la morphologie d'une vallée enfouie au centre de la zone d'étude. La dépression à la surface du proglaciaire est par contre séparée en deux « bassins », l'une au centre de la zone d'étude et l'autre dans la partie est du côté de la Garnison Valcartier. La surface de l'unité

proglaciaire montre aussi des remontées au nord ainsi qu'au sud de la zone d'étude qui sont contrôlées par la topographie de la surface du roc (Planche 9). Au niveau de son épaisseur, il y a des accumulations plus importantes de sédiments proglaciaires à la marge nord de la vallée présente dans la surface du roc (Planche 9), à peu près au centre de la zone d'étude, ainsi que dans sa partie sud-ouest. L'épaisseur maximale de sédiments proglaciaires atteint plus de 20 m localement, mais l'épaisseur de proglaciaire est généralement plus près de 10 m au centre et au sud-ouest de la zone d'étude. L'effet de l'érosion des sédiments proglaciaires par la rivière Jacques-Cartier est apparent dans la carte de son épaisseur dans la partie sud-ouest de la zone d'étude. À cet endroit la rivière est donc directement en contact avec les sédiments proglaciaires. Enfin, il y a absence de l'unité proglaciaire en bordure du Mont Rolland-Auger et une réduction de son épaisseur au nord qui sont toutes les deux contrôlées par la remontée de la surface du roc.

La Planche 11 montre l'épaisseur et l'élévation de la surface de l'unité de silt glaciomarin. En fait, la surface du silt ressemble beaucoup à celle des sédiments proglaciaires (Planche 10) parce que l'unité de silt est peu épaisse et ne change donc pas significativement la morphologie de la surface laissée en place suite au dépôt des sédiments proglaciaires. L'épaisseur du silt est assez irrégulière, généralement entre 1 et 3 m, avec des valeurs maximales rarement atteintes de plus de 4 m, dans la partie centre est de la zone d'étude. L'extension du silt glaciomarin du côté ouest de la rivière Jacques-Cartier est incertaine à cause du peu de données à cet endroit. Il y a absence de silt dans la partie nord de la zone d'étude ainsi qu'au sud où la surface du proglaciaire ou du roc est plus élevée. Il y a aussi absence de silt dans un axe linéaire au centre ouest de la vallée enfouie, cette absence étant probablement due à l'enfouissement de culots de glace morte (*kettles*) lors de la mise en place des amas de sédiments proglaciaires. L'extension latérale du silt glaciomarin est plus incertaine à cause du silt glaciomarin est plus incertaine à cause de la difficulté d'identifier cette unité dans les forages destructifs, particulièrement

lorsque cette unité est mince. Il se peut donc que cette unité soit présente à des endroits où elle n'a pas été identifiée dans les forages.

La Planche 12 présente l'épaisseur de l'unité de sable deltaïque et l'élévation de la surface du sol. Dans la zone d'étude, l'élévation de la surface du sol est assez uniforme et régulière, sauf en bordure de la rivière Jacques-Cartier à l'ouest, ainsi qu'au sud à la bordure du Mont Rolland-Auger. Il y a de l'irrégularité dans l'épaisseur de sédiments deltaïques qui ont comblé la dépression dans la topographie de la surface de l'unité glaciomarine ou proglaciaire sous-jacente. Ainsi, la répartition de l'épaisseur de sédiments deltaïques (Planche 12) est similaire à la surface du silt glaciomarin (Planche 11). Au centre de la zone d'étude, il y a une restriction importante dans l'épaisseur totale des sédiments deltaïques qui est orientée nord-sud, perpendiculaire à l'écoulement. L'effet de l'érosion par la rivière Jacques-Cartier est particulièrement marqué dans l'épaisseur des sédiments deltaïgues. Au niveau du contrôle sur l'écoulement de l'eau souterraine, il est important de noter que les sédiments deltaïques ne sont épais en bordure de la rivière Jacques-Cartier que dans une bande très restreinte. C'est dans cet intervalle que l'on retrouve les résurgences de la nappe libre sur le flanc est de la rivière Jacques-Cartier. Les sédiments deltaïques sont absents de la partie sud de la zone d'étude où les surfaces de l'unité proglaciaire et du roc sont élevées. Il y a aussi une épaisseur restreinte de sables deltaïques dans la partie nord de la zone d'étude, encore une fois en raison de la remontée de la surface du roc et du proglaciaire.

Toutes les surfaces des unités géologiques ainsi que la surface du sol ont été intégrées dans un modèle géologique en trois dimensions couvrant toute la zone d'étude (Planche 13). La surface libre a aussi été intégrée dans le modèle 3D et elle délimite les sédiments saturés et non saturés. Ce modèle est présenté sous forme de coupes verticales avec une vue à partir du Mont Rolland-Auger, dans le coin sud-est de la zone d'étude, vers le nord-ouest de la zone. Le modèle permet de bien visualiser l'irrégularité topographique de la surface du roc et des autres unités. Le modèle montre bien aussi les conditions dans la principale unité aquifère, les sables deltaïques. On ne retrouve pas l'unité deltaïque dans la partie sud et sud-est de la zone d'étude. L'épaisseur saturée est aussi faible au sud-est et la nappe se retrouve dans les sédiments proglaciaires dans ce secteur. La section d'écoulement dans les sédiments deltaïques est importante à l'est (Garnison) et elle est diminuée par le monticule de sédiments proglaciaires au centre de la zone d'étude. Le silt glaciomarin est absent de la partie nord-est ainsi que de la partie sud de la zone d'étude et le lien hydraulique entre les unités deltaïque et proglaciaire est complexe. La rivière Jacques-Cartier a érodé tous les sédiments deltaïques aux extrémités nord et sud où elle est directement en contact avec les sédiments proglaciaires, tandis qu'au centre de la zone d'étude la rivière est en contact avec les sédiments deltaïques. Compte tenu du fait que les matériaux proglaciaires et deltaïgues sont bien perméables, la morphologie des unités telle qu'illustrée par le modèle géologique 3D, comme il en sera discuté plus loin, exerce un contrôle important sur les directions d'écoulement de l'eau souterraine dans la zone d'étude (section 2.3.3). Nous verrons donc plus loin à la section 2.5 que ces conditions géologiques et d'écoulement expliquent bien la distribution du TCE dissous observée dans la zone d'étude. La compréhension du contexte hydrostratigraphique s'avère donc essentielle à l'explication de la contamination en TCE dans la zone d'étude et elle sera également clé dans la sélection et la mise en œuvre éventuelle de mesures de contrôle de cette contamination.

## 2.3 Propriétés hydrauliques et écoulement de l'eau souterraine

#### 2.3.1 Méthodologie

#### 2.3.1.1 Essais de perméabilité

Afin de déterminer la conductivité hydraulique des matériaux, des essais de perméabilité (*slug tests*) ont été réalisés et interprétés par Sanexen-Amec (2005) dans les nouveaux puits d'observation installés dans les forages réalisés à Shannon en 2004. Les essais de perméabilité permettent de mesurer *in situ* la

conductivité hydraulique localement autour de la crépine d'un puits. Le concept de cet essai est de provoquer une perte ou un gain de charge hydraulique artificiellement, i.e. par ajout ou retrait d'eau ou par injection d'air dans le puits. Ensuite, à l'aide d'un capteur de pression présent dans le puits sous le niveau statique de l'eau, la remontée ou la descente de la charge est mesurée en fonction du temps. Le taux de remontée ou de descente permet de déterminer la conductivité hydraulique du matériel aquifère présent autour de la crépine. À Shannon, les essais ont été réalisés avec les mêmes procédures courantes et avec le même type de système pneumatique que lors des travaux réalisés dans le secteur Valcartier en 2001 (Lefebvre et al., 2003). Cette procédure utilise l'injection d'air comprimé dans le tubage au-dessus du niveau d'eau à l'aide d'un appareillage muni d'une valve d'injection, de manomètres et d'une valve permettant de relâcher instantanément la pression dans le puits. Levy et Pannell (1991) ont démontré que l'utilisation d'un tel système était avantageuse par rapport aux méthodes conventionnelles dans les aquifères granulaires à conductivité hydraulique élevée où la remontée du niveau d'eau ne prend que quelques secondes. De plus, avec cette méthode, il n'y a aucun ajout ou retrait d'eau, ce qui évite tout contact avec de l'eau contaminée. Enfin, le rabattement imposé à la nappe peut être contrôlé à l'aide d'un manomètre qui lit la pression d'air dans le puits. Par conversion de la pression, il est possible de connaître le rabattement équivalent en centimètres d'eau dans le puits.

Selon le type de matériel aquifère rencontré et le mode de construction des puits d'observation testés, différentes réponses peuvent survenir lors de la remontée du niveau d'eau dans le puits après avoir relâché la pression d'air pour permettre la remontée d'eau. À Shannon, comme pour les travaux dans le secteur Valcartier (Lefebvre *et al.*, 2003), trois types de réponses ont été observés (Sanexen-Amec, 2005) : la réponse log-linéaire, la réponse oscillatoire et une réponse qui pourrait être qualifiée d'intermédiaire, i.e. une réponse semi-oscillatoire.

Les réponses oscillatoires (underdamped) sont celles qui ont été le plus souvent rencontrées, i.e. dans environ 52% des essais. La réponse log-linéaire (overdamped) a été obtenue dans 38% des tests tandis que la réponse semioscillatoire (critically damped) a été rencontrée dans 10% des essais. Pour avoir une réponse oscillatoire, il faut que l'inertie de la colonne d'eau dans le puits soit considérée non-négligeable (Kruseman et de Ridder, 1994). Ceci survient lorsqu'un puits possède une longue colonne d'eau pour une courte crépine dans du matériel très perméable. Pour les réponses log-linéaires, l'inertie de la colonne d'eau est considérée comme négligeable. Le troisième type de réponse survient lorsque le comportement est intermédiaire. Le tableau 2 résume les types de réponses obtenus dans les différentes formations testées. L'assignation des unités géologiques aux intervalles crépinés dans le tableau 2 est celle faite par l'INRS-ETE et elle diffère à certains endroits de celle faite par Sanexen-Amec (2005) (Les données de conductivité hydrauliques sont compilées à l'annexe C). Au total, 91 essais de perméabilités ont été complétés avec succès dans les puits d'observation et lors de 8 sondages par enfoncement, tandis que 7 essais ont été jugés non concluants et qu'un puits (au roc) n'était pas accessible lors de la période de réalisation des essais de perméabilité (Sanexen-Amec, 2005).

Le tableau 2 indique aussi les trois méthodes d'interprétation des essais de perméabilité qui ont été utilisées pour déterminer la conductivité hydraulique selon le type de réponse obtenue lors des essais de perméabilité (Sanexen-Amec, 2005). La méthode de Uffink (1984) a été appliquée à l'interprétation des essais avec un comportement oscillatoire, la méthode de Bouwer et Rice (1976) a été utilisée pour les réponses log-linéaires et, enfin, la méthode de Butler et Garnett (2000) a été employée pour les réponses semi-oscillatoires. Ce sont les mêmes méthodes d'interprétation que celles utilisées pour l'interprétation des essais réalisés dans le secteur Valcartier en 2001 (Lefebvre *et al.*, 2003). Puisque les procédures et les méthodes d'interprétation ont été les mêmes lors des études dans le secteur Valcartier en 2001 et Shannon en 2004, les résultats

peuvent être comparés entre eux. L'annexe C présente les données de conductivités hydrauliques obtenues dans le cade de la présente étude.

## 2.3.1.2 Piézométrie

La mesure des niveaux d'eau et l'établissement de cartes piézométriques permettent de déterminer les directions d'écoulement des eaux souterraines dans un aquifère. Une carte piézométrique se construit en interpolant entre les puits d'observation puis en reliant les positions ayant la même altitude de la surface piézométrique par des courbes d'élévation du niveau de l'eau souterraine appelées isopièzes. Les isopièzes sont donc des lignes représentant la position d'une charge hydraulique spécifique de valeur constante.

Dans le contexte géologique rencontré à Shannon, l'écoulement de l'eau souterraine se fait principalement dans les deux unités aquifères présentes dans les dépôts meubles, de même que dans le roc. Sanexen-Amec (2005) a réalisé des mesures de niveaux d'eau dans les puits d'observation complétés dans ces trois formations géologiques à Shannon de même que dans quelques puits sur la Garnison Valcartier. Nous avons réalisé trois cartes piézométriques pour ces trois unités en complétant les mesures faites par Sanexen-Amec (2005) avec d'autres mesures disponibles à la Garnison Valcartier, par des niveaux d'eau en bordure de la rivière Jacques-Cartier de même que par certains contrôles manuels imposés pour obtenir des contours réalistes compte tenu des principes de l'écoulement de l'eau souterraine. La piézométrie a aussi été corrigée par rapport à la carte d'élévation de la surface du roc pour enlever l'interpolation de la surface piézométrique dans les secteurs où elle était interpolée à une élévation inférieure à celle du roc. Les données utilisées pour réaliser les cartes piézométriques sont compilées à l'annexe D.

À Shannon, compte tenu de la densité élevée des points de contrôle du niveau d'eau, les isopièzes ont été dessinés à chaque mètre d'altitude de la nappe. Pour générer les cartes piézométriques, l'interpolation des niveaux d'eau a été

réalisée dans le logiciel Surfer (Golden Software Inc., 1999) par krigeage ordinaire (sans enlever la tendance linéaire), omnidirectionnel et linéaire avec un modèle de variogramme linéaire sans effet de pépite. La Planche 14 présente la carte de l'élévation de la surface libre interpolée à partir des mesures dans les puits avec intervalles crépinés à la surface de la nappe. Cette carte a permis la dérivation d'une carte d'épaisseur saturée des sédiments par soustraction de la maille d'élévation de la surface du roc de la maille de l'élévation de la surface libre (Planche 14). La Planche 15 (Lefebvre et al., 2006) montre les cartes piézométriques interpolées pour l'unité proglaciaire et le roc. Dans ce dernier cas, le peu de données disponibles pour le roc ne permettait pas de produire une carte couvrant l'ensemble de la zone d'étude. Pour aider à l'interpolation d'une surface piézométrique cohérente au roc, sept (7) points de contrôle provenant de la caractérisation de 2001 du secteur Valcartier ont été utilisés (localisés à SNC-TEC, RDDC et Garnison). La présence de silt glaciomarin dans la zone d'étude limite le contact hydraulique entre les unités deltaïque et proglaciaire, ce qui rend les conditions semi-captives dans le proglaciaire. La piézométrie et les directions d'écoulement sont donc distinctes dans ces deux unités. De façon à mieux comprendre les échanges possibles d'eau souterraine entre ces deux unités, trois cartes de gradients hydrauliques verticaux ont été générées dans la zone d'étude (Planche 16, Lefebvre et al., 2006). Ces cartes ont été générées en interpolant, par la méthode de l'inverse de la distance au carré (et non pas par krigeage), les valeurs des gradients verticaux mesurés à chaque localisation de forage grâce aux puits installés à différentes élévations. Ainsi, le gradient vertical dans une même unité (deltaïque ou proglaciaire) a été généré en faisant la différence de niveau d'eau entre les deux puits dans la même unité divisée par la distance entre le milieu des intervalles crépinés. Pour le calcul du gradient vertical entre les unités deltaïques et proglaciaire, ce sont les niveaux d'eau à la base de l'unité deltaïque et au sommet de l'unité proglaciaire qui ont été soustraits et divisés par la distance entre le milieu des intervalles crépinés. Puisque l'écoulement est complexe, deux coupes piézométriques ont été dessinées dans le sens de l'écoulement en utilisant toutes les mesures de niveau d'eau (Planche 17B). Ces coupes permettent d'observer la présence ou l'absence de lien hydraulique entre les unités ainsi que l'effet de la présence de la rivière Jacques-Cartier.

# 2.3.2 Propriétés hydrauliques des unités

Le tableau 3 présente les valeurs moyennes et écarts-types du logarithme des conductivités hydrauliques K (m/s) mesurées dans les unités deltaïque, proglaciaire et au roc pour la zone d'étude de Shannon en 2004 (Sanexen-Amec. 2005) ainsi que dans le secteur Valcartier en 2001 (Lefebvre et al., 2003). Le tableau 3 montre que les valeurs moyennes mesurées à Shannon sont très similaires à celles obtenues dans le secteur Valcartier. Pourtant, Boutin (2004) et Ouellon (2006) ont montré que la partie ouest du secteur Valcartier avait des faciès de l'unité deltaïque plus grossiers que l'on retrouve à Shannon. Par contre, il y a également des faciès fins à Shannon, de sorte que la valeur moyenne de K à Shannon est similaire à celle de l'ensemble du secteur Valcartier. La variabilité de K pour les différentes unités, telle que reflétée par l'écart type dans le tableau 3, est assez semblable aussi pour Shannon et Valcartier. À Shannon. la valeur movenne de K est de  $1.4 \times 10^{-4}$  m/s pour l'unité deltaïque, de 2.6x10<sup>-5</sup> m/s pour l'unité proglaciaire et de 5.6x10<sup>-6</sup> m/s pour le roc. La valeur moyenne de K pour le roc n'est soutenue que par quatre mesures et elle montre un écart type plus important. Cette variabilité de la K est normale pour un matériel dont la perméabilité dépend de la fracturation.

# 2.3.3 Piézométrie et écoulement de l'eau souterraine

Tel que mentionné dans la section 2.3.1.2 sur la méthodologie, il y a deux unités aquifères dans les dépôts meubles à Shannon : une nappe libre dans l'unité deltaïque et une nappe semi-captive dans l'unité proglaciaire qui est partiellement confinée par la présence discontinue de l'unité de silt glaciomarin entre les unités deltaïque et proglaciaire. La piézométrie et les directions d'écoulement seront donc distinctes dans ces deux unités. Suite à la

caractérisation du secteur Valcartier en 2001 (Lefebvre *et al.*, 2003), la nature et la continuité du silt glaciomarin n'avaient pas été déterminées en détail. Ainsi, la nature du lien hydraulique entre les unités deltaïque et proglaciaire n'était pas bien connue. Ces unités avaient été supposées en contact hydraulique en large partie même si la présence de gradients hydrauliques verticaux entre ces deux unités avait été notée (Lefebvre *et al.*, 2003). À Shannon, le détail de la caractérisation permet de beaucoup mieux cerner l'interaction entre ces deux unités. Il est important de mentionner que les deux nappes dans les sédiments quaternaires ne sont pas les mêmes que celles citées dans le secteur Valcartier. À Shannon, il y a peu de sédiments deltaïques fins et ceux-ci n'ont pas été définis avec assez de continuité pour former deux nappes dans les sédiments deltaïques séparées par une unité silteuse prodeltaïque. À Shannon, il n'y a qu'une nappe libre dans l'unité deltaïque et c'est plutôt dans l'unité proglaciaire qu'une deuxième nappe semi-captive est identifiée.

