

Interprétation de la caractérisation
du TCE dans l'eau souterraine
à Shannon, Québec, Canada

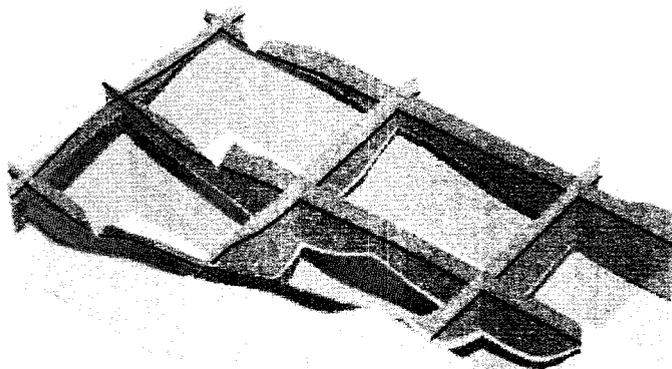


INRS

RAPPORT FINAL RÉVISÉ

Interprétation de la caractérisation du TCE dans l'eau souterraine à Shannon, Québec, Canada

René Lefebvre, Véronique Blais, Thomas Ouellon,
Michel Parent, Jean-Marc Ballard et Cintia Racine



Institut national de la recherche scientifique
Centre - Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R-812r

Juillet 2010

INRS

RAPPORT FINAL RÉVISÉ

Interprétation de la caractérisation du TCE dans l'eau souterraine à Shannon, Québec, Canada

René Lefebvre¹, Véronique Blais¹, Thomas Ouellon¹,
Michel Parent², Jean-Marc Ballard¹ et Cintia Racine¹

1 : Institut national de la recherche scientifique, Centre - Eau Terre Environnement

2 : Ressources naturelles Canada, Commission géologique du Canada

Rapport soumis à

Me Marie-Claude Filion, Ministère de la Défense Nationale

Me David Lucas, Justice Canada

Institut national de la recherche scientifique
Centre - Eau Terre Environnement

Rapport de recherche R-812r

Juillet 2010



Résumé

Mandat. Ce rapport porte sur l'analyse des données de la caractérisation hydrogéologique et environnementale réalisée par le Ministère de la Défense Nationale (MDN) à l'automne 2004 dans la municipalité de Shannon en relation avec la contamination de l'eau souterraine par du trichloroéthène (TCE). Cette analyse avait pour but 1) de délimiter l'étendue du panache de contamination en TCE à Shannon, 2) de déterminer la nature du lien entre les eaux souterraines contaminées en TCE et la rivière Jacques-Cartier qui traverse Shannon, et 3) de déduire s'il y pourrait y avoir des sources locales de contamination de l'eau souterraine en TCE à Shannon. Les données du suivi annuel du TCE réalisé par le MDN après 2004 ont aussi été analysées.

Caractérisation. Une caractérisation détaillée a été réalisée à Shannon et ses environs sur une région d'étude d'environ 1.5 km par 1.5 km. Les données disponibles à la Garnison Valcartier à l'est de Shannon ont aussi été utilisées, de même que certaines données publiques (Système d'information hydrogéologique du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, MDDEP). Les travaux ont impliqué la réalisation de 53 forages et l'installation de 99 puits d'observation. Ces puits ont servi à échantillonner l'eau souterraine pour la faire analyser et quantifier la concentration de contaminants, particulièrement le TCE. Depuis 2005, ces puits permettent aussi au MDN de réaliser un suivi annuel de la qualité de l'eau souterraine dans la région d'étude comprenant Shannon et ses environs. 136 autres échantillons d'eau souterraine ont été prélevés par 25 sondages par enfoncement (*direct push*) qui sont réalisés en enfonçant une tige métallique dans le sol au bout de laquelle un intervalle perforé permet d'échantillonner l'eau sans avoir à faire l'installation de puits permanents. Enfin, de l'eau souterraine a été prélevée à 5 résurgences de la nappe (sources) en bordure de la rivière Jacques-Cartier.

Identification des matériaux. Les forages réalisés lors de la caractérisation permettent d'échantillonner le sol et d'identifier les types de matériaux qui se trouvent en profondeur. En comparant les matériaux rencontrés dans les différents forages et l'élévation à laquelle ils se trouvent, il est possible de déterminer la distribution en plan et en profondeur des différents types de matériaux qui composent les unités géologiques dans la région d'étude. La nature et la distribution de ces unités exercent un contrôle important sur l'écoulement de l'eau souterraine.

Perméabilité et nature aquifère des matériaux. Les puits d'observation servent aussi à déterminer si les matériaux sont perméables, c'est-à-dire si l'eau souterraine peut y circuler facilement. Des essais de perméabilité consistent à modifier le niveau d'eau dans un puits et à mesurer le temps requis pour que l'eau revienne à son niveau initial. Les matériaux très perméables permettent le retour rapide au niveau initial, en quelques dizaines de secondes. Ces données permettent de déterminer quelle unité peut être considérée un aquifère dans lequel l'eau souterraine peut circuler facilement, et quelle unité sera plutôt considérée peu perméable (confinante) et tendra plutôt à restreindre l'écoulement de l'eau souterraine.

Écoulement de l'eau souterraine. Les puits d'observation et les sondages par enfoncement permettent aussi de mesurer l'élévation de l'eau souterraine. Cette mesure permet de déduire la direction d'écoulement de l'eau souterraine qui se produit à partir des endroits où le niveau d'eau est élevé vers ceux où le niveau est plus bas. Le degré de connexion entre les unités aquifères et la rivière peut être déduit en mesurant les changements de niveau d'eau dans la rivière et dans un

puits d'observation adjacent. Cette connexion peut aussi être déduite de mesures de l'écoulement de l'eau souterraine à travers le lit de la rivière, cette mesure a été tentée à l'aide d'infiltromètres à 5 endroits, avec 3 tests concluants.