La Planche 14 montre une carte de l'élévation de la surface libre ainsi que les directions générales d'écoulement dans les sédiments deltaïques. La piézométrie est très bien définie par les points de contrôle disponibles, sauf sur la rive ouest de la rivière Jacques-Cartier où il y a très peu de points de contrôle. L'écoulement de l'eau souterraine dans la nappe libre se fait généralement de l'est vers l'ouest, donc de la Garnison Valcartier vers la rivière Jacques-Cartier. On observe une certaine convergence de l'écoulement vers le centre de la vallée enfouie aux abords de la rivière Jacques-Cartier. Les gradients hydrauliques horizontaux augmentent à l'approche de la rivière Jacques-Cartier, donc la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine suivra la même tendance. Dans la partie sud de la zone d'étude, il y a une composante significative de l'écoulement provenant du Mont Rolland-Auger. Ce type de comportement est observé plus à l'est au sud de SNC TEC (Lefebvre et al., 2003) mais il n'avait pas été reconnu dans la zone d'étude à Shannon à cause du peu de données piézométriques disponibles auparavant. La Planche 14 montre aussi l'épaisseur totale saturée des dépôts meubles dont la distribution est très semblable à la carte d'épaisseur de sédiments ou à l'élévation de la surface du roc (Planche 9) qui sont tous contrôlés par la forme de la vallée enfouie. Il y a jusqu'à plus de 40 m de sédiments saturés dans la zone d'étude, avec des valeurs de généralement plus de 20 m saturé dans la partie centrale de la vallée enfouie.

La Planche 15 montre la piézométrie et les directions générales d'écoulement de l'eau souterraine dans l'unité proglaciaire. Tout comme pour la nappe libre l'écoulement se fait de l'est vers l'ouest et il y a une convergence importante de l'écoulement aux abords de la rivière Jacques-Cartier. La composante de l'écoulement à partir du Mont Rolland-Auger n'est pas aussi apparente que pour la nappe libre mais il n'y a pas autant de contrôle pour l'unité proglaciaire pour permettre de définir une telle composante. Il n'y a pas assez d'information pour définir l'écoulement dans les sédiments proglaciaires du côté ouest de la rivière Jacques-Cartier. La Planche 15 montre aussi la piézométrie du roc qui est peu définie à partir de 5 puits seulement dans la zone d'étude. Cependant, pour obtenir le patron d'écoulement au roc d'autres puits hors de la zone d'étude ont été utilisés. Encore une fois, l'écoulement de l'eau souterraine au roc se fait vers la rivière Jacques-Cartier avec un patron d'écoulement semblable à celui de l'unité proglaciaire.

Puisque l'unité de silt glaciomarin confine partiellement l'unité proglaciaire de l'unité deltaïque sus-jacente, des cartes de gradients hydrauliques verticaux ont été produites pour aider à comprendre les échanges entres les unités proglaciaire et deltaïque. La Planche 16 montre ainsi trois cartes de gradients hydrauliques verticaux, deux cartes des gradients hydrauliques verticaux à l'intérieur des unités deltaïque (A) et proglaciaire (B) et une carte des gradients entre ces unités (C). Dans l'unité deltaïque, les gradients verticaux sont très peu prononcés, sauf à deux puits où de très forts gradients verticaux sont observés (vers le haut dans un cas et le bas dans l'autre). Un doute existe au sujet de la validité de ces forts gradients car très peu de gradients verticaux étaient attendus dans une unité très perméable et sans discontinuités verticales comme l'unité deltaïque. Il faudrait faire la vérification de la piézométrie des puits montrant des gradients hydrauliques verticaux importants. Dans l'unité proglaciaire, la signification des patrons des gradients verticaux observés est très difficile à déterminer. Un doute persiste sur certaines très fortes valeurs de gradients observées. Par contre, il est normal d'observer un gradient indiquant un écoulement vers le bas au sud de la zone d'étude près du Mont Rolland-Auger car cette composante d'écoulement vers le bas résulte probablement de la recharge sur un haut topographique. Il y a un effet possiblement similaire au nord de la zone d'étude où le silt glaciomarin est absent. Au niveau des gradients verticaux entre les unités deltaïque et proglaciaire, il est encore une fois normal d'avoir un gradient indiquant un écoulement vers le bas au sud de la zone d'étude à cause de la recharge.

Compte tenu des difficultés à déterminer la signification des gradients hydrauliques verticaux, des coupes piézométriques ont été produites pour mieux comprendre la nature de l'écoulement et dans les unités proglaciaire et deltaïque et les conditions qui engendrent des gradients verticaux. La Planche 17 montre ces coupes qui sont tracées dans le sens de l'écoulement de l'eau souterraine (leur localisation est montrée sur la Planche 17A). Sur ces coupes, les isopièzes sont superposées à la stratigraphie. Dans la coupe A-A', l'efficacité de l'unité de silt glaciomarin à engendrer des conditions semi-captives dans l'unité proglaciaire est apparente. En effet, on note des charges hydrauliques distinctes (près de 1 m de différence) dans les unités deltaïques et proglaciaires à certains endroits où le silt glaciomarin est présent. Ces importants gradients hydrauliques verticaux impliquent une tendance à l'écoulement vers le haut, du proglaciaire au deltaïque. De telles conditions sont favorables pour limiter la migration du TCE présent dans l'unité deltaïque vers l'unité proglaciaire (voir Planche 21). Sur la coupe A-A', on observe aussi une augmentation des gradients hydrauliques horizontaux dans l'unité proglaciaire lorsque la section d'écoulement est réduite (entre les puits PO-106-45 et le PO-SH19). Cependant, de tels effets ne sont pas vraiment apparents dans l'unité deltaïque. Dans l'unité deltaïque, il y a par contre une augmentation du gradient hydraulique horizontal aux abords de la rivière Jacques-Cartier. Cette augmentation du gradient implique un bon contact hydraulique entre l'unité deltaïque et la rivière et indique que celle-ci draine l'aquifère superficiel. La coupe B-B' montre une piézométrie encore mieux définie que pour la coupe A-A'. L'effet de l'unité de silt glaciomarin qui engendre des conditions semi-captives est encore apparent : les charges hydrauligues sont très distinctes dans les unités deltaïques et proglaciaires où le silt est présent. Par contre, les gradients hydrauliques verticaux sont moins importants entre les deux unités que sur la coupe A-A'. Il y a a bien une tendance à l'écoulement vers le haut, du proglaciaire au deltaïque, mais il est plus local (surtout autour de PO-SH-27). Les changements de gradients hydrauliques dans l'unité proglaciaire ne sont pas aussi cohérents que sur la coupe A-A' lorsque section d'écoulement est réduite. Dans la coupe B-B', cet effet semble plus apparent dans l'unité deltaïque. Encore une fois, il y a une augmentation importante du gradient hydraulique horizontal dans l'unité deltaïque près de la rivière Jacques-Cartier. Cet effet est aussi bien apparent dans l'unité proglacaire qui doit donc elle aussi être en bon contact hydraulique avec la rivière Jacques-Cartier pour ainsi subir son influence. Il est important de noter l'absence de silt glaciomarin aux abords de la rivière Jacques-Cartier sur la coupe B-B', ce qui permet à la rivière d'exercer une influence hydraulique sur les deux unités deltaïque et proglaciaire.

# 2.4 Rivière Jacques-Cartier

Winter et al. (1999) mentionnent que l'interaction entre l'eau de surface et l'eau souterraine est affectée par l'échange entre les systèmes local et régional d'écoulement souterrain avec les rivières et par l'inondation et l'évapotranspiration. Les petites rivières recevront l'apport de l'eau souterraine des systèmes locaux, qui ont une étendue limitée et sont très variables de façon saisonnière. Pour les plus grandes rivières, c'est plutôt le système d'écoulement

régional qui contribue le plus. La rivière Jacques-Cartier, en tant que rivière importante serait donc plus associée à un système régional.

## 2.4.1 Description de la rivière Jacques-Cartier

Les informations suivantes sont tirées du Conseil du bassin versant de la Rivière Jacques-Cartier (CRJC, 2004). La rivière Jacques-Cartier a une longueur de 177 km et elle draine un bassin de 2 515 km<sup>2</sup> (Planche 18). Elle est située au centre-sud du Québec, prenant sa source dans les Laurentides, entre Chicoutimi et Québec, et son embouchure est à 30 km à l'ouest de la ville de Québec.

Le bassin se divise en deux ensembles géographiques distincts: la "section haute" au nord et la "section basse" au sud. La section haute du bassin de la rivière Jacques-Cartier est située dans les Laurentides, au nord de Tewkesbury, dans les terres boisées protégées par une réserve faunique et un parc de conservation. La section basse est située dans la vallée du Saint-Laurent et à la bordure méridionale du Bouclier canadien. Elle s'étend entre Donnacona et Tewkesbury. La population se répartit parmi six petites municipalités riveraines : Donnacona (5 900 h), Pont-Rouge (3 850 h), Sainte-Catherine (3 590 h), Shannon (3 620 h), Saint-Gabriel-de-Valcartier (3 160 h) et Tewkesbury (3 690 h).

Selon Lord (2004), l'analyse des débits de crue et d'étiage des années 1997 à 2004 pour la rivière Jacques-Cartier dans le secteur de Tewkesbury (station n<sup>o</sup> 050801) indique que les débits maximaux surviennent la plupart du temps au cours des deux premières semaines du mois de mai, à l'exception des années 1997 et 2002 (1<sup>er</sup> juin) et 1998 (17 juin). Les débits sont alors en moyenne de l'ordre de 425 m<sup>3</sup>/sec. Les débits maximums ont eu lieu en 1999 (568,2 m<sup>3</sup>/sec) et 2002 (508,5 m<sup>3</sup>/sec). Le débit maximal printanier de 2004 a été établi à 231,5 m<sup>3</sup>/sec. C'est le plus faible débit maximal ces années (1997 à 2004). Pour leur part, les débits minimums pour la même station surviennent au mois de mars avec des valeurs moyennes de l'ordre de 11,5 m<sup>3</sup>/sec. Les débits

minimums survenus à d'autres périodes ont été observés en août 1998 avec 23,39 m<sup>3</sup>/sec et en septembre 2002 avec 17,35 m<sup>3</sup>/sec.

Les débits journaliers de la rivière proviennent de la station hydrométrique 050801, situé au niveau du pont de la rue Gosford (Planche 19, Lefebvre *et al.*, 2006, Figure C), qui est entretenu par le Centre d'expertise hydrique du Québec (Ministère de l'Environnement). Les données à cette station sont disponibles à partir de 1923 jusqu'à maintenant, mais dans le cadre de ces travaux, seule la période d'octobre 2004 à octobre 2005 a été utilisée. La superficie du bassin versant en amont de la station de jaugeage est de 2010 km<sup>2</sup>. Le Centre d'expertise hydrique du Québec a également fourni des données concernant la bathymétrie de la rivière Jacques-Cartier provenant d'une étude sur les zones inondables (Godin et Hébert, 1993).

Plusieurs travaux antérieurs ont permis de caractériser de façon sommaire les eaux de surface de la rivière Jacques-Cartier. En 2002, les Services Environnementaux Sanexen (2003) a réalisé une étude afin d'échantillonner l'eau de la rivière Jacques-Cartier, en neuf endroits, afin de connaître les concentrations en TCE et ses sous-produits de dégradations. Une résurgence de l'eau souterraine vers la rivière a également été échantillonnée. En 2003 également, la firme Technisol Environnement (Lord, 2004) a échantillonné trois sites au niveau de la rivière. Finalement, en 2003 Environnement Canada (B. Michaud, comm. pers., 2004) a échantillonné trois résurgences en bordure de la rivière Jacques-Cartier et quatre sites dans la rivière.

# 2.4.2 Hydrologie

#### 2.4.2.1 Méthodologie

La méthodologie liée à l'utilisation des débits pour évaluer la décharge de l'eau souterraine vers l'eau de surface est tirée des ouvrages de Winter *et al.* (1998), de Sophocleous (2002), de Gray (1972), Rasmussen et Rouleau (2003), de

Becker *et al.* (2004), de Benhammane (2002), de Nathan et McMahon (1990) et de Chapman (1991 et 1999).

Un hydrogramme est la représentation graphique du débit instantané d'un cours d'eau en fonction du temps. Il inclut tous les débits d'eau produits par le ruissellement, l'écoulement hypodermique, l'écoulement souterrain et les précipitations dans le cours d'eau (Nathan et McMahon, 1990; Sophocleous, 2002; Gray, 1972). Généralement, dans les régions tempérées, les cours d'eau sont des exutoires des aquifères, la situation inverse est observée seulement localement. La méthode la plus commune pour évaluer la décharge de l'eau souterraine vers un cours d'eau est l'utilisation de la séparation d'hydrogramme de flux de rivière qui consiste à séparer le débit de base (baseflow) et l'écoulement de surface (quickflow). Cette méthodologie nécessite un grand nombre de données de débits de rivière, donc une station de jaugeage sur le cours d'eau (Winter et al. 1998, Rasmussen et Rouleau, 2003). L'avantage de cette méthode est qu'elle fournit de l'information qui concerne l'ensemble de l'aquifère, tandis que des mesures plus locales en fond de rivière (infiltromètres, mini-piézomètres) permettent de quantifier la variabilité spatiale de la décharge en des points isolés seulement (Rasmussen et Rouleau, 2003). Son principal désavantage est qu'elle est une méthode empirique dont les paramètres ne peuvent être mesurés (Nathan et McMahon, 1990).

Il existe quatre types d'approches pour la séparation d'hydrogramme de débits de rivière : 1) géochimique, 2) graphique, 3) par filtre et 4) analytique. L'approche par filtre de Chapman (1991, 1999), méthode automatique qui ne nécessite pas de jugement et d'expérience de l'utilisateur, a été utilisée pour séparer les données de la station de jaugeage sur la rivière Jacques-Cartier pour la période d'octobre 2004 à octobre 2005. Chapman (1991) améliore l'équation du filtre de Nathan et McMahon (1990). L'amélioration a lieu au niveau des périodes de récession en permettant une diminution du débit de base, alors que Nathan et McMahon (1990) le considère constant. L'algorithme de Chapman

(1991) permet donc un meilleur ajustement du graphique quand il faut rejoindre la courbe de débit total. Cette méthode utilise l'équation suivante :

$$Q_{b}(i) = \frac{\alpha}{2-\alpha} Q_{b}(i-1) + \frac{1-\alpha}{2-\alpha} Q(i)$$

avec les variables définies comme suit :

 $Q_b(i)$  : Débit de base au temps *i* (L<sup>3</sup>/T);  $\alpha$  : Constante du filtre;  $Q_b(i-1)$  : Débit de base au temps *i-1* (L<sup>3</sup>/T); Q(i) : Débit total dans la rivière au temps i (L<sup>3</sup>/T).

Un changement à cette équation a été apporté afin que le débit de base ne dépasse pas le débit total dans la rivière. Le débit de base au temps i correspond à  $Q_b(i)$ , alors que le débit total dans la rivière est Q. La valeur de constante du filtre ( $\alpha$ ) de 0.925 a été appliquée. La valeur  $\alpha$  s'ajuste manuellement par essai et erreur, mais d'après Nathan et McMahon (1990), les valeurs de la constante du filtre ( $\alpha$ ) optimales se situe entre 0.9 et 0.95. Selon Chapman (1991), la valeur de  $\alpha$  de 0.925 a donné des résultats réalistes dans plusieurs études de cas. Le désavantage de cette méthode est relié à l'évaluation de la constante du filtre ( $\alpha$ ), car elle est non mesurable et implique une incertitude au niveau des résultats. L'application de cette approche avec les données disponibles est présentée à l'annexe E.

La relation entre l'aquifère et le cours d'eau peut aussi être établi par le suivi de la position de la nappe libre. Ce suivi peut être réalisé par l'installation de capteurs de pression avec enregistrement continu des mesures dans un puits à proximité de la rivière. Un capteur a donc été placé dans le puits PO-SH-1B, qui a une crépine de profondeur moyenne 23 m et qui chevauche à la fois l'unité deltaïque et l'unité proglaciaire, le silt glaciomarin étant absent à cet endroit (Planche 19C et D). Le suivi de la position de nappe libre jumelée au suivi de la position de l'eau dans la rivière Jacques-Cartier à la station de jaugeage permet de mieux comprendre l'échange entre les deux entités. Le suivi a été fait dans la période de mai 2005 à octobre 2005. Sur la base des travaux sur les zones inondables de Godin et Hébert (1993) effectués sur la rivière Jacques-Cartier, les niveaux d'eau dans la rivière à la station de jaugeage 050801, ont été corrigés de 0.2 m plus bas, afin d'avoir les valeurs dans la rivière vis-à-vis le puits PO-SH-1B. Les résultats de ces suivis sont présentés à l'annexe E.

#### 2.4.2.2 Résultats

La Planche 19A présente la séparation d'hydrogramme réalisée à la station de jaugeage (050801) de la rivière Jacques-Cartier avec les données météorologiques provenant de la station Forêt Montmorency RCS d'Environnement Canada (2005). Les données de débits (m<sup>3</sup>/jour) de la station de jaugeage ont été converties en données de flux (mm/jour) à l'aide de la superficie de la zone de drainage du bassin versant à la station (2010 km<sup>2</sup>) (voir annexe E pour feuille de calcul). D'après l'hydrogramme, il est possible d'interpréter, en moyenne, les proportions d'évapotranspiration, de ruissellement de surface et d'eau souterraine rechargeant la rivière (baseflow). Les données de 2004-2005, nous permettent de dire que la proportion d'évapotranspiration par rapport aux précipitations est en moyenne de 33%, donc la proportion d'eau s'écoulant dans la rivière est de 67% des précipitations totales. Dans cette proportion, d'après le filtre de Chapman (1999), une proportion de 35% s'en va en ruissellement de surface, et 32% correspond donc à l'écoulement souterrain dans le système. Ce qui permet de déduire que l'eau souterraine recharge la rivière Jacques-Cartier dans une assez grande proportion. L'hydrogramme sert aussi à voir les périodes de recharge élevée de la rivière Jacques-Cartier dans la période jaugée, qui correspond au printemps 2005 et à l'automne 2005. Inversement, les périodes de plus faible recharge se produisent à l'hiver et à l'été. La séparation d'hydrogramme a été faite sur une seule année (2004-2005), bien que l'utilisation de plusieurs année aurait permis de mieux estimer les

40

diverses proportions pour l'ensemble du bassin de la rivière Jacques-Cartier. Le but de ces travaux n'était pas d'estimer des paramètres pour l'ensemble du bassin sur plusieurs années, mais bien obtenir une valeur ponctuelle pour l'année où les travaux de terrain ont été réalisés.

La Planche 19B montre également le graphique des niveaux d'eau dans la rivière Jacques-Cartier en fonction du temps et ceux dans le puits PO-SH-1B en bordure de la rivière à Shannon. Les niveaux d'eau dans la rivière sont corrigés de -0.2 m afin de représenter les niveaux d'eau vis-à-vis le puits PO-SH-1B. Le suivi dans la période ciblée démontre bien que le niveau d'eau dans la rivière est toujours plus faible que le niveau d'eau dans l'eau souterraine du puits jaugé. Ce qui porte à croire que l'écoulement dans cette période de temps s'effectue toujours de l'eau souterraine vers la rivière Jacques-Cartier. Le graphique sert aussi à démontrer que le niveau de l'eau souterraine est plus élevé au printemps, diminue à l'été et augmente à l'automne. La différence de charge entre l'eau souterraine et l'eau de la rivière est en moyenne de 2,5 m de plus dans l'eau souterraine pour cette période de temps. Le gradient hydraulique indiguant un écoulement de l'eau souterraine vers la rivière Jacques-Cartier est donc d'environ 0,3 en moyenne dans la période jaugée. La très forte corrélation et l'absence de décalage (montré dans le zoom de la figure B sur la Planche 19) entre les variations des niveaux d'eau dans la rivière et dans l'aquifère démontrent qu'ils sont en lien hydraulique direct. Il est impossible de dire quelle variation, entre l'eau souterraine et de l'eau de surface, survient en premier parce que la fréquence de mesure est seulement d'une fois par jour (à 10 :00 h) et les épisodes de pics arrivent la même journée.

# 2.4.3 Résurgences

#### 2.4.3.1 Méthodologie

Les résurgences indiquent les endroits où la nappe affleure à la surface du sol en bordure de la rivière. Dans le cadre des travaux de caractérisation, cinq résurgences ont été répertoriées et échantillonnées au niveau de la ville de Shannon (Planche 19C).

#### 2.4.3.2 Résultats

La présence de résurgences indique qu'une partie de l'eau souterraine provenant de la nappe libre dans l'aquifère deltaïque se jette dans la rivière. Parmi les cinq résurgences échantillonnées, une seule contenait de TCE avec une valeur de 42  $\mu$ g/L, ce qui indique que le panache de TCE peut émerger dans la rivière Jacques-Cartier.

# 2.4.4 Flux de filtration en fond de rivière

## 2.4.4.1 Méthodologie

La méthode de mesure du flux de filtration (seepage) en fond de rivière a été établie selon les ouvrages de Rasmussen et Rouleau (2003) et de P.E.I.W.R.B. (1989). Les mesures de flux de filtration permettent de vérifier la présence d'échange entre les eaux de surface et les eaux souterraines, de définir le type d'échange, de quantifier les flux de filtration pour évaluer l'importance des échanges, et de cibler et cartographier les zones d'échanges préférentiels. Pour ce faire, un appareil simple servant à la mesure du flux en fond de rivière (seepage meters) est utilisé. Cet appareil est constitué d'un cylindre ouvert d'un seul côté et avant une aire de section connue. Un orifice situé dans la paroi du cylindre permet la libre circulation de l'eau, de l'intérieur vers l'extérieur et viceversa. Le cylindre doit être enfoncé dans le lit de la rivière et complètement immergé, le pourtour du cylindre doit être assez étanche. Après saturation complète du cylindre, un sac est fixé de manière étanche à l'orifice. Le sac contient initialement un volume d'eau connu (L<sup>3</sup>). Si l'eau souterraine alimente le plan d'eau, le flux d'eau qui arrive sous le contenant se dirige vers le sac et augmente son volume en eau. En connaissant la durée d'un essai (T) et la différence de volume d'eau dans le sac (L<sup>3</sup>), on peut calculer les débits de filtration sous le cylindre  $(L^3/T)$  et en sachant l'aire de la section du cylindre  $(L^2)$ , on peut obtenir le flux de filtration (L/T).

Ces mesures présentent plusieurs avantages, car elles fournissent des données adéquates à un coût relativement faible. Elles ne nécessitent pas d'appareillage sophistiqué et elles sont faciles à opérer. Idéalement, plusieurs mesures devraient être effectuées à un même endroit et une moyenne des valeurs obtenues devrait être utilisée. Par contre, ces mesures doivent être effectuées sur du sable ou du gravier, dans des zones sans gros cailloux qui pourraient empêcher la libre circulation de l'eau et l'enfoncement du cylindre. Elles ne peuvent pas être exécutées lorsque la vitesse du courant est élevée, lorsque les pentes du cours d'eau sont abruptes, ni où il y a une accumulation de déchets organiques au fond du cours d'eau (feuilles, branches). Trois emplacements ont été jaugés avec succès dans la rivière Jacques-Cartier (Planche 19C).

## 2.4.4.2 Résultats

Sur les trois emplacements jaugés dans la rivière Jacques-Cartier, un seul contenait de TCE à une concentration de 3  $\mu$ g/L. Les mesures de flux entrant obtenues sont de l'ordre de 4x10<sup>-9</sup> m/s à 3x10<sup>-7</sup> m/s (tableau 4). Ces mesures de flux entrant indiquent que l'eau souterraine s'écoule vers la rivière Jacques-Cartier et la présence de TCE dans un des endroits indique qu'une partie du panache de TCE atteint la rivière Jacques-Cartier.

## 2.4.5 Mini-piézomètres

## 2.4.5.1 Méthodologie

La méthodologie utilisant les mini-piézomètres en fond de rivière est également tirée des ouvrages de Rasmussen et Rouleau (2003) et de P.E.I.W.R.B. (1989). La mesure des gradients hydrauliques verticaux avec un mini-piézomètre consiste à définir le type d'échange entre les eaux de surface et les eaux souterraines, à quantifier l'importance du gradient hydraulique vertical, et à cibler et cartographier les zones préférentielles d'entrée ou d'évacuation des eaux souterraines dans les cours d'eau. Le mini-piézomètre est composé d'une tige de métal creuse et d'une crépine à son extrémité. La crépine est enfoncée à une profondeur connue dans le lit du cours d'eau. La différence entre le niveau d'eau à l'intérieur du mini-piézomètre et le niveau du cours d'eau peut alors être mesuré. Un niveau d'eau supérieur à la surface de la rivière dans le minipiézomètre indique un gradient hydraulique correspondant à un écoulement de l'eau souterraine vers l'eau de surface. Un niveau d'eau inférieur dans le minipiézomètre indique un gradient hydraulique correspondant à un écoulement de l'eau souterraine vers l'eau de surface. Un niveau d'eau inférieur dans le minipiézomètre indique un gradient hydraulique correspondant à un écoulement de l'eau de surface vers l'eau souterraine.

Les mesures du gradient hydraulique vertical présentent plusieurs avantages, car elles fournissent des données adéquates à un coût relativement peu élevé. Elles sont également simples à effectuer, sans appareillage sophistiqué. Par contre, ces mesures sont efficaces surtout dans les sables et graviers, car dans les sédiments trop fins, la crépine risque de s'obstruer. De plus, le temps de stabilisation du niveau d'eau dans le mini-piézomètre peut être beaucoup plus long dans les couches imperméables.

Lorsque les mesures de gradient hydraulique vertical sont effectuées simultanément aux mesures de flux de filtration, on peut appliquer la loi de Darcy pour estimer la conductivité du lit de la rivière. Il est tout de même conseillé de prélever des échantillons de sédiments pour caractériser la composition du lit du cours d'eau pour des résultats exacts et vérifiables. Dans la rivière Jacques-Cartier, les trois emplacements jaugés sont les mêmes que pour les mesures de flux de filtration en fond de rivière (Planche 19C).

#### 2.4.5.2 Résultats

Les valeurs de gradients obtenus indiquent que l'écoulement de l'eau souterraine se fait vers la rivière Jacques-Cartier, donc qu'il y a une recharge de la rivière par l'eau souterraine. Les valeurs de gradients sont présentées au tableau 4. L'utilisation des gradients obtenus, jumelé aux valeurs de flux mesurés avec l'infiltromètre permet de calculer la conductivité hydraulique (K) du lit de la rivière d'après la loi de Darcy :

avec

q : Flux de l'eau souterraine (L/T) ;

K : Conductivité hydraulique (L/T) ;

i : Gradient hydraulique (L/L).

Les valeurs de conductivités hydrauliques calculées varient de 8.16x10<sup>-8</sup> m/s à 2.46x10<sup>-6</sup> m/s (tableau 4), ce qui apparaît faible si le type de sédiments composants le lit de la rivière Jacques-Cartier est similaire aux sables de l'unité deltaïque. Ceci est peut-être dû au fait qu'il s'agit d'une technique peu précise et qu'il aurait fallu faire plusieurs lectures à un même endroit et calculer une moyenne pour avoir des valeurs de conductivités plus représentatives. Il serait aussi important de mieux caractériser le type de sédiments qui composent le lit de la rivière Jacques-Cartier.

# 2.5 Distribution du TCE dissous

## 2.5.1 Méthodologie

La délimitation du panache de TCE dissous dans l'eau souterraine dans la zone d'étude est basée sur l'acquisition de données hydrogéochimiques provenant de l'analyse d'échantillons d'eau souterraine. De telles données permettent normalement de délimiter la distribution en plan de la concentration d'un contaminant dans un aquifère. Dans la zone d'étude, l'échantillonnage de l'eau souterraine a été fait sur toute l'épaisseur saturée pour permettre aussi de déterminer la distribution en profondeur du TCE. Deux sources de données ont été utilisées pour parvenir à caractériser le panache de TCE dissous:

- 1. Échantillonnage et analyse de l'eau des puits d'observation conventionnels ;
- Profilage de la concentration en TCE de la nappe par l'échantillonnage d'eau à différentes profondeurs par le système d'enfoncement (*direct push*) Geoprobe ;

Sanexen-Amec (2005) a réalisé les travaux d'échantillonnage et fait faire l'analyse de l'eau souterraine en suivant un protocole conforme au guide d'échantillonnage du Ministère de l'Environnement du Québec (MENV, 1994). est important de considérer la construction des puits lorsque l'on compare entre elles des concentrations de contaminants dissous dans l'eau souterraine. Plus la crépine d'un puits d'observation est longue, plus la possibilité de dilution de l'échantillon augmente. En effet, si l'intervalle vertical contenant de l'eau contaminée est moins épais ou décalé par rapport à l'intervalle crépiné, le pompage dans un puits muni d'une longue crépine peut alors recueillir à la fois de l'eau contaminée et de l'eau non contaminée. Les concentrations dans les puits d'observation munis de longues crépines représentent généralement des valeurs minimales par rapport aux concentrations réelles présentes dans l'aquifère. Par contre, les puits d'observation à longue crépine offrent l'avantage d'avoir une meilleure possibilité de détection d'un contaminant présent dans l'aquifère puisque la section verticale couverte est plus grande.

Des échantillons d'eau souterraine ont aussi été prélevés à l'aide d'une méthode de sondage par enfoncement de type "*direct push*" à partir d'un système de marque Geoprobe. Le principe de cette technologie est d'enfoncer une pointe crépinée à une profondeur désirée à l'aide d'un train de tiges pour ensuite prélever un ou plusieurs échantillons d'eau souterraine à différentes profondeurs selon un intervalle vertical donné. Au terme du sondage, la crépine et le train de tiges sont retirés, ne laissant pas d'installation dans l'aquifère qui puisse être échantillonné à nouveau. Avec ce type de système, il est ainsi possible de mesurer des profils de contamination dissoute en fonction de la profondeur.

Une carte de la distribution en plan du panache de TCE dissous a été dessinée manuellement en utilisant toutes les concentrations déterminées à un puits d'observation ou à un sondage dans la zone d'étude à Shannon de même qu'à des puits d'observation à la Garnison Valcartier (Planche 20, Lefebvre et al., 2006). Les zones de concentration en TCE utilisées sont 1) de détecté à 5 µg/L; 2) de 5 à 50 µg/L; 3) de 50 à 590 µg/L; et 4) plus de 590 µg/L. La valeur de 5 µg/L par litre a été utilisée à Shannon en tant que critère d'action par les différents intervenants dans le dossier puisque qu'il s'agit de la nouvelle recommandation de Santé Canada pour la qualité de l'eau potable vis à vis le TCE (2005) et c'est aussi la norme utilisée par la US EPA pour le TCE. La valeur de 50 µg/L est la norme pour l'eau potable au Canada (CCME). Enfin, 590 µg/L représente la norme de protection de la vie aquatique (toxicité aiguë) (MENV, 2004). Les zones établies pour le panache représentent les secteurs où les concentrations maximales observées sont généralement à l'intérieur de la plage de concentration d'une zone. En fait, il y a une certaine complexité dans la distribution des concentrations en profondeur. Les coupes utilisées précédemment pour montrer la stratigraphie ont été utilisées pour illustrer les concentrations en TCE observées en profondeur (Planche 21) en utilisant les mêmes zones de concentration que pour la carte du panache. L'annexe F documente les résultats de l'échantillonnage et de l'analyse chimique de l'eau souterraine utilisés pour ce projet.

#### 2.5.2 Distribution en plan de la contamination en TCE

Le panache de la contamination en TCE dissous dans la zone d'étude est illustré à la Planche 20. Cette carte combine les concentrations obtenues des puits d'observation et des sondages par enfoncement (*direct push*). En plus des concentrations en TCE, la carte montre l'élévation de la nappe libre ainsi que des lignes avec des flèches indiquant les directions générales de l'écoulement de l'eau souterraine dans cette nappe. Cette carte est limitée au sud de la zone d'étude par les abords du Mont Rolland-Auger où il n'y a presque plus de dépôts meubles selon la carte géologique (Michaud *et al.*, 1999). Enfin, une carte détaillée des routes et terrains permet de localiser assez précisément l'extension des zones de contamination en TCE dissous.

L'étendue du panache de contamination de l'eau souterraine en TCE est bien définie par le programme de caractérisation. La largeur du panache observée à la limite entre la garnison et Shannon est très semblable à ce qui avait été défini en 2001 (Lefebvre et al., 2003). La largeur du panache diminue considérablement entre la limite avec la Garnison à l'est (près de 500 m) et la rivière Jacques-Cartier à l'ouest (moins de 200 m). Il y a aussi un panache marginal de TCE au nord du panache principal qui a une largeur restreinte (moins de 100 m) et des concentrations en TCE inférieures à 5  $\mu$ g/L. Dans le panache principal, on retrouve les trois autres zones de concentration (5 à 50; 50 à 590; plus de 590 µg/L). Ces zones sont concentriques, avec les valeurs les plus élevées au centre et les plus faibles à l'extérieur, et leur distribution est assez cohérente. La grande majorité du panache se retrouve dans la zone de concentration entre 50 et 590 µg/L mais l'étendue de cette zone est moins grande en profondeur que sa projection en plan (le panache défini en plan utilise les valeurs maximales de concentrations en TCE retrouvées en profondeur pour délimiter les zones de concentration en TCE). La zone à plus forte concentration excédant 590 µg/L est restreinte tant en plan qu'en profondeur. Les fortes concentrations en TCE se retrouvent à l'intérieur d'un secteur défini par la limite ouest avec la garnison et le triangle des rues King, Jacques-Cartier et de la Station à Shannon. Enfin, le panache est jugé continu jusqu'à la rivière Jacques-Cartier à un niveau de concentration entre 50 et 590  $\mu$ g/L. Cependant, les concentrations, dans la résurgence et l'émergence de l'eau souterraine, échantillonnées en bordure de la rivière n'avaient que 3 et 42  $\mu$ g/L de TCE.

La forme de la distribution du TCE dans le panache est très cohérente avec les directions d'écoulement de l'eau souterraine. Ce sont les patrons d'écoulement

convergents en direction de la rivière Jacques-Cartier qui provoquent la réduction de la largeur du panache de TCE à partir de la Garnison Valcartier jusqu'à la rivière. Le phénomène s'explique par l'augmentation des gradients hydrauliques dans la nappe libre à l'approche de sa résurgence dans la rivière. Cette augmentation de gradients induit des flux (et des vitesses) de l'eau souterraine plus importants. Ceci fait en sorte que le même débit d'eau en provenance de l'aquifère libre dans l'unité deltaïque peut alors s'écouler à travers une section réduite, d'où la convergence de l'écoulement et la réduction de la largeur du panache de TCE.

#### 2.5.3 Distribution en profondeur de la contamination en TCE

Les coupes de la Planche 21 montrent les mêmes distributions des concentrations en TCE que dans le panache (Planche 20) mais en profondeur avec deux coupes longitudinales qui sont dans le sens de l'écoulement (A-A' et B-B') ainsi que quatre coupes transversales (D-D' à G-G') qui sont perpendiculaires à l'écoulement de l'eau souterraine. La contamination superposée à la stratigraphie et la position de la surface libre est aussi indiquée sur les coupes. Des symboles distincts représentent les niveaux des concentrations mesurées dans les puits et dans les sondages par enfoncement. La localisation des coupes est indiquée sur la Planche 21.