Distribution des matériaux à Shannon. Dans la région d'étude, on retrouve quatre types de matériaux, qui constituent quatre unités hydrostratigraphiques et qui ont des rôles différents au niveau de l'écoulement de l'eau souterraine. À la surface du sol, on retrouve une unité de sable deltaïque qui a une épaisseur de l'ordre de 20 à 30 m. Cette unité est très perméable et constitue le principal aquifère de la région d'étude. L'autre unité aquifère est un peu moins perméable et constituée de sable et gravier avec des blocs (nommée « diamictons »). Les diamictons reposent à la surface du roc et leur épaisseur est très variable entre 4 et 16 m. Ces deux principales unités aquifères sont séparées par une unité à grains fins (« silt glaciomarin ») qui limite l'écoulement et l'interaction entre les deux unités aquifères. Cette unité peu perméable a une épaisseur entre 0 et 3 m et est discontinue, ce qui complique les interactions possibles entre les deux unités aquifères. Ces trois unités composent les dépôts meubles qui reposent sur le roc dont la topographie de la surface est accentuée et forme une dépression comblée par 40 à 50 m de sédiments. Cette dépression dans le roc s'étend d'ouest en est de la rivière Jacques-Cartier à Shannon jusqu'à Québec (Val-Bélair), 5 km à l'est. À l'ouest de la région d'étude, la vallée de la rivière Jacques-Cartier découpe les dépôts meubles, et s'écoule sur le sable deltaïque au centre et sur les diamictons au nord et au sud de la zone d'étude.

Écoulement et panache de TCE. L'écoulement de l'eau souterraine se fait généralement de l'est vers l'ouest, i.e. du territoire de la Garnison Valcartier vers Shannon et la rivière Jacques-Cartier. Cependant, dans la partie sud de la région d'étude, il y a une composante d'écoulement vers le nord en provenance du Mont Rolland-Auger. L'écoulement de l'eau souterraine permet la migration de la contamination en TCE qui se trouve dissous dans l'eau. La recommandation de Santé Canada pour la concentration maximale de TCE dans l'eau potable est de 5 µg/L (microgramme par litre) et la norme du MDDEP pour l'eau potable est de 50 µg/L. La norme du MDDEP pour la protection de la vie aquatique dans l'eau de surface est de 590 µg/L (toxicité aiguë). La contamination en TCE dissous est présente dans la partie centrale de la région d'étude dans une bande s'étendant de l'est vers l'ouest entre la Garnison Valcartier et la rivière Jacques-Cartier. Le TCE est présent presque exclusivement dans l'unité de sable deltaïque sur toute son épaisseur. Le TCE est pratiquement absent des diamictons et il n'est pas détecté dans le roc. Les concentrations plus importantes de TCE, dépassant 590 µg/L en 2004, se retrouvent au centre de la région d'étude près de la limite de la Garnison Valcartier et de Shannon. Les concentrations en TCE sont observées jusqu'à la rivière Jacques-Cartier dans deux résurgences (sources) et dans les puits et sondages réalisés à proximité de la rivière. Lors de cette étude, aucune concentration en TCE dissous n'a été détectée dans l'eau souterraine à l'ouest de la rivière Jacques-Cartier. Les concentrations en TCE ont diminué depuis 2004 et il n'y a pas eu de concentrations excédant 590 µg/L observées après 2004. Les produits de dégradation du TCE, le 1,2-dichloroéthène (DCE) et le chlorure de vinyle (CV), sont aussi présents dans la région d'étude. À l'automne 2004, le TCE a été détecté à 108 occasions sur 222 analyses (49%) à une concentration médiane de 16.5 µg/L. Le CV a été détecté 11 fois sur 234 analyses (5%) à une concentration médiane de 2.2 µg/L (comparé à une norme dans l'eau potable de 2 µg/L). Enfin, le DCE a été détecté 79 fois sur 234 analyses (34%) à une concentration médiane de 5.1 µg/L (comparé à une norme

dans l'eau potable de 50 µg/L). Le rapport des concentrations en TCE et DCE donne des indications sur la provenance du TCE à partir des zones sources ayant émis le TCE.

Lien des aquifères avec la rivière Jacques-Cartier. Il y a un lien hydraulique direct entre la rivière Jacques-Cartier et l'écoulement de l'eau souterraine dans l'unité de sable deltaïque au centre de la région d'étude et un lien direct avec l'unité des diamictons surtout au sud de la région d'étude. Selon les données de 2004, le panache de TCE dissous apparaît continu jusqu'à la rivière Jacques-Cartier en plan avec un niveau de concentration entre 50 et 590 µg/L. Cependant, les concentrations en TCE dans les résurgences échantillonnées en bordure de la rivière n'avaient que 3 et 42 µg/L à l'automne 2004. Dans la situation présente, il ne fait pas de doute que le panache présentement délimité à Shannon émerge dans la rivière Jacques-Cartier, soit à sa berge soit plus loin sous son lit. Il pourrait y avoir atténuation des concentrations en TCE lors de son passage à travers le lit de la rivière, un phénomène observé à d'autres rivières caractérisées plus en détail (autres informations données dans le rapport).