Verticalement, le panache commence près de la surface de la nappe et couvre pratiquement toute l'épaisseur de l'unité deltaïque. La forme du panache en profondeur est irrégulière. Il y a très peu de TCE observé dans l'unité proglaciaire où il se retrouve généralement à de faibles concentrations. Il n'y a pas eu de détection de TCE dans le roc. Le panache dans l'unité deltaïque semble suivre la topographie de l'unité proglacaire ou du silt glaciomarin sousjacents à l'unité deltaïque. Du côté sud du panache, il y a superposition apparente au-dessus du panache de l'écoulement provenant du Mont Rolland-Auger au sud où il n'y a pas de contamination en TCE (Planche 20). Ceci devrait faire en sorte que ce secteur ne contienne pas de contamination en TCE. En fait, cela se produit mais ce n'est pas apparent en plan mais plutôt sur les coupes de la Planche 21 montrant des coupes verticales de la contamination en TCE. Entre les coupes transversales D-D' en amont et F-F' en aval, il y a un apport latéral d'eau provenant du sud qui déplace le panache plus au nord, particulièrement dans sa partie supérieure du côté sud qui ne contient plus de TCE à cause de cet apport d'eau non contaminée. Bien que le panache apparaisse continu jusqu'à la rivière Jacques-Cartier en plan (Planche 20), les concentrations observées en profondeur ne sont pas juxtaposées avec la rivière Jacques-Cartier, sauf pour deux résurgences où il y a eu détection de TCE. Compte tenu du lien hydraulique démontré entre les unités aquifères et la rivière (Planche 17), il ne fait pas de doute cependant que le panache émergera éventuellement dans la rivière Jacques-Cartier, soit à sa berge ou plus loin sous son lit.

### 2.5.4 Bilan de masse

Les calculs de flux de masse de TCE permettent l'évaluation quantitative de la masse de TCE dissous dans l'eau souterraine à Shannon. Cet exercice permet de mettre en relation les guantités de TCE retrouvées à Shannon comparativement à celles calculées sur les territoires du MDN (Lefebvre et al., 2003). Le tableau 5 résume des calculs très simplifiés du bilan d'eau et de masse dans la zone d'étude à Shannon. Ces calculs sont faits pour deux localisations dans le panache de TCE dissous : 1) la limite entre la Garnison Valcartier et Shannon, ainsi que 2) la bordure de la rivière Jacques-Cartier. Le principe des calculs est très simple, il consiste à déterminer le flux d'eau et de masse aux deux endroits où se font les calculs. Il s'agit de l'application directe de la loi de Darcy (Équation 1). Les propriétés sont des valeurs représentatives des conditions aux deux localisations considérées pour les fins des calculs simples utilisés. Les paramètres requis sont le débit (Q) de l'eau souterraine, l'aire de la section d'écoulement (A), la conductivité hydraulique (K) moyenne, le gradient hydraulique (i), la porosité effective du sol  $(n_e)$ , l'orientation de la section par rapport à l'écoulement et les concentrations de TCE dissous (C) dans l'eau souterraine au niveau de la section. La valeur de la porosité effective ( $n_e$ ) utilisée est tirée du modèle numérique de Boutin (2004), d'une valeur de 0.33. Dans le cas du sable deltaïque, la porosité effective est considérée égale à la porosité totale.

Équation 1 : 
$$\frac{Q}{A} = q = -ki \left[ \frac{m^3/an}{m^2} \right]$$

avec

Q : Débit de l'eau souterraine  $(L^3/T)$ ;

A : Aire de la section d'écoulement (L<sup>2</sup>);

q : Flux de l'eau souterraine (L/T);

K : Conductivité hydraulique moyenne (L/T);

i : Gradient hydraulique (L/L).

Équation 2 : J = q CA où  $q = vn_e$ 

Оù

- J : Flux de masse de TCE (M/T);
- q : Flux de l'eau souterraine (L/T);
- C : Concentration de TCE dans l'eau souterraine (M/L<sup>3</sup>);
- A : Aire de la section d'écoulement (L<sup>2</sup>);

V : Vitesse de l'eau souterraine (L/T);

 $n_e$ : Porosité effective du sol (L<sup>3</sup>/L<sup>3</sup>).

Le bilan d'eau est simplement obtenu du calcul du débit à travers les sections considérées. Les vitesses d'écoulement estimées à ces deux sections sont de 127 m/an à la limite de la Garnison et de 382 m/an en bordure de la rivière. La différence de débit entre les deux sections peut s'expliquer par l'apport d'eau dû à la recharge de la nappe entre les deux sections d'écoulement. En tenant

compte de cet apport, le bilan d'eau est pratiquement le même aux deux sections. Nous ne tenons pas compte des apports d'eau latéraux possibles dans nos calculs. Au niveau du flux de masse de TCE (J) (Équation 2), l'estimation donne une valeur plus grande à la limite de la Garnison où les concentrations sont plus importantes (près de 25 kg/an) qu'en bordure de la rivière (près de 14 kg/an). Ces estimés sont du même ordre que celui calculé pour au milieu de la Garnison Valcartier, 20 kg/an, sur la base des données de caractérisation de 2001 (Lefebvre *et al.*, 2003).

# 3 Modélisation numérique

# 3.1 Méthodologie

Dans le secteur de Shannon, l'écoulement souterrain est rendu complexe en raison de la présence de deux types d'aquifères (libre et semi-captif) dans les dépôts meubles. Ceci engendre des gradients hydrauliques verticaux entre les deux aquifères. Ceux-ci sont aussi en lien hydraulique avec la rivière Jacques-Cartier dans la partie ouest du secteur. Dans ce contexte, l'utilisation de la modélisation numérique a pour but de permettre une meilleure compréhension quantitative de l'écoulement et du transport de TCE dans la zone d'étude.

Afin de représenter le système d'écoulement de manière efficace, le logiciel FEFLOW (Diersch, 2004a et 2004b) a été utilisé. Ce simulateur numérique répond aux exigences suivantes pour le développement du modèle numérique dans le secteur de Shannon :

- Le modèle doit efficacement reproduire l'écoulement dans un système où il y a une nappe libre. En modélisant en conditions saturées, avec un maillage adaptatif de la surface de la nappe libre, le système peut être bien représenté, avec un nombre limité de paramètres d'entrée et un temps de calcul raisonnable;
- La modélisation doit se faire en trois dimensions afin de bien représenter la complexité des unités hydrostratigraphiques et leur lien avec la rivière Jacques-Cartier;
- Le modèle doit utiliser des éléments finis afin de bien représenter la géométrie des contours des conditions aux limites du modèle et la distribution des unités stratigraphiques;
- La simulation doit se faire en régime permanent avec une recharge moyenne constante imposée à la surface supérieure du maillage de façon à pouvoir caler le modèle à des mesures de charges hydrauliques prises au milieu de l'année hydrologique;

Le calage doit pouvoir se faire par l'insertion de puits d'observation dans le modèle, ce qui permettra de comparer les niveaux d'eau simulés à ceux mesurés sur le terrain.

La démarche globale consiste premièrement à définir la zone d'étude à modéliser dans le secteur où le niveau de connaissance est élevé par rapport aux différentes composantes de l'écoulement et de la géologie. Les limites du modèle sont ensuite choisies afin qu'elles correspondent à des conditions hydrauliques simples. Un maillage numérique par éléments finis est construit à l'intérieur du domaine de modélisation et discrétisé plus finement aux endroits où les gradients hydrauliques sont plus élevés et où le panache de contamination de TCE a été retrouvé. Le maillage 2D dans le domaine est ensuite reporté en trois dimensions par la définition de couches correspondant au modèle géologique 3D (section 2.2.3). Les propriétés hydrauliques sont attribuées en fonction des différents matériaux sur la base des mesures effectuées sur le terrain. Enfin, la charge hydraulique initiale dans le système est définie à partir des cartes piézométriques des nappes libre et semi-captive interpolées dans le secteur (section 2.3.3).

À partir des conditions initiales, le calage du modèle a été effectué par essai et erreur en modifiant les conditions aux limites, les propriétés hydrauliques des dépôts meubles et la recharge. Le calage a été fait en comparant les charges simulées par le modèle aux niveaux d'eau mesurés dans le secteur. De plus, le calage a été fait dans un souci de reproduire non seulement la piézométrie interpolée mais aussi les directions d'écoulement qui contrôlent la forme du panache de TCE observé à Shannon.

A partir du modèle d'écoulement calé, le traçage de particules a été utilisé pour décrire les cheminements de l'écoulement dans le modèle aux endroits d'intérêt, comme en bordure de la rivière Jacques-Cartier. Cette technique permet aussi

d'obtenir le temps de migration advective de la contamination d'un endroit donné dans le panache jusqu'à la rivière Jacques-Cartier.

Le modèle numérique a également été utilisé pour réaliser des simulations simplifiées du transport de masse de TCE dissous dans le domaine. Cependant, comme les sources de contamination se situent à l'extérieur du modèle, il n'est pas possible de spécifier la localisation des zones sources potentielles dans le modèle lui-même. Pour palier à ce problème, les concentrations de TCE connues à la limite du MDN et de la municipalité de Shannon ont plutôt été spécifiées. Le transport est ensuite réalisé en deux temps, soit vers l'aval, de la limite du MDN jusqu'à la rivière Jacques-Cartier, et vers l'amont, de la limite du MDN vers l'est du secteur modélisé. La dispersion hydrodynamique utilisée dans le modèle est représentative de l'échelle du modèle. Par contre, le modèle ne représente pas le retard pouvant être causé par l'adsorption, ni la dégradation du TCE, ce qui pourrait réduire sa concentration. Ces conditions de simulation permettent d'obtenir des résultats quant aux temps de migration du TCE et les distances parcourues dans le modèle avant d'atteindre la rivière Jacques-Cartier. Par contre, les concentrations obtenues par les simulations n'ont qu'une valeur indicative vu l'absence de sources potentielles dans le système et le manque d'information sur la variation temporelle des concentrations émises aux sources. Le transport de masse doit implicitement supposer que les concentrations à la limite entre la Garnison et Shannon demeurent constantes dans le temps, ce qui n'est probablement pas le cas. Tous les fichiers d'entrées et de sorties du modèle numérique de Shannon sont compilées à l'annexe G.

# 3.2 Logiciel

Cette section est basée sur Nastev *et al.* (2005). Le modèle numérique a été développé en utilisant le logiciel FEFLOW – Finite element subsurface flow system (Diersch 2004a et 2004b). FEFLOW permet de reproduire l'écoulement de l'eau souterraine, le transport de masse et de chaleur de manière dépendante

de la densité du fluide. Ce simulateur en trois dimensions combine les techniques de solution en éléments finis et les fonctions des systèmes d'informations géographiques (SIG/GIS). FEFLOW est particulièrement approprié aux problèmes impliquant des modèles aux architectures complexes. La forme des éléments finis est linéaire à une dimension, et triangulaire ou quadratique en deux dimensions. Le maillage d'éléments finis peut être généré manuellement ou automatiquement avec plusieurs options de raffinement. Les conditions aux limites du modèle peuvent être simulées en tant que : charge imposée (1<sup>er</sup> type), flux imposé (2<sup>ème</sup> type), et combinaison de charge et flux imposés (3<sup>ème</sup> type). Toutes les conditions aux limites peuvent être spécifiées tant en régime permanent qu'en régime transitoire. Des contraintes minimales ou maximales, de charges et de flux, peuvent également être imposées sur les trois types de limites. FEFLOW utilise la méthode d'éléments finis basée sur Galerkin pour résoudre l'écoulement saturé. Les calculs sont basés sur l'équation générale en trois dimensions combinée aux principes physiques de conservation de la masse pour les fluides, conservation de la masse de contaminant et composées chimiques, et la conservation de l'énergie (chaleur). Voici les équations générales utilisées par le simulateur :

# Conservation de la masse pour les fluides :

Fluide entrant – Fluide sortant = Changement de fluide emmagasiné

<u>Équations générales de l'écoulement de l'eau souterraine basé sur la loi de</u> <u>Darcy</u> :

q=-K
$$\frac{dh}{dl}$$

Écoulement 3D, Hétérogène, Anisotrope :

 $\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + R = Ss \frac{\partial h}{\partial t}$ 

 $<sup>\</sup>succ$  Loi de Darcy :

les variables sont définies comme suit :

q : Flux de l'eau souterraine (L/T)

K : Composantes du tenseur des conductivités hydrauliques dans l'aquifère (L/T);

h : Charge hydraulique (L);

dh/dl : Gradient hydraulique (L/L);

R : Taux de recharge du système (L/T);

S<sub>S</sub>: Coefficient d'emmagasinement spécifique du milieu poreux (1/L).

Équations de transport :

Conservation de masse :

$$-div(flux_masse) = \frac{\partial(masse)}{\partial t}$$

Flux de masse = flux advectif + flux dispersif :

$$J=qc-\theta D\nabla c$$

$$\frac{\partial}{\partial_{x_i}} \left( D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) \frac{\partial (q_i c)}{\partial x_i} = \frac{\partial (\theta_c)}{\partial t}$$

les variables sont définies comme suit :

- J : Flux de masse (M/T);
- q : Flux de l'eau souterraine (L/T);
- c : Concentration (M/L<sup>3</sup>);
- $\theta_c$ : Masse emmagasinée (M);
- D : Coefficient de dispersion ( $L^2/T$ ).

## 3.3 Modèle conceptuel

Suite à l'élaboration des objectifs de la modélisation numérique, l'étape de la définition du modèle conceptuel est cruciale, car elle sert à définir de façon complète le problème à résoudre par la simulation numérique. Cette étape met en relation les différentes informations (hydrogéologiques, stratigraphiques et hydrogéochimiques) nécessaires à la représentation du système aquifère par la simulation numérique.

Pour le présent projet, les unités hydrostratigraphiques utilisées sont les mêmes que celles définies dans le mémoire de Boutin (2004). Ces unités regroupent les unités géologiques de propriétés hydrauliques similaires (Anderson et Woessner, 1992). Pour le modèle d'écoulement et de transport à Shannon, les unités hydrostratigraphiques représentées sont les suivantes : le sable deltaïque, le silt glaciomarin et le sable et gravier proglaciaire, tels que définis dans le modèle géologique 3D (section 2.2.3). L'unité de silt glaciomarin est mince et discontinue. Il faut donc établir une zonation de la couche du modèle contenant cette unité pour faire l'assignation des conductivités hydrauliques représentant cette couche.

Dans le système, la recharge a été estimée à partir du bilan hydrologique calculé dans la région par Martel *et al.* (2000). Aucun puits d'alimentation, privé ou public ne pompe dans la zone d'étude à l'est de la rivière à cause de la contamination en TCE. Ailleurs dans la zone modélisée, à l'ouest de la rivière Jacques-Cartier, quelques puits privés sont en pompage, mais leurs débits sont considérés négligeables dans le modèle. La rivière Jacques-Cartier agit comme un exutoire de l'eau souterraine s'écoulant dans le secteur, et ce, des deux côtés de ses rives.
#### 3.4 Domaine de modélisation

La zone d'étude couvre une aire de 2,2 km<sup>2</sup> et comprend une partie de la Garnison Valcartier, de la municipalité de Shannon et de la rivière Jacques-Cartier (Planche 23, Lefebvre *et al.*, 2006, Figures A et B). Le mont Rolland-Auger se retrouve au sud du domaine. Les limites du secteur sont choisies en fonction des conditions aux limites à imposer pour le modèle (section 3.5).

Suite au dimensionnement du domaine de modélisation, la prochaine étape est de faire la discrétisation du maillage en deux dimensions, ce qui consiste à optimiser la largeur des éléments triangulaires en plan. Le maillage choisi est assez fin, la largeur des éléments varie d'environ 15 m à 40 m. Le maillage est plus fin au centre du modèle, où se retrouve le panache de TCE, et en bordure de la rivière Jacques-Cartier, où le gradient hydraulique est plus élevé. Ceci permet, d'abord, de mieux représenter le transport de TCE en évitant d'induire trop de dispersion numérique et, ensuite, de bien représenter la variation des charges en bordure de la rivière Jacques-Cartier.

Le maillage en deux dimensions ainsi développé est ensuite projeté en trois dimensions en fonction des différentes couches définies en profondeur, qui correspondent à l'élévation des contacts des unités hydrostratigraphiques du modèle géologique 3D (deltaïque, silt glaciomarin et proglaciaire). Étant donné que les couches sont discontinues dans le système d'après le modèle géologique 3D (section 2.2.3) et qu'il n'est pas possible d'avoir des couches discontinues dans le cadre de la modélisation numérique, une épaisseur de 10 cm est attribuée à chacune des couches lorsqu'elles sont absentes du modèle géologique. Ceci survient principalement au sud du secteur où il y a une remontée du roc en direction du Mont Rolland-Auger. Afin de discrétiser les éléments verticalement, des sous-couches sont définies dans les unités les plus épaisses : le sable deltaïque et le sable et gravier proglaciaire. Ainsi le maillage contient quatre couches dans l'unité deltaïque, une couche pour l'unité de silt glaciomarin et trois couches dans l'unité proglaciaire, pour un total de huit

couches. L'élévation de la surface du modèle représente l'élévation de la surface libre dans le secteur (section 2.3.3) et la base du modèle représente l'élévation de la surface du roc (section 2.2.3). Le maillage contient 53 820 nœuds et 94 024 éléments triangulaires.

La prochaine étape consiste à assigner des propriétés hydrauliques pour chacune des huit couches. Dans le sable deltaïque, l'analyse géostatistique des conductivités hydrauliques à partir des valeurs obtenues des essais de perméabilité à chaque puits d'observation a démontré une zonation des propriétés hydrauliques (Annexe G). Tout comme dans les travaux de Boutin (2004), le matériel deltaïque est divisé en deux sous-unités, l'unité deltaïque supérieure et inférieure. Chacune des deux sous-unités du deltaïque contient deux couches dans le modèle. La Planche 23C et D présente la distribution des conductivités hydrauliques dans ces deux sous-unités, qui varient de 9x10<sup>-5</sup> à 2x10<sup>-4</sup> m/s. Cette distribution est basée sur une interprétation de l'analyse aéostatistique à laquelle une uniformisation des conductivités hydrauliques a été faite à partir de la valeur moyenne de la conductivité hydraulique dans l'unité deltaïque (tableau 3). La couche qui intègre l'unité de silt glaciomarin discontinue, a une conductivité hydraulique assignée en fonction de la présence du silt glaciomarin (section 2.2.3). Ainsi, lorsque le silt est présent, une conductivité hydraulique de 2x10<sup>-7</sup> m/s est appliquée, et lorsque le silt est absent, la conductivité hydraulique de l'unité de sable et gravier proglaciaire de 2.6x10<sup>-5</sup> m/s est assignée. Pour ce qui est des trois couches dans l'unité proglaciaire, une conductivité hydraulique uniforme de 2.6x10<sup>-5</sup> m/s est imposée. Cette valeur constitue la moyenne des valeurs de conductivités hydrauliques obtenue à partir des essais de perméabilité (tableau 3). Pour l'ensemble des couches, les conductivités hydrauliques horizontales Kx et Ky sont égales, alors que la conductivité hydraulique verticale Kz est d'un ordre de grandeur plus petite que K<sub>x</sub> et K<sub>y</sub>. Le tableau 7 présente les valeurs finales assignées à ces unités après calage (section 3.6).