Potentiel de sources de TCE locales. La contamination en TCE dissous dans l'aquifère de sable deltaïque à Shannon est en continuité et en aval de celle observée sur la Garnison Valcartier. Il est certain que la migration dans l'eau souterraine du TCE détecté à la Garnison apporte de la contamination sous le territoire de Shannon jusqu'à la bordure de la rivière Jacques-Cartier. Une autre étude de l'INRS utilisant des traceurs géochimiques a pu mettre en relation les différentes parties du panache de TCE retrouvé à Shannon avec trois groupes de zones sources localisées à l'est de Shannon : 1) les zones sources à RDDC Nord ainsi que le Secteur 214 sur les terrains de la SIVI; 2) la Lagune C sur les terrains de la SIVI; et 3) potentiellement l'ancien dépotoir à la limite ouest des terrains de la SIVI (ou d'autres sites à proximité). Trois groupes d'échantillons d'eau souterraine avec des rapports de concentrations TCE/DCE distincts indiquent aussi trois provenances distinctes du TCE et la distribution spatiale de ces groupes est cohérente avec les indications fournies par les traceurs géochimiques. Il ne semble donc pas qu'une zone source locale à Shannon puisse être aussi reliée à la présence de TCE à Shannon.

Executive Summary

Mandate. This report documents a data analysis of the hydrogeological and environmental characterization carried out by the Department of National Defense (DND) in the fall of 2004 in the municipality of Shannon related to groundwater contamination with trichloroethene (TCE). This analysis aimed to 1) delineate the extent of the TCE plume in Shannon, 2) determine the relationship between TCE-contaminated groundwater and the Jacques-Cartier River that flows through Shannon, and 3) evaluate the possibility that local TCE sources could contaminate groundwater in Shannon. Data from the yearly TCE monitoring program carried out by DND after 2004 were also analyzed.

Characterization. A detailed characterization was carried out in Shannon on a study area of about 1.5 km by 1.5 km. Data available at the Valcartier Garrison east of Shannon were also used, as well as some public data (Water-well driller's data base of the Quebec Environment Ministry, MDDEP). Field work involved the drilling of 53 boreholes and the installation of 99 observation wells. These observation wells were used to sample groundwater to analyse the concentration of contaminants, especially TCE. Since 2005, these observation wells also allow DND to carry out a yearly monitoring program of groundwater quality in the study area including Shannon and its surrounding. 136 other water samples were collected using 25 direct push soundings that are made by hammering a steel tubing in the soil with a screened open end allowing the sampling of groundwater, without requiring the installation of a permanent observation well. Finally, groundwater was also sampled at 5 seeps (springs) near the Jacques-Cartier River.

Identification of materials. Boreholes drilled during the characterization also allowed soil sampling and the identification of materials present in the subsurface. By comparing materials found in different boreholes and the elevation at which they are found, it is possible to delineate the aerial distribution and depth interval of different materials representative of the geological units found in the study area. The nature and distribution of these units exert an important control on groundwater flow.

Permeability and nature of aquifer materials. Observation wells are also used to determine if the materials present in the subsurface are permeable, i.e. allow groundwater to flow through them easily. Permeability tests (also called slug tests) induce a change of the water level in an observation well and the measurement of the time required for water to come back to its initial level. Very permeable materials allow a rapid recovery of the initial water level, within a few tens of seconds. These data allow the identification of aquifer units through which groundwater will flow easily, and the confining low permeability units that will restrict groundwater flow.

Groundwater flow. Observation wells and direct push soundings allow the measurement of groundwater levels (elevation). This measure indicates the direction of groundwater flow that occurs from areas of high water level to areas of lower level. The interconnection between the aquifer units and the river can be inferred by measuring water level changes in the river and an adjacent observation well. This interconnection can also be determined by measurements of the seepage of groundwater through the river bed. Such measurements were attempted at 5 locations using seepage meters with 3 concluding tests.

Distribution of subsurface materials in Shannon. In the study area, there are four types of materials, which represent four hydrostratigraphic units that are playing different roles relative to groundwater flow. At the soil surface, there is a deltaic sand unit with a thickness of 20 to 30 m. This very permeable unit represents the main aquifer of the study area. The other aquifer unit is less permeable and made up of silty sand and gravel with boulders (called “diamictons”). Diamictons rest on the rock surface and their thickness is quite variable between 4 and 16 m. These two main aquifer units are separated by a fine-grained unit (“glaciomarine silt”) that limits flow and interaction between the two aquifers. This low permeability unit has a thickness ranging from 0 to 3 m and is discontinuous, which complicates the possible interactions between the two aquifer units. These three units make up surficial sediments that rest on bedrock whose topography is irregular and forms a depression filled by 40 to 50 m of sediments. This bedrock depression extends from west to east, from the Jacques-Cartier River to Quebec City (Val-Bélair), 5 km to the east. To the west of the study area, the Jacques-Cartier River cuts through surficial sediments, and flows over the deltaic sands in the center and over diamictons to the north and south of the study area.

Groundwater flow and TCE plume. Groundwater flow occurs generally from east to west, i.e. from the territory of the Valcartier Garrison to Shannon and the Jacques-Cartier River. However, in the southern part of the study area, there is a flow component to the north coming from Rolland-Auger Mount. Groundwater flow allows the migration of TCE contamination that is dissolved in water. The new recommendation of Health Canada for the maximum TCE concentration in drinking water is 5 µg/L (microgram per litre) but the Quebec Environment Ministry (MDDEP) maximum concentration limit (MCL) is 50 µg/L. The MDDEP norm for aquatic life protection in surface water is 590 µg/L (acute toxicity). Dissolved TCE contamination is present in the central zone of the study area in a band extending from east to west from the Valcartier Garrison to the Jacques-Cartier River. TCE is almost exclusively present in the (deltaic) sand unit over its entire thickness. TCE is almost absent from the diamictons and was not detected in the bedrock. The highest TCE concentrations, exceeding 590 µg/L in 2004, are found in the centre of the study area near the limit of the Valcartier Garrison and Shannon. TCE concentrations are observed at the Jacques-Cartier River in two seeps (springs) and in the observation wells and direct push soundings made near the river. During this study, no dissolved TCE concentration was detected in groundwater west of the Jacques-Cartier River. TCE concentrations have decreased after 2004 and there were no concentrations exceeding 590 µg/L observed after 2004. TCE degradation products, 1,2-dichloroethene (DCE) and vinyl chloride (VC), are also present in the study area. In the fall of 2004, TCE was detected 108 times in 222 analyses (49%) at a median concentration of 16.5 µg/L. VC was detected 11 times in 234 analyses (5%) at a median concentration of 2.2 µg/L (compared to a MCL of 2 µg/L in drinking water). Finally, DCE was detected 79 times in 234 analyses (34%) at a median concentration of 5.1 µg/L (compared to a MCL of 50 µg/L). The ratio of TCE and DCE concentrations provides indications of TCE origin from the sources zones that emitted TCE.