Comme le modèle fonctionne en conditions saturées avec un maillage adaptatif de la surface libre, l'information reliée aux propriétés hydraulique est basée sur l'élévation initiale donnée aux couches. Ce qui permet de conserver les conductivités hydrauliques à la bonne élévation même si le maillage s'adapte et déplace les couches dans le modèle par rapport à ce qui a été posé au départ.

### 3.5 Description des conditions aux limites

Les conditions aux limites du modèle sont définies en bordure du domaine, à la surface du maillage et dans la rivière Jacques-Cartier. La Planche 23A présente le maillage en deux dimensions avec les différentes conditions aux limites. Trois types de conditions aux limites sont utilisés : type 1 (Dirichlet) qui sont des charges hydrauliques imposées; type 2 (Newman) pour la recharge et les limites à flux nuls; et type 3 (Cauchy) qui impose des conditions mixtes correspondant à des drains. Le tableau 6 résume les conditions imposées dans le modèle.

Une recharge constante et uniforme de 275 mm/an est appliquée à la surface du maillage en tant que condition de flux imposé (type 2). Cette valeur, obtenue par calage du modèle, s'approche de l'estimation de 250 mm/an, obtenue à partir du bilan hydrologique de la région calculé par Martel *et al.* (2000).

Des charges sont imposées (type 1) aux limites est et ouest du modèle, et au nord et au sud de la rivière Jacques-Cartier. À la limite ouest, une charge de 155 m est imposée aux couches dans les unités deltaïque et proglaciaire. À la limite est, une charge de 163 m est imposée aux couches dans les unités deltaïque et proglaciaire. Dans les deux cas, la même charge est imposée aux deux unités deltaïque et proglaciaire parce que l'unité de silt glaciomarin est généralement absente à ces limites et ne cause donc pas de différences de charge importantes entre ces unités. Les valeurs de 155 m et 163 m sont tirées de la carte piézométrique de la surface libre interpolée (section 2.3.3). Des conditions de premier type sont aussi utilisées au limites nord (152 m) et sud

(150 m) de la rivière Jacques-Cartier, seulement sur la première couche du modèle, où l'influence de la rivière se fait sentir sur l'aquifère.

La limite nord du domaine est une limite imperméable ou à flux nuls (type 2), qui représente une ligne d'écoulement d'après la carte piézométrique (section 2.3.3). La limite sud du domaine, constitue également pour sa partie ouest, une limite imperméable. Par contre, pour la partie centre et est de la limite sud, le choix initial était d'utiliser une limite à charge imposée. Cependant, l'effet topographique important du roc dans ce secteur contribue suffisamment à reproduire la charge observée en utilisant une limite imperméable. La base du modèle, qui est la surface du socle rocheux, constitue une limite imperméable dans le modèle, compte tenu du fort contraste de conductivité hydraulique supposé entre le proglaciaire et le roc.

Au niveau de la rivière Jacques-Cartier, des conditions de drains (type 3) sont appliquées, c'est à dire que la charge hydraulique dans la rivière (h<sub>riv</sub>) et un coefficient de transfert spécifié sortant ( $\phi$ ) sont imposés de manière combinée à la surface seulement du modèle. Les charges hydrauliques imposées dans la rivière correspondent à une variation linéaire des niveaux d'eau dans la rivière. soit la station hydrométrique 050801 au niveau du Pont Gosford (151 m) et au niveau de la Piste Multi-fonctionnelle (150.6 m), déterminées à partir de mesures sur le terrain au même moment que la prise des mesures de niveaux d'eau dans les puits à Shannon en décembre 2004. Le coefficient de transfert correspond à une valeur de conductance des matériaux dans le lit de la rivière (K<sup>col</sup>) divisée par l'épaisseur du lit (d). L'équation 1, basée sur la loi de Darcy, est utilisée pour définir la condition de troisième type. La valeur de charge (h) correspond à la charge hydraulique de l'eau souterraine en bordure de la rivière et simulée dans le modèle numérique, ce qui permet d'établir un flux sortant du système à la rivière. Cette équation exprime donc le fait que lorsque la charge de l'eau souterraine (h) est plus grande que la charge dans la rivière (hriv), un flux est engendré et le système expulse de l'eau, comme un drain.

avec

q : Flux de l'eau souterraine à travers la limite de 3<sup>e</sup> type (L/T);

φ : Coefficient de transfert (1/T);

hriv: Charge de l'eau dans la rivière (L);

h : Charge de l'eau souterraine en bordure de la rivière (L);

K<sup>col</sup>: Conductivité hydraulique des matériaux dans le lit de la rivière (L/T)

d : Épaisseur du lit de la rivière (L).

Afin de spécifier le coefficient de transfert ( $\phi$ =K<sup>col</sup>/d) dans la rivière, les conductivités hydrauliques des unités aquifères du secteur ont d'abord été utilisées comme K<sup>col</sup> : deltaïque (1x10<sup>-4</sup> m/s) et proglaciaire (1x10<sup>-5</sup> m/s). Une valeur hypothétique d'épaisseur du lit de la rivière (d) de 1 m a été supposée, étant donné le manque d'information à ce sujet, ce qui ramène la valeur du coefficient de transfert ( $\phi$ ) à celle de la conductance (K<sup>col</sup>). La valeur de la conductivité hydraulique du deltaïque était trop élevée et engendrait des flux d'eau trop importants vers la rivière, alors que la conductivité hydraulique du proglaciaire permet d'obtenir une erreur beaucoup plus faible et un bilan d'eau (entrant-sortant) plus plausible (m<sup>3</sup>/jour). L'ordre de grandeur des valeurs de conductivité hydraulique du lit de la rivière décrit à la section 2.4.5 (tableau 4), et qui varient de 1x10<sup>-7</sup> m/s 1x10<sup>-6</sup> m/s, ont également été utilisées, mais les résultats obtenus avec ces valeurs ne sont pas représentatifs au niveau du patron d'écoulement observé. La valeur de conductivité hydraulique du proglaciaire (1x10<sup>-5</sup> m/s) a donc été utilisée (Tableau 6).

#### 3.6 Calage et étude de sensibilité

Pour que le modèle représente correctement le système aquifère de la zone d'étude, l'étape du calage du modèle est essentielle. Pour ce faire, la modification de plusieurs paramètres doit être faite dans le but de minimiser l'écart entre les charges hydrauliques simulées et les charges hydrauliques Afin de comparer ces charges, 121 points d'observation, qui mesurées. correspondent aux différents puits d'observation présents dans la zone d'étude, ont été insérés dans le modèle. Il est donc possible de suivre l'évolution de l'écart entre les charges hydrauliques simulées et les charges hydrauliques mesurées avec la modification des paramètres du modèle. Les paramètres qui ont permis de réaliser le calage du modèle, par un processus d'essai et erreur, sont les suivants : les conductivités hydrauliques de chacune des couches (K<sub>x</sub>, K<sub>v</sub>, K<sub>z</sub>), la recharge et les conditions aux limites. L'objectif premier du calage est d'atteindre une cible de calage. Dans le cas présent, la cible est d'atteindre une erreur RMS (root mean square) inférieure à 10% de l'écart maximum de la charge hydraulique pour tout le modèle. Puisque les charges hydrauliques dans le domaine varient de 163 m à 150 m, soit un écart maximum de 13 m, la cible de calibration RMS est évaluée à 1.3 m. De plus, le calage doit aussi, dans un deuxième temps, être en mesure de reproduire le patron général d'écoulement dans le domaine qui contrôle la distribution du panache de TCE. Pour ce faire, il est impératif de comparer le patron d'écoulement simulé à la piézométrie interpolée dans la zone d'étude (section 2.3.3). La présence d'un panache de contamination en TCE dans le secteur constitue ainsi une information très utile sur la direction de l'écoulement dans le secteur. Il est essentiel que le modèle calé permette de reproduire la forme générale du panache de contamination en deux dimensions. Finalement, un modèle calé en régime permanent doit avoir un bilan d'eau équilibré entre les apports et les pertes. Une valeur de 1% de différence entre les gains et les pertes est considérée acceptable (Anderson et Woessner, 1992). C'est donc à partir de tous ces éléments que l'étape du calage a été réalisée.

Les tableaux 6 et 7 résument les paramètres utilisés pour le calage du modèle. La Planche 24A (Lefebvre *et al.*, 2006) montre le graphique de la comparaison entre les charges mesurées et simulées. Ce graphique démontre que le modèle représente généralement bien les mesures prises sur le terrain, mais il sous estime certaines valeurs au sud. Les erreurs du modèle calé sont de 0.004 m pour l'erreur moyenne (ME), de 0.85 m pour l'erreur moyenne absolue (MAE) et de 1.145 m pour la racine de la somme des carrés de l'erreur (RMS). Ce qui est en dessous de l'erreur RMS ciblée de 1.3 m, donc ce qui indique un bon calage général.

Avant le calage, la recharge avait été initialement estimée à 250 mm/an, ce qui provient de l'estimation à partir du bilan hydrologique de la région par Martel *et al.* (2000). Lors du calage, les valeurs de 200, 250 et 300 mm/an ont été d'abord utilisées, mais le modèle ne convergeait pas pour 200 et 300. La valeur de 275 mm/an a donc été obtenue par tâtonnement et elle réduit l'erreur dans le modèle.

Les valeurs de conductivité hydraulique préalablement posées dans le modèle sont les valeurs moyennes obtenues par essais de perméabilité (section 2.3.2) et ont été appliquées de façon uniforme dans toutes les couches. Ensuite, à l'aide d'une analyse géostatistique, une zonation des conductivités hydrauliques a été faite pour chaque couche, ce qui a réduit l'erreur dans le système simulé. Généralement, l'augmentation des conductivités hydrauliques dans le modèle amène une diminution des charges hydrauliques et inversement, la diminution des conductivités hydrauliques provoque une augmentation des charges hydrauliques simulées. Plusieurs essais ont donc été réalisés à partir du scénario de zonation initiale en augmentant et diminuant les conductivités hydrauliques, mais la zonation initiale est demeurée le meilleur scénario.

D'après le graphique des charges hydrauliques simulées par rapport aux charges hydrauliques mesurées (Planche 24A), il est possible de constater que le modèle

sous-estime les charges hydrauliques, surtout dans la partie sud du secteur, comme on le voit sur la carte de la répartition de l'erreur (mesurée-simulée) du modèle calé (Planche 24D). La zone d'erreur plus élevée observée dans la portion sud du domaine étudié est due à la difficulté de reproduire l'effet du Mont Rolland-Auger. Un compromis a dû être fait au niveau de la reproduction des charges hydrauliques mesurées afin d'obtenir un patron d'écoulement plus proche de la réalité.

Le tableau 8 présente les apports et pertes du modèle calé à Shannon. La différence est de 1.6% entre les apports et les pertes, ce qui est plus élevé que la recommandation maximale de 1% d'Anderson et Woessner (1992). Une augmentation de l'apport d'eau provenant du sud du secteur, en augmentant les charges à la limite sud, permettait de réduire cette différence de 1.6%, mais le patron d'écoulement n'était plus proche de la réalité. C'est pourquoi, cette grande différence entre les pertes et les gains du modèle a été conservée.

Suite à l'étape du calage, celle de l'étude de sensibilité permet d'identifier les paramètres du calage qui ont le plus d'influence sur le modèle. Elle permet aussi de voir si la solution du modèle calé est celle pour laquelle l'erreur est minimale. L'étude de sensibilité est faite en changeant les paramètres de calage un à un et en comparant les différentes solutions entre elles. La Planche 24B et C présente les résultats de cette étude.

Premièrement, la variation de la recharge a été étudiée. La valeur calée de la recharge est de 275 mm/an. Les autres valeurs de recharge utilisées (250 et 285 mm/an) sont limitées étant donné que cette valeur a beaucoup d'influence sur le modèle. En dessous de 250 mm/an et au-dessus de 285 mm/an, le modèle ne converge plus. La valeur calée de 275 mm/an a été conservée, car elle apportait de plus faibles erreurs RMS et ME que 250 mm/an et la valeur de 285 mm/an n'apportait pas une différence d'erreur considérable. Ensuite, les valeurs de conductivités hydrauliques ont été modifiées, simultanément pour

toutes les couches, de plus 30% et de moins 10%. L'évolution des erreurs est présentée à la Planche 24B et démontre bien, en jumelant les deux types de graphiques (Recharge et K), que la valeur de 275 mm/an et des conductivités hydrauliques calées minimisent bien l'erreur.

Ensuite, la sensibilité au changement des conditions aux limites a été étudiée. Pour ce faire, les limites ouest et est du modèle ont été diminuées et augmentées (+0.5, +1, -0.5, -1). La Planche 24C présente l'évolution de l'erreur RMS pour ces deux limites. On constate alors que la limite est est beaucoup plus sensible aux changements que la limite ouest, où l'erreur ne fluctue presque pas. De plus, il a été impossible de diminuer la limite Est puisque le modèle ne convergait plus. Mis à part l'effet marqué sur l'erreur RMS, le changement de la limite est a provoqué un effet extrême sur le patron d'écoulement de l'eau souterraine et sur le bilan d'eau du modèle, qui s'éloignait alors beaucoup de l'équilibre. Les charges imposées dans la rivière n'ont pas été l'objet d'une étude de sensibilité car le niveau provient des mesures de terrain. Cependant, l'effet du taux de transfert appliqué à la condition de troisième type (drains) dans la rivière a été étudié en effectuant des changements de plus ou moins 0 à 20% de la valeur calée. Le graphique obtenu (Planche 24C) permet de constater que la fluctuation de cette valeur n'a pratiquement pas d'influence sur l'erreur RMS dans le modèle.

Les problèmes de convergences du modèle peuvent être dus à plusieurs facteurs. Premièrement, il y existe un grand nombre de conditions aux limites qui contraignent le modèle, qui pourraient le rendre plus sensible aux changements. De plus, la configuration du système aquifère, avec la disparition de plusieurs couches au sud par la présence du Mont Rolland-Auger, peut créer des problèmes de convergences en réduisant plusieurs couches à l'épaisseur de 10 cm. Cette faible épaisseur a limité la subdivision des unités en plusieurs couches afin que l'épaisseur des couches ne soit pas trop petite par rapport à la largeur des éléments horizontaux. Étant donné que le système n'est subdivisé

qu'en 8 couches, il existe un contraste important de conductivité hydraulique d'une couche à l'autre, ce qui augmente les difficultés numériques que peut rencontrer le modèle. L'idéal aurait été d'insérer des couches de transition pour les différentes zones de conductivités hydrauliques du modèle. En outre, la présence de gradients verticaux importants dans le système augmente les défis numériques de ce système aquifère. D'autres approches de configuration du maillage auraient donc pu être tentées pour diminuer la sensibilité numérique du modèle, mais les résultats de calage étaient satisfaisants avec la configuration actuelle du modèle.

## 3.7 Résultats de la simulation de l'écoulement

#### 3.7.1 Patron d'écoulement

Le modèle calé représente généralement bien le patron d'écoulement obtenu par les mesures de terrain dans l'ensemble de la zone d'étude. La Planche 25A (Lefebvre et al., 2006) présente la comparaison entre les deux méthodes dans la nappe libre. Le secteur sud constitue la zone où le modèle est moins précis, puisque le patron d'écoulement interpolé est trop complexe pour être reproduit par le modèle. C'est pourquoi un compromis est fait dans cette zone pour reproduire plus fidèlement la panache de TCE défini par les données de terrain. La Planche 25 (Figures B et C) montre également des vues en trois dimensions de la piézométrie et des charges hydrauliques simulées par le modèle. Ces visions 3D démontrent bien l'effet important de la rivière Jacques-Cartier et les gradients hydrauliques présents entre les unités deltaïque et proglaciaire dans le secteur. À la Planche 26 (Figures A et B) (Lefebvre et al., 2006), la piézométrie et les vecteurs d'écoulement simulés dans les unités deltaïque (couche 2, A) et proglaciaire (couche 7, B) démontrent bien que la vitesse de l'eau souterraine est plus grande dans l'unité deltaïque en relation avec la rivière. Les directions des vecteurs d'écoulement (Planche 26) indiquent aussi que l'eau souterraine, dans les deux unités, se dirige vers la rivière Jacques-Cartier.

68

#### 3.7.2 Gradients hydrauliques verticaux

La Planche 26C présente la carte des gradients hydrauliques simulés entre les unités deltaïque et proglaciaire (couche 2 et 7). Les gradients de valeurs négatives indiquent que l'écoulement se produit vers le haut, soit vers l'unité deltaïque, alors que les valeurs de gradients positives montrent que l'écoulement se fait vers le bas, donc vers l'unité proglaciaire. Grâce à cette carte, on constate que les zones où l'écoulement se fait vers le haut sont situées sous la rivière Jacques-Cartier et dans la partie centrale de la zone d'étude. Par contre, les zones où l'écoulement se fait nettement vers le bas sont situées ponctuellement à différents endroits sur la carte, entre autres au sud, au nord et à l'est du secteur. Les zones de gradients plus élevés concordent généralement bien avec la présence de l'unité de silt glaciomarin (en violet sur la carte), qui contrôle les échanges entre les deux unités aquifères du secteur. Il est difficile de comparer la carte des gradients verticaux simulés (Planche 26C) avec la carte des gradients faite à partir des mesures de terrain (Planche 16C), car l'interpolation n'a pas pu être faite sur le même secteur et un doute persiste toujours sur certaines très fortes valeurs mesurées de gradients qui contrôlent beaucoup l'interpolation. Par contre, on remarque la même zone de gradients vers le bas au sud du secteur, ce qui est normal à cause de l'effet de la topographie du roc relié à la présence du Mont Rolland-Auger.

## 3.8 Simulation du traçage de particules et du transport de masse

#### 3.8.1 Approche utilisée

Le traçage inverse de particules, à partir des milieux récepteurs, permet de comprendre le cheminement de l'eau souterraine convergeant vers la rivière Jacques-Cartier. Il permet de vérifier si les particules reproduisent bien le tracé du panache de contamination en TCE dans le secteur et de comprendre le lien des aquifères avec la rivière. De plus, il permet de calculer le temps de migration des particules et d'évaluer la vitesse de l'eau souterraine dans le modèle. Le

traçage de particules représente le transport advectif dans l'unité deltaïque, avec une valeur de porosité effective de 33%.

L'étape du transport de masse a été réalisée afin de pouvoir mieux visualiser la migration du TCE dans le modèle par le processus d'advection en considérant aussi la dispersion hydrodynamique, mais sans tenir compte du retard, ni de la dégradation. Cette étape permet également de vérifier si les données de concentrations en TCE observées sur le terrain à la limite de propriétés entre Shannon et la Garnison Valcartier sont en mesure de reproduire le panache défini par les données de terrain (section 2.5.2). Étant donné que les zones sources potentielles ne sont pas localisées dans le domaine de modélisation. des nœuds d'origine du TCE ont été posés à la limite de propriétés entre Shannon et la Garnison Valcartier. La localisation de ces noeuds est montrée à la Planche 29A (Lefebvre et al., 2006). Les valeurs de concentration associées à chaque nœud ont été déterminées en fonction de moyennes des zones du panache de TCE (Planches 20 et 21). Les valeurs imposées sont de 5 µg/L dans la zone verte, de 20 µg/L dans la zone jaune, de 200 µg/L dans la zone orange et de 1000 µg/L dans la zone rouge. Ces concentrations ont été appliquées sur les trois premières couches de l'unité deltaïque. Ainsi, à partir de cette limite, deux simulations sont faites; une vers la rivière Jacques-Cartier et une autre vers la Garnison Valcartier (à contre-courant). Dans les deux cas, une valeur de dispersivité horizontale de 5 m a été attribuée et une valeur de dispersivité transversale de 0.05 m a été assignée (Zheng et Bennett, 2002; Gelhar et al., 1992). De plus, le flux de masse est nul à la surface du modèle. La durée de la simulation vers la rivière Jacques-Cartier est de 10 ans et celle vers la Garnison, est de 25 ans.

#### 3.8.2 Résultats transport versus panache et traçage de particules

Les résultats obtenus pour le traçage de particules et le transport de masse sont présentés sur les Planches 27, 28, 29 et 30. Les figures montrant le résultat du traçage de particules en plan et en trois dimensions sont présentées aux Planches 27 et 28. On constate que le cheminement permet de reproduire généralement bien la forme du panache. De plus, l'analyse des temps de migration vers la rivière Jacques-Cartier (calculés à partir de la rivière vers l'amont) sont représentés par des cercles de couleur variant de 0 (violet) à 10 ans (en bleu). Les vitesses sont plus élevées en bordure de la rivière Jacques-Cartier (240 m/an) que sur le territoire de la Garnison Valcartier (85 m/an). Si on regarde la figure en trois dimensions, il est possible de voir l'effet marqué de la rivière sur l'écoulement, par la remontée des particules vers la rivière.

L'étape du transport de masse a été réalisée dans le but de vérifier si le modèle était en mesure de reproduire le panache de TCE produit par les données de terrain. En regardant la Planche 29 (Figures A et B), on constate que les cartes montrant la distribution de la contamination, après 25 ans, à partir des nœuds d'origine du TCE, vers l'ouest et vers l'est, respectent bien la forme des panaches définis. Par contre, pour les plus faibles concentrations en TCE (contours en verts), l'effet de la dispersion agit plus et génère une zone plus étendue que dans le cas des contours de concentrations plus élevés (jaune, orange et rouge). Les sections sur la Planche 29 (Figures C et D), dont l'emplacement est montré sur les figures A et B, montrent une contamination en TCE qui est presque exclusivement présente dans l'unité deltaïque (couches 1 à 4), donc très peu dans l'unité proglaciaire (couches 6 à 8), comme le montrent les coupes de contamination présentées à la section 2.5.3 (Planche 21). Les nœuds d'origine du TCE étant placés uniquement dans l'unité deltaïque, ceci démontre l'effet du silt glaciomarin qui semble contrôler effectivement la migration du TCE par sa distribution entre le deltaïque et le proglaciaire à cause de sa faible conductivité hydraulique.

La Planche 30 (Lefebvre *et al.*, 2006) présente l'évolution dans le temps des patrons de migration du TCE obtenus par la simulation du transport de masse dans l'unité deltaïque. Ces cartes permettent de comparer les temps de migration du transport avec ceux obtenus du traçage de particules (Planches 27

et 28, Lefebvre et al., 2006), également réalisé dans l'unité deltaïque. Dans le cas du transport de masse, le panache simulé atteint la rivière Jacques-Cartier en moins de 5 ans (30A), ce que l'on observe également dans le cas du traçage De plus, on observe sur la figure du traçage de particules de particules. (Planche 27) que l'écoulement semble plus rapide au nord du panache qu'au sud, ce qui est également observé sur la figure du transport après 2 ans (30A). L'évolution du panache de TCE en fonction du temps démontre aussi qu'une petite partie du panache simulé traverse la rivière Jacques-Cartier, juste au nord de la piste multi-fonctionnelle, mais qu'il finit par être capté par celle-ci, même après une période de 25 ans (30D), ce qui a aussi été constaté par l'étape du traçage de particules. On remarque également qu'il n'y a pas beaucoup de changements entre le patron d'écoulement simulé à 10 ans et à 25 ans. Dans les deux cas, on constate que la zone rouge (>600  $\mu$ g/L, pour la zone de 590 µg/L, modifié à des fins de simplification de la représentation graphique), n'atteint pas la rivière. Ceci indigue que le régime permanent est atteint à partir de 10 ans. De plus, l'effet de la dispersion et de la convergence de l'écoulement vers le centre de la zone d'étude, qui permet l'échange de l'eau propre et de celle contaminée, empêche la progression de la zone plus concentrée en TCE (>600  $\mu$ g/L). Ces processus auraient un effet de dilution du panache avant l'arrivée de l'eau souterraine contaminée à la rivière. Ceci pourrait expliquer pourquoi de grandes concentrations de TCE ne sont pas observées en bordure de la rivière ou dans les résurgences de la rivière.

Le calcul du bilan de masse pour le transport de masse est donné par le logiciel FEFLOW aux différentes limites du modèle en indiquant le déséquilibre entre le flux de masse entrant et celui sortant. Pour chacune des simulations effectuées et montrées sur la Planche 30, le bilan de masse est présenté au tableau 9. Il est possible de remarquer que de 2 ans à 10 ans, la masse qui entre est plus grande que celle qui sort et le déséquilibre diminue avec le temps. À 25 ans, quand le régime permanent est atteint, la masse qui entre est pratiquement égale à celle qui sort avec une erreur de 4% (6 / 160 g/jour), puisque qu'il en sort

plus qu'il n'en rentre. La masse qui entre et qui sort à 25 ans est donc égale à environ 160 g/jour (58.4 kg/an). Si on compare cette valeur (58.4 kg/an) à celle du bilan de masse calculé à la limite de la Garnison (section 2.5.4) et présenté au tableau 5, on constate que le flux de masse entrant simulé est beaucoup plus grand que celui calculé de 24.6 kg/an. Cette différence s'explique par le fait que les concentrations imposées aux nœuds d'origine du TCE dans le modèle sont plus élevées et étendues que les concentrations réelles mesurées dans l'aquifère. La valeur de 58.4 kg/an, obtenue à partir du modèle numérique, serait un seuil supérieur de flux de TCE possible à travers la limite entre la Garnison et Shannon, alors que la valeur calculée de 24.6 kg/an (section 2.5.4) représenterait le seuil inférieur de flux de TCE.

## 4 Discussion sur la relation avec la rivière Jacques-Cartier

À partir de la Planche 13 montrant la distribution des unités hydrostratigraphiques dans la zone d'étude, on constate que la vallée de la rivière Jacques-Cartier découpe les deux unités aquifères, le deltaïque au centre et le proglaciaire au nord et au sud de la zone d'étude. Il y a donc un lien direct entre la rivière Jacques-Cartier et la nappe libre dans l'unité deltaïque au centre de la zone d'étude et un lien direct avec l'unité proglaciaire au nord et au sud.

À partir des cartes d'élévation de la surface libre (Planche 14) et de la piézométrie dans l'unité proglaciaire (Planche 15), on remarque que l'écoulement converge vers la rivière Jacques-Cartier dans les deux cas. Les coupes piézométriques (Planche 17B) indiquent que ces deux unités sont affectées par la présence de la rivière, tel que mis en évidence par les forts gradients hydrauliques en bordure de la rivière.

De plus, les travaux de terrain ont permis de constater qu'il y a des résurgences de la nappe libre dans l'unité deltaïque en bordure de la rivière et les infiltromètres ont indiqué un écoulement de l'aquifère vers le lit de la rivière (Planche 19C). En outre, les concentrations en TCE sont observées jusqu'à la rivière Jacques-Cartier, dans une résurgence et dans un infiltromètre, et à proximité des puits et des sondages réalisés à proximité de la rivière. Le suivi de l'eau souterraine dans le puits PO-SH-1B, situé au bordure du pont de la piste Multi-fonctionnelle, jumelé au suivi dans la rivière Jacques-Cartier, dans la période de mai 2005 à octobre 2005, démontre aussi un écoulement vers la rivière, puisque l'unité semi-confinante de silt glaciomarin est absente. Ce suivi montre aussi qu'il y a un lien hydraulique direct entre la rivière et l'aquifère deltaïque à cause de la similitude entre leurs variations de niveaux d'eau. L'analyse de l'hydrogramme de rivière à partir de la station 050801 dans la rivière Jacques-cartier, met également en lumière qu'une proportion de 32% des précipitations constituerait l'apport de l'eau souterraine vers la rivière Jacques-

Cartier dans la période ciblée. Par contre, il faut reconnaître que cette valeur est extrêmement imprécise compte de tenu de l'approche empirique que constitue la séparation d'hydrogramme, et aussi parce qu'elle a été pratiquée sur une année seulement. Afin de savoir plus précisément l'apport d'eau souterraine rechargeant la rivière Jacques-Cartier dans la portion de la zone à l'étude, il serait recommandé d'installer une autre station hydrométrique dans la rivière en aval du secteur, soit près de la municipalité de Ste-Catherine-de-la-Jacques-Cartier. Il serait donc possible de soustraire l'apport de l'eau souterraine de la nouvelle station à celui de la station existante (050801) au Pont Gosford à Shannon, et de comparer cette différence au bilan d'eau sortant de l'aquifère. Ceci permettrait d'avoir le flux d'eau souterraine à la rivière dans le tronçon entre les deux stations.

Le panache de TCE dissous apparaît continu jusqu'à la rivière Jacques-Cartier en plan (Planche 20) avec un niveau de concentration entre 50 et 590  $\mu$ g/L. Cependant, les concentrations dans les résurgences échantillonnées en bordure de la rivière n'avaient que 3 et 42  $\mu$ g/L de TCE. De plus, les concentrations observées en profondeur ne sont pas juxtaposées avec la rivière Jacques-Cartier, sauf pour les deux résurgences où il y a eu détection de TCE (Planche 21B). Compte tenu du lien hydraulique démontré entre les unités aquifères et la rivière (Planche 17B), il ne fait pas de doute cependant que le panache présentement délimité à Shannon émergera éventuellement dans la rivière Jacques-Cartier, soit à sa berge ou plus loin sous son lit. La possibilité que le panache de TCE puisse poursuivre sa migration du côté ouest ou sous la rivière reste encore indéterminée sur la base des informations disponibles présentement. Il n'y a pas eu de TCE détecté du côté ouest mais le contrôle n'est pas assez serré de ce côté de la rivière.

Les travaux de modélisation ont permis de démontrer que la rivière Jacques-Cartier a beaucoup d'influence sur l'écoulement de l'eau souterraine dans la zone d'étude. D'après l'étape du traçage de particules, il est possible de constater que l'effet de la rivière agit dans les deux unités aquifères avec une remontée des particules vers celle-ci. Selon des travaux complémentaires de traçage de particules non présentés dans le mémoire, les particules lancées en profondeur, dans la 8<sup>e</sup> couche, dans l'unité proglaciaire, montrent que l'eau remonte vers la rivière Jacques-Cartier en traversant un peu du côté ouest de la rivière, au nord de la piste Multi-fonctionnelle, mais revient tout de suite dans la rivière lorsqu'elle atteint l'unité deltaïque. De plus, selon les résultats du transport de masse (Planche 30), on observe que l'eau souterraine traverse également la rivière, au nord de la piste Multi-fonctionnelle, mais qu'elle ne va pas plus loin à l'ouest, même après une période de 25 ans. Ce comportement pourrait expliquer la présence de perchlorate dans le puits PO-SH-30 du côté ouest de la rivière. Un suivi de la géochimie de l'eau souterraine devrait quand même être réalisé pour mieux comprendre ce phénomène et bien déterminer le potentiel de migration du TCE du côté ouest de la rivière.

## **5** Conclusions et recommandations

Ces travaux de maîtrise ont permis l'analyse des données de la caractérisation réalisée par le MDN à l'automne 2004 dans la municipalité de Shannon en relation avec la contamination de l'eau souterraine par du trichloroéthène (TCE). Les travaux de caractérisation ont été réalisés par le consortium Sanexen-Amec sous la supervision de Construction de Défense Canada. Ces travaux ont impliqué la réalisation de 53 forages, l'installation de 99 puits d'observation échantillonnés pour l'eau souterraine (dans lesquels on a procédé à la mesure des niveaux d'eau et à la réalisation d'essais de perméabilité), la réalisation de 25 sondages par enfoncement (*direct push*) qui ont prélevé 136 échantillons d'eau souterraine et le prélèvement d'eau souterraine à 5 résurgences en bordure de la rivière Jacques-Cartier.

L'objectif des travaux de maîtrise était d'analyser les données de caractérisation pour mieux comprendre l'écoulement et le transport de TCE, particulièrement par rapport à la rivière Jacques-Cartier. Un effort important a été dédié à la compréhension du contexte hydrogéologique. Ceci a mené à la production de coupes géologiques, de cartes d'élévation et d'épaisseur des unités géologiques et la production d'un modèle géologique 3D de la zone d'étude. Ensuite, les propriétés hydrauliques ont été compilées et l'écoulement de l'eau souterraine a été déterminé par la production de cartes et de coupes piézométriques. De plus, une carte et des coupes ont permis la définition du panache de contamination en TCE dans la zone d'étude. Finalement, des travaux de modélisation numérique ont été réalisés.

Dans la zone d'étude, la topographie de la surface du roc est accentuée et la géométrie des unités aquifères, deltaïque et proglaciaire, est variable. L'unité de silt glaciomarin peu perméable et apparemment discontinue est intercalée entre les unités aquifères et contrôle les échanges entre ces unités. La vallée de la rivière Jacques-Cartier découpe les deux unités aquifères, le deltaïque au centre

et le proglaciaire au nord et au sud de la zone d'étude. L'écoulement de l'eau souterraine se fait généralement de l'est vers l'ouest, i.e. de la Garnison Valcartier vers la rivière Jacques-Cartier. Cependant, dans la partie sud de la zone d'étude il y a une composante importante de l'écoulement qui se fait vers le nord en provenance du Mont Rolland-Auger.

La contamination en TCE dissous est présente dans la partie centrale de la zone d'étude dans une bande s'étendant de l'ouest vers l'est entre la Garnison Valcartier et la rivière Jacques-Cartier. Le TCE est présent presque exclusivement dans l'unité deltaïque sur toute son épaisseur. Le TCE est pratiquement absent de l'unité proglaciaire et n'est pas détecté dans le roc. Les concentrations plus importantes de TCE sont au centre de la zone d'étude entre la limite de la Garnison et la partie est de Shannon. Les concentrations en TCE sont observées jusqu'à la rivière Jacques-Cartier dans deux résurgences et à proximité dans les puits et sondages réalisés à proximité de la rivière. Il n'y a pas de TCE détecté du côté ouest de la rivière.

Les unités aquifères deltaïques et proglaciaires sont continues jusqu'à la rivière Jacques-Cartier. Il y a un lien direct entre la rivière Jacques-Cartier et la nappe libre dans l'unité deltaïque au centre de la zone d'étude et un lien direct avec l'unité proglaciaire surtout au sud. Ces deux unités apparaissent aussi affectées hydrauliquement par la présence de la rivière. Il y a aussi des résurgences de la nappe libre dans l'unité deltaïque en bordure de la rivière et les infiltromètres ont indiqué un écoulement de l'aquifère vers le lit de la rivière. Le panache de TCE dissous apparaît continu jusqu'à la rivière Jacques-Cartier en plan avec un niveau de concentration entre 50 et 590  $\mu$ g/L. Cependant, les concentrations dans les résurgences échantillonnées en bordure de la rivière n'avaient que 3 et 42  $\mu$ g/L de TCE. De plus, les concentrations observées en profondeur ne sont pas juxtaposées avec la rivière Jacques-Cartier, sauf pour les deux résurgences où il y a eu détection de TCE. Il ne fait pas de doute cependant que le panache

78

présentement délimité à Shannon émergera éventuellement dans la rivière Jacques-Cartier, soit à sa berge ou plus loin sous son lit.

La modélisation du secteur a réussi à reproduire le patron d'écoulement avec une erreur RMS acceptable. L'étape du traçage de particules permet de constater que la vitesse de l'eau souterraine est plus élevée en bordure de la rivière et au nord du panache central de TCE. De plus, le transport de masse permet de reproduire la forme générale du panache de TCE dans le secteur, tant en plan qu'en profondeur. En coupe, les résultats permettent de confirmer que l'unité de silt glaciomarin, par sa distribution et ses propriétés hydrauliques, contrôle la migration du TCE. L'effet marqué de la rivière Jacques-Cartier, sur l'écoulement de l'eau souterraine, est confirmé par les travaux de modélisation. Le traçage de particules présente également une remontée de l'eau souterraine vers la rivière dans les deux unités aquifères principales. Finalement, l'effet de la dispersion et de la convergence de l'écoulement vers le centre de la zone d'étude, qui permet l'échange de l'eau propre et de celle contaminée, empêche à progression de la zone plus concentrée en TCE (>600  $\mu$ g/L) dans le modèle de transport après l'atteinte du régime permanent.