Aquifers relationship with the Jacques-Cartier River. There is a direct hydraulic link between the Jacques-Cartier River and groundwater flow in the deltaic sand unit in the centre of the study area and a direct relationship as well with the diamictons mostly to the south of the study area. According to the 2004 data, the TCE plume appears continuous all the way to the Jacques-

Cartier River in plan view with concentrations between 50 and 590 µg/L. However, TCE concentrations in samples from seep samples near the river had only 3 and 42 µg/L in the fall of 2004. In the present situation, there is no doubt that the TCE plume found within Shannon emerges on the edge of the river or farther under its bed. Attenuation of TCE concentrations could occur during its seepage through the riverbed, a process observed in other rivers characterized in more detail (see report for further information).

Potential local TCE sources. Dissolved TCE contamination found in the deltaic sand aquifer in Shannon is in continuity and down gradient of the one found at the Valcartier Garrison. It is certain that groundwater migration of the TCE detected at the Garrison carries contamination under the municipality of Shannon and all the way to the Jacques-Cartier River. Another INRS study using geochemical tracers has related different parts of the TCE plume found in Shannon to three groups of source zones located east of Shannon: 1) sources zones of DRDC North and Sector 214 located on SIVI's property; 2) Lagoon C located on SIVI's property; and 3) potentially the former waste dump located at the western limit of SIVI's property (or other sites in the vicinity). Three groups of groundwater samples having distinct TCE/DCE ratios also indicate three TCE origins and the spatial distribution of these groups is coherent with the indications provided by geochemical tracers. Thus, there does not appear to be a local TCE source zone in Shannon that would also be related to the presence of TCE in Shannon.

Table des matières

1. INTRODUCTION ET MISE EN CONTEXTE	1
1.1 LOCALISATION DE LA RÉGION D'ÉTUDE	1
1.2 HISTORIQUE	1
1.3 MANDAT DE L'INRS-EAU, TERRE ET ENVIRONNEMENT	2
1.4 TRAVAUX DE CARACTÉRISATION RÉALISÉS À SHANNON EN 2004	2
2. ANALYSE DES DONNÉES DE CARACTÉRISATION	5
2.1 CONTEXTE HYDROSTRATIGRAPHIQUE	5
2.1.1 MÉTHODOLOGIE	6
2.1.2 CONTEXTE HYDROSTRATIGRAPHIQUE À PARTIR DES COUPES GÉOLOGIQUES	9
2.1.3 DISTRIBUTION ET MODÈLE 3D DES UNITÉS HYDROSTRATIGRAPHIQUES	11
2.2 PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES ET ÉCOULEMENT DE L'EAU SOUTERRAINE	13
2.2.1 MÉTHODOLOGIE	13
2.2.2 PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES DES UNITÉS	16
2.2.3 PIÉZOMÉTRIE ET ÉCOULEMENT DE L'EAU SOUTERRAINE	18
2.3 RIVIÈRE JACQUES-CARTIER	20
2.3.1 DESCRIPTION DE LA RIVIÈRE JACQUES-CARTIER	20
2.3.2 HYDROLOGIE	21
2.3.3 RÉSURGENCES	23
2.3.4 FLUX DE FILTRATION EN FOND DE RIVIÈRE	23
2.3.5 MINI-PIÉZOMÈTRES	24
2.4 DISTRIBUTION DU TCE DISSOUS	25
2.4.1 MÉTHODOLOGIE	25
2.4.2 DISTRIBUTION EN PLAN DE LA CONTAMINATION EN TCE	27
2.4.3 DISTRIBUTION EN PROFONDEUR DE LA CONTAMINATION EN TCE	28
2.4.4 CARTE RÉGIONALE DU PANACHE DE TCE	28
2.4.5 ÉVOLUTION TEMPORELLE DES CONCENTRATIONS EN TCE	29
2.4.6 PRODUITS DE DÉGRADATION DU TCE	32
3. DISCUSSION EN RELATION AVEC LES OBJECTIFS DU MANDAT	35
3.1 SYNTHÈSE DU CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE	35
3.2 DISTRIBUTION DE LA CONTAMINATION EN TCE	35
3.3 LIEN AVEC LA RIVIÈRE JACQUES-CARTIER	36
3.4 SOURCES DE LA CONTAMINATION EN TCE	37
4. CONCLUSIONS	38
RÉFÉRENCES CITÉES OU UTILISÉES	40

Liste des tableaux, planches et annexes

Tableaux

Tableau 1.1 : Travaux réalisés à Shannon en 2004 et autres données utilisées	3
Tableau 2.1 : Types de réponses des essais de perméabilité à Shannon et méthodes d'interprétation utilisée pour ce type de réponse	14
Tableau 2.2 : Compilation des résultats des essais de perméabilité à Shannon.....	16
Tableau 2.3 : Nombre de mesures et valeur médiane de $\log(K)$ (m/s) des hydrofaciès retrouvés dans les sédiments deltaïques et les diamictons à Shannon et dans le secteur Valcartier	17
Tableau 2.4 : Mesure aux infiltromètres (Sanexen-Amec, 2005).....	24
Tableau 2.5 : Concentrations en TCE, DCE et CV dans l'eau souterraine à Shannon en 2004...	33