Comme recommandations, au niveau du lien entre le panache et la rivière Jacques-Cartier, il est certain qu'il y a des émissions de TCE dans la rivière présentement mais leur ampleur aurait besoin d'être précisée. Les concentrations détectées dans les résurgences sont inférieures à 50  $\mu$ g/L et les concentrations détectées dans l'aquifère, près de la bordure de la rivière, sont moins élevées que dans le reste du panache mesurées en amont. Si ces concentrations atteignant la rivière sont représentatives, les émissions de TCE à la rivière risquent d'augmenter dans les prochaines années car le panache contient de plus fortes concentrations, bien que le modèle numérique montre que les fortes concentrations pourraient ne pas atteindre la rivière.

Un autre point important au niveau du lien entre le panache de TCE et la rivière est la possibilité que le panache puisse poursuivre sa migration du côté ouest ou sous la rivière. Cette possibilité reste encore indéterminée parce qu'on ne sait pas, entre autres, si la rivière peut réellement drainer toute l'eau souterraine qui est apportée par l'aquifère qui transporte le panache de TCE. Si ce n'est pas le cas, une partie de la contamination peut poursuivre sa migration sous la rivière. Aussi, si l'apport d'eau souterraine vers la rivière n'est pas aussi fort du côté ouest que du côté est, le panache pourrait poursuivre sa course sur le côté ouest sur une certaine distance pour revenir ensuite vers la rivière. Cependant, il n'y a pas eu de TCE détecté dans les puits d'observation du côté ouest de la rivière où le contrôle est toutefois moins serré que du côté est.

Pour aider à résoudre ces questions à partir des données déjà disponibles, la modélisation numérique de l'écoulement du système aquifère a été réalisée et démontre que le panache fait résurgence dans la rivière même après une longue période. Par contre, des hypothèses posées par rapport à l'épaisseur et la conductivité hydraulique du lit de la rivière devraient être vérifiées par des travaux de terrain adéquats. Ainsi, pour compléter l'information requise, de nouveaux sondages par enfoncement plus près ou même sur la rive ou dans le lit de la rivière ainsi que sur sa berge ouest permettraient d'avoir un portrait plus précis de l'apport présent de TCE à la rivière. De plus, il serait judicieux de réaliser l'échantillonnage des sédiments du lit de la rivière Jacques-Cartier pour mieux connaître sa composition. Il serait également important de refaire les essais de flux de filtration en fond de rivière avec les mini-piézomètres selon des sections dans la rivière et de faire plusieurs lectures au même endroit afin de calculer une moyenne plus plausible de la conductivité hydraulique des sédiments du lit de la rivière du fair de la rivière.

La modélisation numérique devrait peut-être aussi être réalisée en régime transitoire pour mieux comprendre le lien entre l'eau souterraine et la rivière dans le temps en fonction des précipitations. Par ailleurs, d'autres approches de

80

configuration du maillage pourraient être tentées pour diminuer la sensibilité numérique du modèle en essayant d'insérer plus de couches au modèle afin de réduire le grand contraste de conductivité hydraulique entre les couches.

En outre, un suivi dans le temps de la contamination et des niveaux d'eau dans les puits installés en 2004 devrait permettre de mieux comprendre la zone à l'étude et permettre une gestion efficace de la contamination. Dans un proche avenir, des mesures de contrôle d'émission vers la rivière Jacques-Cartier devraient donc être entreprises afin d'éviter que des concentrations importantes de TCE n'atteignent la rivière.

# **Bibliographie**

Anderson, M.P., et Woessner, W.W., 1992 : Applied groundwater modeling – Simulation of flow and advective transport. Academic Press, San Diego, 381 p.

**Becker, M.W., Georgian, T., Ambrose, H., Siniscalchi, J., Fredrick, K.**, 2004: Estimating flow and flux of ground water discharge using water temperature and velocity, Journal of Hydrology 296, 25 mars 2004, p.221-233.

**Benhammane, S.**, 2002: Évaluation préliminaire des impacts potentiels des changements climatiques sur la ressource en eau souterraine dans l'est du Canada, Rapport de stage professionnel, Université du Québec, INRS-ETE, août 2002, 39 p.

**Boutin, A.**, 2004 : Caractérisation et modélisation numérique de la conramination en TCE dans l'eau souterraine du secteur Valcartier, Québec, Canada. Mémoire M.Sc., INRS-ETE, Janvier 2004.

**Bouwer, H., et Rice, R.C.**, 1976 : A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resour. Res.*, 12 (3), 423-428.

**Butler, J.J. et Garnett, E.J**, 2000 : Simple procedure for analysis of slug test in formations of high hydraulic conductivity using spreadsheet and scientific graphic software. Kansas Geological Survey Open File Report 2000-40, (www.kgs.ukans.edu/hydro/publications/ofr00 40/).

**Butler, J.J.**, 1997 : The design, performance, and analysis of slug tests. Lewis Publishers, USA, 252 p.

**Chapman, T.G.**, 1991: Comment on "Evaluation of Automated Techniques for Base Flow and Recession Analyses" by R.J. Nathan and T.A. McMahon, Water Resources Research, Vol. 27, No.7, pages 1783-1784, July 1991.

**Chapman, T.G.**, 1999: A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation, Hydrological Processes, Vol.13, 701-714, 1999.

**Conseil canadien des ministres de l'environnement** (CCME), 2002 : Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement. Tableau Sommaire, mis à jour en 2002, (http://www.ccme.ca/assets/pdf/f1\_061.pdf).

**Conseil du bassin versant de la Rivière Jacques-Cartier** (CRJC), 2004: http://www.crjc.qc.ca/.

**Diersch H-JG**, 2004a : FEFLOW – Reference Manual. WASI – Institute of Water Resources Planning and System Research Ltd., Berlin, Germany.

**Diersch H-JG**, 2004b : FEFLOW – Users Manual. WASI – Institute of Water Resources Planning and System Research Ltd., Berlin, Germany.

Earth Decision Sciences, 2001 : gOcad 2.0.8.

**Environnement Canada**, 2005 : Station Météorologique Forêt Montmorency RCS (http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climateData/canada\_f.html).

Freeze, R.A., et Cherry, J.A., 1979: Groundwater. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.

**Gelhar, L.W., Welty, C., Rehfeldt, K.W.**, 1992 : A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers, Water Resources Research, 28 (7), p. 1955-1974.

**Godin F., Hébert L.**, 1993 : Cartographie des zones inondables de la rivière Jacques-Cartier à Shannon (DH-93-02), Ministère de l'environnement, Direction du domaine hydrique, Avril 1993.

Golden Software Inc., 1999 : Surfer 7.

**Gray D.M.**, 1972 : Manuel des principes d'hydrologie. Comité national de la décennie hydrologique internationale, 722 p.

**Kruseman , G.P., et de Ridder, N.A.**, 1994 : Analysis and evaluation of pumping test data (2<sup>nd</sup> edition, completely revised). International Institute for Land Reclamation and Improvement, The Netherlands, 377 p.

Lefebvre, R., Boutin, A., Martel, R., Therrien, R., Parent, M., Blais, V., 2003 : Caractérisation et modélisation numérique de l'écoulement et de la migration de la contamination en TCE dans l'eau souterraine du secteur Valcartier, Québec, Canada, Rapport final corrigé de l'INRS-ETE au Ministère de la Défense Nationale, mai 2003, 70 p., plus annexes et cartes.

Lefebvre, R., Blais, V., Ouellon T., Parent, M., 2006 : Caractérisation de l'écoulement et de la contamination en TCE dans l'eau souterraine à Shannon, Québec, Canada, Rapport préliminaire d'expertise soumis à Justice Canada, février 2006, 36 p., plus annexes et cartes.

**Levy, B.S., et Pannell, L.**, 1991: Evaluation of a pressure system for estimating in-situ hydraulic conductivity. Ground Water Management No. 5, *Proceedings* 5<sup>th</sup> *National Outdoor Action Conference*, Las Vegas, NV, 31-45.

**Lord, D.**, 2004: Caractérisation sommaire des eaux de surface (TCE) – Campagnes de juin et de septembre 2003 – Garnison Valcartier, Rapport final, Technisol environnement, février 2004, 26 p.

Martel, R., Parent, M., Lefebvre, R., Paradis, M., Carrier, M.-A., Mailloux, M., Hardy, F., Et Michaud, Y., 2000 : Caractérisation complémentaire des contextes géologique et hydrogéologique des terrains du CRDV et de l'USS Valcartier, Rapport final, Phase I, Étude réalisée pour le CRDV et l'USS Valcartier, Centre géoscientifique de Québec, novembre 2000, 110 p., plus cartes et annexes.

Michaud, Y., Parent, M., Mailloux, M., Boisvert, É., Lefebvre, R., Martel, R., Boivin, R., Roy, N., Hains, S., 1999 : Cartographie des formations superficielles et cartographie hydrogéologique de la base des forces canadiennes Valcartier. Rapport interne CGQ soumis à l'Unité de Soutien de Secteur Valcartier, 1 CD-Rom, 2 cartes.

**Ministère de l'environnement et de la faune du Québec (MEF)**, 1984 : Annuaire de puits et forages. Direction des politiques des secteurs agricole et naturel. Rapport H.G.P.-10.

Ministère de l'environnement du Québec (MENV), 2004 : Critères de qualité de l'eau de surface au Québec. (http://www.menv.gouv.gc.ca/eau/criteres%5Feau/critere t3.htm).

**Ministère de l'environnement du Québec (MENV)**, 1994 : Échantillonnage des eaux souterraines. Dans le Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales. Le griffon d'argile, Québec, 102 p.

**Ministère de l'environnement du Québec (MENV)**, 2001 : Règlement sur la qualité de l'eau potable (Q-2, r.18.1.1), Québec, 32 p.

Ministère de l'environnement du Québec (MENV), 2003 : Système d'information hydrogéologique (SIH), annuaire des puisatiers conçu par Guillaume Descamps du Département de Géologie et génie géologique de l'Université Laval. (http://www.menv.gouv.qc.ca/eau/souterraines/sih/index.htm)

**Nastev, M., Rivera, A., Lefebvre, R. Martel, R., Savard, M.**, 2005 : Numerical simulation of groundwater flow in regional rock aquifers, southwestern Quebec, Canada. Hydrogeology Journal, publié électroniquement dans Online First, 2 juillet 2005.

**Nathan R.J., McMahon T.A.**, 1990: Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analyses, Water resources research, vol.26, no.7, pages 1465-1473, july 1990.

**Ouellon, T., Lefebvre, R., Marcotte, D., Blais, V., Parent, M.**, 2005 : 3D mapping of hydraulic conductivity using geological facies in the Valcartier aquifer system, Quebec. Proceedings, 58<sup>th</sup> Canadian Geotechnical Conference and 6<sup>th</sup> Joint CGS/IAH Conference, Saskatoon, Canada, October 2005, 8 p.

**Ouellon, T.**, 2006 : Distribution spatiale de la conductivité hydraulique dans le système aquifère de Valcartier et influence de l'hétérogénéité sur la modélisation de l'écoulement. Mémoire M.Sc., INRS-ETE, 2006.

**Pankow, J.F. and Cherry, J.A.**, 1996 : Dense Chlorinated Solvents and other DNAPLs in Groundwater, Waterloo Press, 522p.

**Prince Edward Island Water Resources Branch, Department of the Environment**, 1989: Hydrogeology of the winter river basin, Section 4.4-Groundwater-Surface Water Interaction, June 1989, p. 70-81.

**Rasmussen, H., Rouleau, A.**, 2003 : Ministère de l'environnement du Québec, Guide de détermination d'aires d'alimentation et de protection de captages d'eau souterraine, mai 2003, 182 pages.

**Sanexen-Amec**, 2005 : Caractérisation environnementale préliminaire – Municipalité de Shannon. Rapport préliminaire soumis à Construction de Défense Canada, février 2005, N/Réf. RA04-267-1, 51 p. et 6 annexes.

Sanexen Services Environnementaux Inc., 2003 : Évaluation des risques pour la santé humaine et pour l'environnement – Présence de TCE dans les eaux souterraines de la région de Valcartier. Rapport présenté à Travaux publics et Services gouvernementaux Canada pour le Ministère de la Défense nationale du Canada, Juin 2003, N/Réf. RA03-232, 136 p. et 12 annexes.

**Santé Canada**, 2005 : Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canda : Trichloroéthylène. Préparé par le comité fédéral-provincial-territorial sur l'eau potable du Comité fédéral-provincial-territorial sur la santé et l'environnement, Ottawa, Canada, 59 p.

**Sophocleous, M.**, 2002: Interactions between groundwater and surface water: the state of the science, Hydrogeology Journal, Janvier 2002, 16 pages.

**Uffink, G.J.M.**, 1984 : Theory of the oscillating slug test. Nat. Institute for Public Health and Environmental Hygiene, Bilthoven, Unpublished research report, 18 p., [in Dutch].

Winter, T.C., 1998: Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems, Hydrogeology Journal, 1999, 18 pages.

Winter, T.C., Harvey, J.W., Lehn Franke, O., Alley, W.O., 1998: Ground Water and Surface Water, a single resource, U.S. Geological Survey Circular 1139, Denver, Colorado, 1999, 79 pages.

**Zheng, C., Bennett, G.D.**, 2002 : Applied Contaminant Transport Modeling second edition, Wiley-Interscience, 621 p.

Tableaux

÷

	Source des données					
Type de donnée	Données Shannon 2004	Données Valcartier 2001	Données Puisatiers (MENV)	Suivi du MENV à Shannon		
Nombre de forages / contrôle stratigraphique	53	35 8 (pour le roc)		-		
Forages avec échantillonnage de sols	10 (sur les 53)			-		
Nombre de puits d'observation	99 (5 au roc)			-		
Nombre d'échantillons d'eau souterraine	99	17 (suivi 04) 40 (suivi 01-03)	-	29 (suivi 01-04)		
Niveaux d'eau	98	6 en 2004 41 en 2001	-	-		
Essais de perméabilité	91	215 -		-		
Sondages par enfoncement (nombre)	25	-				
Échantillons d'eau dans les sondages	136			-		
Niveaux d'eau dans les sondages	57			-		
Essais de perméabilité dans les sondages	8					
Élévation et eau de résurgences	5			-		
Gradient et eau d'infiltromètres	3			-		

Tableau 1 : Travaux réalisés à Shannon en 2004 et autres données utilisées (Données tirées en partie de Sanexen-Amec, 2005)

# Tableau 2 : Statistiques descriptives des résultats des essais de perméabilité à Shannon

Réponse de l'essai de perméabilité	Unité géologique	Nombre
	Deltaïque	17
Log-linéaire	Proglaciaire	36
(Bouwer &	Roc	4
Rice, 1976)	Unités mixtes	4
	Total	61
Semi amortie Deltaïque		2
(Butler & Garnet,	Proglaciaire	4
2000)	Total	6
<b>Oscillatoire</b> (Uffink, 1984)	Deltaïque	30
	Proglaciaire	2
	Total	32
	Deltaïque	49
	Proglaciaire	42
Total	Roc	4
	Unités mixtes	4
	Total	99

Tableau 3 : Valeurs moyennes et écarts types du logarithme des conduc	ivités
hydrauliques mesurées	

Données	Unité	N	Conductivité hydraulique, moyenne de log( <i>K</i> ) (m/s)	Écart type de log( <i>K</i> ) (m/s)
Shannon 2004	Deltaïque	43	-3.86 (1.4x10 <sup>-4</sup> )	0.49
	Proglaciaire	41	-4.58 (2.6x10 <sup>-</sup> )	0.56
	Roc	4	-5.12 (5.6x10 <sup>-6</sup> )	0.82
Valcartier 2001	Deltaïque	199	-3.77 (1.7x10 <sup>-4</sup> )	0.61
	Proglaciaire	16	-4.41 (3.9x10 <sup>-5</sup> )	0.60
Total	Deltaïque	242	-3.78 (1.6x10 <sup>-4</sup> )	0.59
	Proglaciaire	57	-4.53 (2.9x10 <sup>-5</sup> )	0.57
	Roc	4	-5.12 (5.6x10 <sup>-6</sup> )	0.82
Infiltromètre	date	Flux (m/s)	Gradient vertical (m/m)	Conductivité hydraulique (m/s)
---------------	------------	---------------	-------------------------------	--------------------------------------
SM1	2004-10-27	4.08E-09	0.05	8.16E-08
SM2	2004-10-27	0.00E+00	0.07	-
SM3	2004-10-27	1.11E-07	0.06	2.02E-06
SM4	2004-10-27	0.00E+00	0.05	-
SM5	2004-10-27	2.83E-07	0.12	2.46E-06

1 a b c a u + - w c s u c s a u x u u u u u c u c s	Tableau	4 –	Mesures	aux	infiltromètres
---	---------	-----	---------	-----	----------------

Tableau 5 : Bilans d'eau et de masse simplifiés à la limite entre la Garnison Valcartier et Shannon et à la bordure de la rivière Jacques-Cartier

Paramètres	Limite de la Garnison	Bordure de la rivière
Propriétés du système		
Différence de charge hydraulique <i>dh</i> (m)	2	2
Distance entre les charges hydrauliques <i>dL</i> (m)	300	100
Gradient hydraulique horizontal <i>i</i> (m/m)	0.0067	0.02
Conductivité hydraulique moyenne K (m/s)	2x10 <sup>-4</sup>	2x10 <sup>-4</sup>
Porosité effective <i>n</i> (fraction de volume)	0.33	0.33
Section d'écoulement dans l'unité deltaïque		
Largeur de la section (m)	450	225
Épaisseur de la section (m)	10	12
Aire de la section (m²)	4500	2700
Aire de recharge (m <sup>2</sup> )	250 000	
Recharge annuelle (m/an)	0.275	
Volume de recharge dans l'aire du panache (m <sup>3</sup> /an)	68 750	
Bilan d'eau		
Flux volumétrique <i>q</i> (m/s)	1.33x10 <sup>-6</sup>	4.00x10 <sup>-6</sup>
Flux volumétrique <i>q</i> (m/an)	42	126
Vitesse réelle moyenne <i>v</i> (m/an)	127	382
Débit à travers la section Q (m³/an)	273 312	340 589
Recharge dans l'aire du panache entre les deux sections (m <sup>3</sup> /an)	68 750	-
Somme : débit à travers la section Q et recharge (m <sup>3</sup> /an)	342 062	340589
Bilan de masse de TCE		
Concentration moyenne en TCE (μg/L)	90	40
Concentration moyenne en TCE (kg/m <sup>3</sup> )	0.00009	0.00004
Flux de masse de TCE (kg/an)	24.6	13.6