Planches

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

Planche 1 : Localisation régionale et géologie des dépôts meubles
Planche 2 : Localisation des travaux à Shannon
Planche 3 : Localisation des coupes stratigraphiques
Planche 4 : Coupes stratigraphiques longitudinales et transversales
Planche 5 : Épaisseur totale de sédiments et élévation de la surface du roc
Planche 6 : Épaisseur et élévation de la surface de l'unité diamictons (incluant till)
Planche 7 : Épaisseur et élévation de la surface de l'unité de silt glaciomarin
Planche 8 : Épaisseur de l'unité de sable deltaïque et élévation de la surface du sol
Planche 9 : Modèle géologique en trois dimensions
Planche 10 : Propriétés hydrauliques des unités
Planche 11 : Surface libre et épaisseur saturée en 2004-2005
Planche 12 : Piézométrie de l'unité diamictons et du roc en 2004-2005
Planche 13 : Gradients hydrauliques verticaux en 2004-2005

- Planche 14 : Coupes piézométriques en 2004-2005
- Planche 15 : Hydrologie de la rivière Jacques-Cartier
- Planche 16 : Panache de TCE local en 2004-2005
- Planche 17 : Coupes de la contamination en TCE en 2004-2005
- Planche 18 : Distribution de la contamination en TCE en 2004-2005 dans le modèle géologique 3D
- Planche 19 : Panache de TCE régional en 2004-2005
- Planche 20 : Évolution dans le temps des concentrations en TCE : panache régional
- Planche 21 : Évolution dans le temps des concentrations en TCE : panache local
- Planche 22 : Évolution dans le temps des concentrations en TCE : vues en coupe
- Planche 23 : Évolution dans le temps des concentrations en TCE : exemples de puits
- Planche 24 : Relations entre le TCE et ses produits de dégradation (Données 2004)
- Planche 25 : Concentrations en TCE et DCE vues en coupe (Données 2004)

Annexes

(Les annexes du rapport sont présentées sur un CD à la fin du rapport)

- Annexe A – Propriétés et stratigraphie des puits d’observations et des sondages réalisés en 2004
- Annexe B – Conductivité hydraulique
- Annexe C – Données piézométriques en 2004-2005
- Annexe D – Hydrologie de la rivière Jacques-Cartier
- Annexe E – Résultats de l’échantillonnage et de l’analyse chimique de l’eau souterraine
- Annexe F – Fichiers utilisés pour la réalisation du rapport

1. Introduction et mise en contexte

1.1 Localisation de la région d'étude

La municipalité de Shannon est localisée à environ 40 km au nord-ouest du centre de la Ville de Québec. La Planche 1 présente une carte montrant le contexte régional de la région d'étude, incluant la physiographie, la géologie des dépôts meubles ainsi que les limites des territoires et propriétés dans le secteur. Shannon est bordée à l'est par la Garnison Valcartier. On retrouve un peu plus à l'est la propriété de la Société Immobilière Valcartier Inc. (SIVI) (anciennement SNC TEC tel qu'indiqué sur les Planches 1 et 2) représentant un site industriel désaffecté ainsi que les terrains du centre de Recherche et Développement pour la Défense Canada Valcartier (RDDC Valcartier).

La topographie générale du secteur est assez plane mais le mont Rolland-Auger borde la partie sud de la région d'étude. La rivière Jacques-Cartier qui s'écoule vers le sud et traverse la partie ouest de la région d'étude est encaissée dans les dépôts meubles. La Garnison Valcartier borde le côté est de la région d'étude et on y avait retrouvé une contamination en TCE dissous dans l'eau souterraine en 2001 (Lefebvre et al., 2003). La région d'étude inclus donc la partie ouest de la Garnison Valcartier ainsi que la portion de Shannon située dans le prolongement du panache de TCE de la Garnison et se terminant à la rivière Jacques Cartier. Un suivi de la qualité d'eau des puits privés de résidents réalisé par le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (MDDEP) avait détecté la présence de TCE dans l'eau souterraine à Shannon dans cette région d'étude. Une caractérisation hydrogéologique et environnementale préliminaire de la région d'étude a été réalisée en 2004 par Sanexen-Amec (2005) pour le compte du Ministère de la Défense Nationale (MDN).

1.2 Historique

Suite à la découverte de trichloroéthène (TCE) dans le système d'alimentation en eau potable de la Garnison Valcartier et de RDDC Valcartier à l'automne 1997, le MDN a entrepris de caractériser la ressource en eau souterraine sur son territoire afin de mieux connaître les contextes géologique, hydrogéologique et hydrogéochimique de l'aquifère lui fournissant l'eau potable. En décembre 2000, la découverte de TCE dans l'eau provenant de puits d'alimentation privés à Shannon a indiqué l'ampleur probable de la contamination en TCE. En août 2001, le MDN a entrepris une campagne de caractérisation majeure afin de délimiter le panache de TCE dissous à l'intérieur des limites de son territoire, d'identifier et de définir les zones sources potentiellement responsables de la contamination et aussi de raffiner le niveau de connaissance de la géologie souterraine et de l'hydrogéologie du système aquifère dans le secteur Valcartier (Lefebvre et al., 2003). Le MDN s'est entendu avec la municipalité de Shannon pour que la Garnison Valcartier fournisse l'alimentation en eau à certains secteurs de la municipalité où un nouveau système d'aqueduc a été mis en place entre 2001 et 2006. Le MDN a mandaté Sanexen-Amec (2005) afin de réaliser une caractérisation hydrogéologique et environnementale préliminaire à Shannon en 2004.

1.3 Mandat de l'INRS-Eau, Terre et Environnement

Depuis 1997, le Centre Eau Terre Environnement de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS-ETE) fournit au MDN des avis scientifiques et techniques en matière d'hydrogéologie et au niveau de la compréhension de la contamination des eaux souterraines en TCE dissous dans le secteur Valcartier. L'INRS-ETE a notamment réalisé l'interprétation des données de la caractérisation réalisée par le MDN dans le secteur Valcartier en 2001 (Lefebvre et al., 2003; Lefebvre et al., 2004; Boutin et al., 2004). Avec le MDN, l'INRS-ETE a préparé un programme de caractérisation préliminaire dans le cadre des travaux entrepris à Shannon en 2004. Un programme final a été défini et réalisé par Sanexen-Amec (2005). L'INRS-ETE a eu le mandat de faire l'analyse et l'interprétation des données recueillies pour apporter des réponses concernant les trois principaux objectifs de la caractérisation : 1) délimiter l'étendue du panache de contamination en TCE dans l'eau souterraine à Shannon; 2) définir la nature du lien entre le panache de TCE et la rivière Jacques-Cartier; et 3) identifier les sources potentielles de la contamination en TCE retrouvée à Shannon.

1.4 Travaux de caractérisation réalisés à Shannon en 2004

Sanexen-Amec (2005) documente en détail les travaux de caractérisation réalisés pour le MDN à Shannon en 2004. Nous ne faisons ici qu'un résumé des travaux que cette firme a réalisés. La Planche 2 présente une carte de localisation des travaux réalisés à Shannon en 2004 tandis que le tableau 1.1 résume ces travaux ainsi que les données précédentes ayant servi à la présente étude. Toutes les données et les cartes sont géoréférencées par rapport au système de coordonnées UTM NAD 83, Zone 19. Trois types de travaux de caractérisation ont été réalisés : 1) des forages, 2) des sondages par enfoncement (*direct push*), et 3) l'échantillonnage de résurgences en bordure de la rivière Jacques-Cartier ou de l'eau souterraine émergente sous son lit. Les forages et les sondages ont été positionnés pour couvrir l'ensemble de la région d'étude et pour investiguer 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 MDDEP avait déjà identifié des concentrations plus importantes en TCE dans l'eau souterraine présente dans des puits résidentiels. Les sondages par enfoncement ont été localisés à des endroits complétant la couverture spatiale des puits d'observation, aux endroits plus contaminés ainsi qu'aux localisations où des puits d'observation ne pouvaient pas être mis en place avec du forage conventionnel. Les caractéristiques des puits d'observation et des sondages réalisés à Shannon en 2004 sont compilées à l'annexe A.

Les forages (53) ont été réalisés en partie pour faire l'échantillonnage de sol en continu (10 forages) de façon à bien définir la stratigraphie des dépôts meubles. Les forages sans échantillonnage de sol ont tout de même permis l'identification des matériaux grâce aux déblais de forage. Pour la caractérisation des dépôts meubles, deux forages ont été réalisés à une même localisation et deux puits d'observation ont été installés à deux élévations différentes dans chaque forage, pour un total de 99 puits d'observation. Ceci fait en sorte que quatre niveaux crépinés à des profondeurs variables sont disponibles à chaque localisation pour faire l'échantillonnage de l'eau souterraine dans le but de permettre la détermination de la présence et de la concentration en TCE (et autres produits) sur toute l'épaisseur de la nappe. Dans la majorité des localisations il y a ainsi eu deux puits d'observation installés dans l'unité supérieure de sable deltaïque ainsi que deux autres dans l'unité inférieure des diamictons (le contexte

hydrostratigraphique est décrit à la section 2.1). Cette approche générale a été adaptée en fonction de l'épaisseur totale et relative des unités interceptées à une localisation donnée. Cette adaptation aux épaisseurs locales a fait en sorte qu'une variété de longueurs de crépine a été utilisée pour les puits d'observation, soit 43 crépines de 1.5 m, 17 de 3 m, 38 de 4.5 m et 1 de 5 m. Le roc a aussi été caractérisé par l'installation de 5 puits d'observation à simple niveau. En plus de l'échantillonnage de l'eau souterraine, les puits d'observation ont permis la mesure des niveaux d'eau, afin de définir la piézométrie et les directions d'écoulement de l'eau souterraine, ainsi que la réalisation d'essais de perméabilité (*slug tests*) pour déterminer la conductivité hydraulique des unités perméables, c'est-à-dire le sable deltaïque, les diamictons et le roc.

Tableau 1.1 : Travaux réalisés à Shannon en 2004 et autres données utilisées
(Données tirées en partie de Sanexen-Amec, 2005)

Type de donnée	Source des données			
	Données Shannon 2004	Données Valcartier 2001	Données Puisatiers (MDDEP)	Suivi du MDDEP à Shannon
Nombre de forages / contrôle stratigraphique	53	35	8 (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, métrage)	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	-	-	-

* : Parmi les puits de la banque des puisatiers du MDDEP identifiés par Sanexen-Amec (2005), seulement une partie des puits a été utilisée pour aider à définir la topographie du socle rocheux aux endroits où aucun autre forage n'était disponible.

Des sondages par enfoncement (*direct push*) ont été réalisés à 25 localisations afin de préciser la distribution du panache de TCE en plan et en profondeur. Ce type de sondage permet l'échantillonnage relativement ponctuel (crépine de 1.125 m) de l'eau souterraine à plusieurs profondeurs à une localisation donnée sans nécessité l'installation de puits d'observation permanents. Ces sondages ont aussi permis la détermination de l'élévation du niveau d'eau à 57 endroits et la réalisation de 8 essais de perméabilité. L'intervalle d'échantillonnage lors des sondages par enfoncement a été en général de l'ordre de 3 m. Ces travaux ont donc permis la définition précise du panache et des concentrations en TCE.