Limite	Valeur initiale	Position de la limite (initiale et après calage)	Valeur après calage
Est	162 m	Épaisseur totale	163 m
Ouest	154 m	Épaisseur totale	155 m
Rivière JC.	Charges imposées variables	Rivière JC. (surface)	Conditions mixtes avec charges variables (drains), φ= 1x10 <sup>-5</sup> m/s
Nord Rivière JC.	151 m	Rivière JC. (surface)	152 m
Sud Rivière JC.	150 m	Rivière JC. (surface)	150 m
Nord	Flux nul	Épaisseur totale	Flux nul
Sud	162 m	Épaisseur totale	Flux nul

Tableau 6 : Conditions aux limites initiales et après calage du modèle

Tableau 7 : Paramètres hydrauliques du modèle calé

Couches	Unités hydrostratigraphiques	K <sub>x</sub>	Ky	Kz
1,2-a	Deltaïque supérieure	2,0x10 <sup>-4</sup>	2,0x10 <sup>-4</sup>	2,0x10 <sup>-5</sup>
1,2-b	Deltaïque supérieure	9,0x10⁻⁵	9,0x10 <sup>-5</sup>	9,0x10 <sup>-6</sup>
1,2-c	Deltaïque supérieure	1,4x10 <sup>-4</sup>	1,4x10 <sup>-4</sup>	1,4x10 <sup>-5</sup>
3,4-a	Deltaïque inférieure	9,0x10⁻⁵	9,0x10 <sup>-5</sup>	9,0x10 <sup>-6</sup>
3,4-b	Deltaïque inférieure	1,4x10 <sup>-4</sup>	1,4x10 <sup>-4</sup>	1,4x10 <sup>-5</sup>
5-a	Silt glaciomarin	2,0x10 <sup>-7</sup>	2,0x10 <sup>-7</sup>	2,0x10 <sup>-8</sup>
5-b	Proglaciaire	2,6x10 <sup>-5</sup>	2,6x10 <sup>-5</sup>	2,6x10 <sup>-6</sup>
6,7,8	Proglaciaire	2,6x10 <sup>-5</sup>	2,6x10 <sup>-5</sup>	2,6x10 <sup>-6</sup>
	Recharg	e = 275 mm/an	1	

Flux aux limites	Type dominant	Flux (m³/jour)
Flux entrant aux limites de premier	Est, Ouest,	$2.2 \times 10^3$
type (charge imposée)	Nord JC.	2.3x10
Flux sortant aux limites de premier	Sud L-C	6 7×10 <sup>1</sup>
type (charge imposée)	Suu 5C.	0.7710
Flux entrant aux limites de		1x10 <sup>0</sup>
troisième (charge imposée)		
Flux sortant aux limites de	Rivière J -C	3 9x10 <sup>3</sup>
troisième (charge imposée)		0.0010
Flux entrant à la surface (recharge)		1.6x10 <sup>3</sup>
Flux net (entrant – sortant)		-6.5x10 <sup>1</sup> (1.6%)

Tableau 8 : Bilan volumétrique du modèle d'écoulement calé

Tableau 9 : Bilan de masse dans le modèle de transport

Temps (ans)	Masse entrante (g/jour)	Type de limite	Masse sortante (g/jour)	Type de limite	Déséquilibre (g/jour)
2	156	1 <sup>er</sup> type	-0.0083	3 <sup>e</sup> type	156
5	156	1 <sup>er</sup> type	-57	3 <sup>e</sup> type	99
10	157	1 <sup>er</sup> type	-143	3 <sup>e</sup> type	14
25	157	1 <sup>er</sup> type	-163	3 <sup>e</sup> type	-6

## Planches



Carte régionale de localisation et géologie des dépôts meubles



Université du Québec Institut national de la recherche scientifique Eau, Terre et Environnement

Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006

#### Planche 1 Localisation régionale et géologie des dépôts meubles

LÉGENDE



Ар	Sédiments alluviaux : actuels
At	Sédiments alluviaux : terrasses fluviales
Md	Sédiments marins : deltaïques
Mi	Sédiments marins : intertidaux
Mb	Sédiments marins : littoraux, prélittoraux et d'exondation
Go	Sédiments fluvioglaciaires : épandage subaérien
Gs	Sédiments fluvioglaciaires : épandage subaquatique
Gx	Sédiments fluvioglaciaires : juxtaglaciaires
Tr	Sédiments glaciaires : Till remanié
Tvr	Sédiments glaciaires : Till remanié sur roc
Т	Sédiments glaciaires : Till en couverture généralement continue
Tv	Sédiments glaciaires : Till en couverture généralement discontinue
R	Roche métamorphiques et magmatiques précambriennes
	Échelle 1 : 50 000





Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006

#### Planche 2 Contexte géologique du secteur Valcartier







Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006

#### Planche 4 Piézométrie de la nappe semi-captive dans le secteur Valcartier



.....

1000

?

Ep.

dans la nappe libre Puits d'observation installé dans la nappe semi-captive Isopièze indiquant l'élévation de la nappe libre (m) au-dessus du niveau moyen de la mer (incertain en pointillé)

Puits d'observation installé

lsopièze indiquant l'élévation de la nappe semi-captive (m) au-dessus du niveau moyen de la mer (incertain en pointillé)

Présence de la couche silteuse prodeltaïque

Zone de partage des eaux incertaine dans la nappe semi-captive



Zone d'incertitude

Référence géographique: UTM NAD 83 Zone 19

Puits d'observation installé dans la nappe libre

Puits d'observation installé dans la nappe semi-captive

Isopièze indiquant l'élévation de la nappe libre (m) au-dessus du niveau moyen de la mer (incertain en pointillé)

Isopièze indiquant l'élévation de la nappe semi-captive (m) au-dessus du niveau moyen de la mer (incertain en pointillé)

Limite définie du panache d'eau souterraine contaminée par moins de 50 ug/L en TCE (incertaine en pointillé)

Limite définie du panache d'eau souterraine contaminée par plus de 50 ug/L en TCE (incertaine en pointillé)

Panache d'eau contaminée: concentration en TCE généralement entre la limite de détection et 50 ug/L

Panache d'eau contaminée: concentration en TCE généralement supérieure à 50 ug/L

- Puits privé à Shannon pour lequel une concentration en TCE supérieure à 5 ug/L a déjà été observée
- Puits privé à Shannon pour lequel une concentration en TCE entre la limite de détection et 5 ug/L a déjà été observée





[TCE] dissous dans la nappe semi-captive



[TCE] dissous avec le GEOPROBE au CRDV (ug/L) (valeurs maximales d'un profil) ★500 à 1000 (12)

		0000	1000	( )
-	\$·	100à	500	(28)
1		50 à	100	(11)
		10 à	50	(53)
		0 à	10	(57)

#### [TCE] dissous avec le GEOPROBE chez SNC-TEC (ug/L)

★ 1,000 à 5,000 (1 en 2001, 4 en 2002)
 ★ 500 à 1000 (4 en 2001, 4 en 2002)
 ☆ 100 à 500 (1 en 2001, 7 en 2002)
 ★ 50 à 100 (2 en 2001, 3 en 2002)
 ★ 10 à 50 (7 en 2001, 19 en 2002)
 ☆ 0 à 10 (14 en 2001, 57 en 2002)

Note: nombre de données entre parenthèses



Université du Québec Institut national de la recherche scientifique Eau, Terre et Environnement

Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006

#### Légende de la Planche 5





Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006

#### Planche 5

Carte de contamination en TCE de l'eau souterraine dans le secteur Valcartier

> Légende de la carte sur la feuille précédente

Référence géographique: UTM NAD 83 Zone 19



Carte de localisation des travaux, Shannon, secteur Valcartier



Université du Québec Institut national de la recherche scientifique Eau, Terre et Environnement

Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006

## Planche 6

Localisation des travaux à Shannon

Forages 2004 échantillons sols

• Forages 2004 destructifs

★ Geoprobe 2004

♦ Points en bordure de la rivière JC

--- Limite de propriété

Routes

Échelle 1 : 8 000



Carte de localisation des coupes stratigraphiques



Université du Québec Institut national de la recherche scientifique Eau, Terre et Environnement

Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006

## Planche 7

# Localisation des coupes stratigraphiques

Forages 2004 échantillons sols

- Forages 2004 destructifs
- ★ Geoprobe 2004
- Puits d'observation 2001
- $\Phi$  Points en bordure de la rivière JC
- - Limite de propriété
  - Coupes stratigraphiques (A-G)

- Routes

Échelle 1 : 8 000





180-

170-

160-

150-

E 140-

120

110-

100-

EST

180

170

160

150

140

130

120

110

100

	Coupe	es stratigr	aphiqu	ues lo	ngitu	dinale	s (A-A', B-B', C-C')	et transve	rsales (D-	-D', E-E', F-F', G-G')	
Tiré de : Lefebvre <i>et al.</i> (2006)	Surface libre	Remblai	Proglaciaire	Glaciomarin	Deltaïque	Unités géologiques :	<b>Planche 8</b> Coupes stratigraphiques Iongitudinales et transversales	INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006	Véronique Blais	Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada	Université du Québec Institut national de la recherche scientifique Eau, Terre et Environnement





Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006

#### Planche 9 Épaisseur totale de sédiments et élévation de la surface du roc



- Puits Garnison
- Puits annuaire des puisatiers
- × Contrôles manuels

Échelle 1:10 000





Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006

### Planche 10

Épaisseur et élévation de la surface de l'unité proglaciaire (incluant till)

 Puits Shannon 2004 utilisés pour interpolation

- ▲ Puits Garnison
- Forages avec blocs sur le roc (Symbole supperposé aux autres)

Échelle 1:10 000





Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006

#### Planche 11

Épaisseur et élévation de la surface de l'unité de silt glaciomarin

Puits Shannon 2004

- Puits Garnison
- × Contrôles manuels

Échelle 1:10 000



Carte de l'élévation de la surface du sol

250

0

500



Université du Québec Institut national de la recherche scientifique Eau, Terre et Environnement

Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006

#### Planche 12

Épaisseur de l'unité de sable deltaïque et élévation de la surface du sol

Puits Shannon 2004

- Puits Garnison
- X Contrôles manuels

Échelle 1:10 000



Modèle géologique en trois dimensions dans la zone d'étude présenté sous forme de coupes avec la surface libre



Université du Québec Institut national de la recherche scientifique Eau, Terre et Environnement

Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006

### Planche 13 Modèle géologique en trois dimensions

Unités géologiques :



Deltaïque

Glaciomarin



Proglaciaire

Roc





Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006

#### Planche 14 Surface libre et épaisseur saturée

- Puits Shannon 2004
- Contrôles rivière JC 2004
- Puits Garnison
- Contrôles manuels



Direction générale d'écoulement de l'eau souterraine

Échelle 1:10 000





Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006

## Planche 15

Piézométrie de l'unité proglaciaire et du roc

• Contrôles dans proglaciaire (Shannon, 2004)

 Contrôles dans proglaciaire,
 avec silt glaciomarin (Garnison, 2001)

 Contrôles dans zone sans silt glaciomarin (Garnison, 2001)

Contrôles au roc (Shannon, 2004)

0

 Direction générale
 d'écoulement de l'eau souterraine

Échelle 1:10 000













B) Coupes piézométriques dans le sens de l'écoulement de l'eau souterraine



Université du Québec Institut national de la recherche scientifique Eau, Terre et Environnement

Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006

#### Planche 17 Coupes piézométriques

Coupes piézométriques :

Points de contrôles



Niveau piézométrique

Ligne piézométrique (Incertaine en pointillé)

Localisation :

- ★ Geoprobe 2004
- Puits d'observation 2004
- Puits d'observation 2001

----- Limite de propriété

Routes

localisation coupes





Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006

#### Planche 18 Bassin de la rivière Jacques-Cartier

<u>Source</u> : Ruth Boivin, Laboratoire de cartographie numérique et de photogravimétrie (LCNP), CGC-Québec, Ressources naturelles Canada, décembre 2004.



154 153 élévation (m) Écart moyen = 2.5 m 152 151 150 29-6 1-7 3-7 5-7 7-7 9-7 11-7 13-7 15-149 18-04-05 08-05-05 28-05-05 17-06-05 07-07-05 27-07-05 16-08-05 05-09-05 25-09-05 15-10-05 04-11-05 date - niveau eau Jacques-Cartier - niveau eau PO-SH-1B

155

A) Séparation de l'hydrogramme de la rivière Jacques-Cartier en 2004-2005



C) Localisation des résurgences échantillonnées et des emplacements jaugées en bordure de la rivière Jacques-Cartier

B) Comparaison des niveaux d'eau dans la rivière Jacques-Cartier et dans l'eau souterraine à proximité (PO-SH-1B)



D) Schéma de localisation de la crépine du puits PO-SH-1B par rapport à la rivière Jacques-Cartier



Université du Québec Institut national de la recherche scientifique Equ. Terre et Environnement

Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006

#### Planche 19 Hydrologie de la rivière Jacques-Cartier

Note: les chiffres sur les cartes à la figure C indiquent les concentrations en TCE (µg/L)



Carte du panache de TCE dissous dans l'eau souterraine (concentration en ug/L)

Note : Les zones délimitent les concentrations maximales généralement détectées en profondeur à l'intérieur de la zone



Université du Québec Institut national de la recherche scientifique Eau, Terre et Environnement

Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006

#### Planche 20 Panache de TCE

Geoprobe 2004 (ug/L)

- × non-détecté
- \* détecté 5.000
- ★ 5.001 50.000
- ★ 50.001 590.000

★ 590 et plus

Puits conventionnels (ug/L)

- + non-détecté
- détecté 5.000
- 0 5.001 50.000
- **50.001 590.000**
- 590 et plus
- Infiltromètres
- Résurgences
- piézométrie libre
- direction d'écoulement
- limite de détection<[TCE]<5 (ug/L)
- 5<[TCE]<50 (ug/L)
- 50<[TCE]<590 (ug/L)

Échelle 1 : 8 000





A) Localisation des coupes de contamination





B) Coupes de la contamination en TCE (A-A', B-B', C-C') et transversales (D-D', E-E', F-F', G-G')

EST

Planche 21 Coupes de la contamination Geoprobe : × non détecté * détecté à 5 ug/L 5 à 50 ug/L 5 à 50 ug/L • son détecté • détecté à 5 ug/L • 5 à 50 ug/L • 5 a 5	Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada Véronique Blais INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006
---	---



Modèle géologique en trois dimensions dans la zone d'étude présenté sous forme de coupes avec concentrations en TCE



Université du Québec Institut national de la recherche scientifique Eau, Terre et Environnement

Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006

#### Planche 22 Distribution de la contamination en TCE dans le modèle géologique 3D

Unités géologiques :



Deltaïque

Glaciomarin



Proglaciaire



Contamination en TCE :

- non détecté
- détecté à 5 ug/L
- 🔵 5 à 50 ug/L
- 50 à 590 ug/L
- > 590 ug/L
  Tiré de : Lefebvre *et al.* (2006)





Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006

#### Planche 23

Caractéristiques du modèle d'écoulement de l'eau souterraine



A) Comparaison des charges simulées et mesurées pour le modèle d'écoulement calé





C) Sensibilité des conditions limites



B) Sensibilité de la recharge et de la conductivité hydraulique



D) Carte de l'erreur sur la charge (m) de la simulation avec le modèle calé



Université du Québec Institut national de la recherche scientifique Eau, Terre et Environnement

Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006

#### Planche 24 Calage et étude de sensibilité du modèle numérique





Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006

#### Planche 25 Piézométrie simulée de l'eau souterraine

	l
[m]	
.500e+02	
.516e+02	
.533e+02	
.549e+02	
.565e+02	
.581e+02	
.598e+02	
.614e+02	
.630e+02	
5 [m/d]	



A) Piézométrie et vecteurs d'écoulement simulés dans l'unité deltaïque à la couche 2 du modèle



B) Piézométrie et vecteurs d'écoulement simulés dans l'unité proglaciaire à la couche 7 du modèle





Université du Québec Institut national de la recherche scientifique Eau, Terre et Environnement

Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006

#### Planche 26 Gradients hydrauliques simulés dans le modèle d'écoulement



Jacques-cartier par traçage de particules inverse (vers l'amont)



Université du Québec Institut national de la recherche scientifique Eau, Terre et Environnement

Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006

#### Planche 27 Traçage de particules en plan



Jacques-cartier par traçage de particules inverse (vers l'amont)



Université du Québec Institut national de la recherche scientifique Eau, Terre et Environnement

Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006

#### Planche 28 Traçage de particules en trois dimensions







Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006

#### Planche 29 Résultats du transport de masse après 25 ans


A) Transport de TCE, en plan, à partir de la limite de propriétés entre Shannon et la Garnison Valcartier vers la rivière Jacques-Cartier, après 2 ans



C) Transport de TCE, en plan, à partir de la limite de propriétés entre Shannon et la Garnison Valcartier vers la rivière Jacques-Cartier, après 10 ans



B) Transport de TCE, en plan, à partir de la limite de propriétés entre Shannon et la Garnison Valcartier vers la rivière Jacques-Cartier, après 5 ans



D) Transport de TCE, en plan, à partir de la limite de propriétés entre Shannon et la Garnison Valcartier vers la rivière Jacques-Cartier, après 25 ans



Université du Québec Institut national de la recherche scientifique Eau, Terre et Environnement

Caractérisation et modélisation de l'écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada

Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement Février 2006

## Planche 30

Patrons de migration simulés du TCE par transport de masse en fonction du temps

Tiré de : Lefebvre et al. (2006)