Enfin, des travaux ont été réalisés en bordure de la rivière Jacques-Cartier à 5 localisations pour mesurer l'élévation des résurgences de la nappe d'eau souterraine et échantillonner l'eau pour déterminer si du TCE y était présent. De plus, cinq essais d'échantillonnage de l'eau faisant résurgence dans le lit de la rivière ont été réalisés à l'aide d'infiltromètres (*seepage meters*) mais ces essais ont été fructueux à seulement trois localisations, car deux des essais sont indiqués comme ayant un flux nul par Sanexen-Amec (2005). Aux localisations où des infiltromètres ont été installés, la différence de niveau d'eau dans le sable sous le lit de la rivière et le niveau d'eau de la rivière elle-même a été mesurée pour déterminer si l'eau souterraine émergeait directement dans la rivière.

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. Ainsi, la stratigraphie des dépôts meubles a aussi été définie à l'aide de données provenant de forages existants à la Garnison Valcartier ainsi que de puits répertoriés dans la région dans la base de données des puisatiers du MDDEP (Système d'information hydrogéologique) (tableau 1.1). Le contexte géologique a été défini sur la base de la carte des dépôts meubles régionale 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 continuité du panache de contamination en TCE entre Shannon et la Garnison Valcartier a été déterminée en intégrant des données du suivi environnemental réalisé entre 2001 et 2009 par le MDN dans les puits d'observation situés à proximité de la région d'étude aux données de la caractérisation de Shannon. Une vérification a aussi été faite entre l'étendue du panache définie sur la base de ces données et les résultats du suivi du MDDEP dans des puits résidentiels de Shannon.

Pour définir les conditions piézométriques, en plus des puits d'observation à Shannon, nous avons utilisé les niveaux d'eau mesurés dans les puits d'observation déjà existants de la Garnison Valcartier en 2004 par Sanexen-Amec (2005) ainsi que d'autres niveaux d'eau disponibles à la Garnison et le niveau de la rivière Jacques-Cartier. Le profil de la rivière Jacques-Cartier a été précisé grâce à des données du Centre d'expertise hydrique du Québec sur les zones inondables. Les conductivités hydrauliques déterminées par les essais de perméabilité réalisés à Shannon ont été comparées à celles obtenues à la Garnison Valcartier en 2001 (Lefebvre et al., 2003).

2. Analyse des données de caractérisation

2.1 Contexte hydrostratigraphique

Une unité hydrostratigraphique est une unité géologique ayant des propriétés hydrogéologiques similaires (Anderson et Woessner, 1992). Le contexte hydrostratigraphique du secteur Valcartier a été bien défini lors des travaux de caractérisation réalisés par le MDN en 2001 (Lefebvre et al., 2003). Comme pratiquement toutes les mêmes unités ont été retrouvées à Shannon, nous n'en ferons pas une description détaillée. Sanexen-Amec (2005) fait la description des matériaux rencontrés spécifiquement dans les forages à Shannon lors de la caractérisation de 2004.

La Planche 1 montre la distribution des unités géologiques (dépôts meubles) retrouvées à l'intérieur ou dans les environs de la région d'étude. Les unités jugées perméables (aquifères) sont les diamictons et les sables deltaïques tandis que les sédiments prodeltaïques et le silt glaciomarin sont considérés semi-perméables en partie à cause de leur discontinuité. Enfin, le till et le roc sont des unités peu perméables. Ces unités peuvent être décrites comme suit (de la base au sommet) :

- 1) Roc (R) – Le roc est formé par des gneiss granitiques d'âge précambrien, peu fracturés et peu altérés et formant une surface irrégulière;
- 2) Diamictons constitués de till (T) et de sédiments proglaciaires (Gx) – Dans la région d'étude, à cause de la difficulté de distinguer en forage le till des sédiments proglaciaires, on réfère à ces unités combinées en tant que « diamictons » (Ouellon et al., 2010). Le till de fond n'a été identifié formellement qu'à quelques endroits à Shannon à cause du faible taux de récupération des échantillons près du roc (Sanexen-Amec, 2005). À la Garrison Valcartier, le till de fond est constitué d'un diamicton très compact à matrice silto-sableuse dominante (Lefebvre et al., 2003). En plus de ne pas identifier de till à Shannon, on y a plutôt trouvé à 14 forages une couche avec des blocs au contact du roc (Sanexen-Amec, 2005) (sites identifiés à la Planche 6). Les sédiments proglaciaires (Gx) sont hétérogènes et composés principalement de sable fin à grossier avec des blocs et des proportions variables de silt et de gravier. Ce matériel 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;
- 3) Silt argileux glaciomarin (Ma) – Une unité de silt argileux gris d'origine glaciomarine est directement superposée aux diamictons et est surmontée par les sédiments deltaïques. Cette unité est peu épaisse par endroits et elle apparaît discontinue puisque sa présence n'a 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). À Shannon, cette unité joue un rôle important dans le confinement partiel de l'écoulement dans les diamictons sous-jacents;
- 4) Sédiments marins deltaïques (Md) – C'est une unité bien triée et stratifiée qui 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 ou les diamictons. 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;

- 5) Sédiments prodeltaïques (Mdp) – À l'est du secteur Valcartier, on retrouve des sédiments prodeltaïques caractérisés par des alternances de lits de silt, silt argileux et de sable silteux. 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. Cette unité joue un rôle hydraulique important à l'est du secteur Valcartier mais elle n'a pas été identifiée à Shannon bien que les faciès deltaïques fins aient été observés par endroits. Bien qu'elle ne soit pas présente à Shannon, cette unité est mentionnée pour mieux distinguer le contexte rencontré à Shannon par rapport à celui retrouvé dans le reste du secteur Valcartier;
- 6) Alluvions des terrasses fluviales (At) – C'est une mince unité (entre 0.5 et 5 m d'épaisseur) localisée dans la région 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. Cette unité n'a pu être distinguée de l'unité deltaïque sous-jacente lors des descriptions de forage dans la région d'étude à Shannon car il s'agit en bonne partie de sable deltaïque remanié qui n'est pas assez distinct en forage pour l'identifier. De plus, cette unité devrait avoir des propriétés hydrauliques très semblables à l'unité deltaïque, limitant ainsi l'intérêt de la distinguer et de la séparer de l'unité deltaïque.

2.1.1 Méthodologie

Dans le but de bien définir le contexte hydrostratigraphique de la région d'étude à Shannon, des efforts importants ont été dédiés à la définition de la distribution spatiale des unités géologiques. Pour ce faire, l'approche suivante a été suivie :

- a) Les descriptions de forages de Sanexen-Amec (2005) ainsi que de certains forages de la Garnison Valcartier ont été utilisés pour définir les intervalles d'élévation couverts par les différentes unités. Il faut noter que ces descriptions de forage documentent seulement les sédiments rencontrés dans les forages mais n'identifient pas les unités représentées par ces sédiments qu'il faut donc interpréter;
- b) Montage de 7 coupes stratigraphiques préliminaires pour comprendre la géométrie et la distribution des unités géologiques dans la région d'étude (Planche 3). Trois des 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 forages réalisés au cours de la caractérisation de 2004 à Shannon sont intégrés dans les coupes stratigraphiques (Planche 4). Bien que les sondages par enfoncement ne soient pas utiles pour définir la stratigraphie, ils ont aussi été intégrés aux coupes (sauf 5 sondages) dans le but de les utiliser pour la représentation de la piézométrie en coupe (Planche 14) et de la distribution du TCE (Planche 17) 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. Ces coupes ont donc servi de référence pour l'interprétation des unités dans les autres coupes;
- c) Production de cartes d'élévation de la surface ainsi que de l'épaisseur des unités

géologiques, incluant la surface du sol et la surface du roc (Planches 5 à 8). Le détail de l'approche utilisée pour la génération de ces cartes et donné un peu plus loin. Toutes les surfaces des unités sont cohérentes entre elles et il n'y a pas d'intersection des surfaces des unités. Suite aux résultats de la cartographie de l'épaisseur des unités, les coupes stratigraphiques ont été ajustées pour produire des versions finales qui sont cohérentes par rapport aux cartes d'épaisseur;

- d) Montage d'un modèle géologique en trois dimensions dans le logiciel gOcad (Earth Decision Sciences, 2001) par l'intégration des surfaces des unités géologiques (Planche 9). Ce modèle permet d'avoir une représentation continue et complète de la distribution des unités en 3D. La surface libre qui constitue la surface de la nappe dans l'unité de sable deltaïque a aussi été insérée dans le modèle 3D pour définir la section d'écoulement dans cette unité. Enfin, les concentrations en TCE déterminées aux puits d'observation et aux sondages par enfoncement ont aussi été intégrées dans le modèle 3D pour mieux visualiser leur distribution spatiale. La vallée de la rivière Jacques-Cartier est aussi montrée dans le modèle 3D pour mieux établir le lien entre la rivière et les différentes unités géologiques (Planche 18).

Les cartes d'élévation de la surface et de l'épaisseur des unités sont des représentations agrandies des mêmes cartes produites par Ouellon et al. (2010) pour tout le secteur Valcartier. Les cartes de la région d'étude à Shannon utilisent donc tous les mêmes points de contrôle que ceux utilisés pour la production des cartes plus régionales par Ouellon et al. (2010). Ceci permet d'assurer la cohérence des cartes aux niveaux local et régional. La stratigraphie des puits d'observation installés par Sanexen-Amec (2005) est compilée à l'annexe A. Les données stratigraphiques utilisées pour la réalisation du présent rapport sont compilées dans les annexes électroniques du rapport de Ouellon et al. (2010).

L'interpolation a été réalisée par krigeage ordinaire (sans enlever la tendance linéaire) avec le logiciel Surfer (Golden Software Inc., 1999) à l'aide d'un variogramme modélisé qui s'ajuste à chacune des séries de données à interpoler. Pour toutes les unités, l'approche utilisée a été d'interpoler les épaisseurs de sédiments et d'obtenir ensuite l'élévation de la surface de l'unité en ajoutant son épaisseur à l'élévation de l'unité sous-jacente. Des vérifications ont été faites pour s'assurer que les unités ne dépassaient pas l'élévation de la surface du sol. La séquence suivante a été suivie pour dériver les cartes :

- a) Élévation de la surface du sol (Planche 8) : cette carte a été produite à l'aide 1) des courbes topographiques aux 10 m de la surface du sol tirées de cartes topographiques au 1 : 50 000 (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 région d'étude (Shannon et Garnison Valcartier) documentés dans Sanexen-Amec (2005) et Ouellon et al. (2010) 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;
- b) Élévation de la surface du roc et épaisseur totale de sédiments (Planche 5) : la carte d'épaisseur totale des dépôts meubles a été obtenue en interpolant les données de forages sur la profondeur au roc 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 a ensuite été obtenue par différence entre la topographie de la surface du sol et la profondeur au roc;

- c) Épaisseur et élévation de la surface de l'unité de diamictons (Planche 6) : les points de contrôle pour générer la carte d'épaisseur de l'unité de diamictons proviennent des forages de la caractérisation de 2004 à Shannon et de ceux disponibles à la Garnison Valcartier. Tel que mentionné précédemment, l'unité de diamictons intègre les tills et les sédiments proglaciaires. Une carte d'épaisseur des diamictons était préférable à une carte d'élévation de sa surface 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 des diamictons a tout de même dû être corrigée par rapport à l'épaisseur totale de sédiments (Planche 5) pour enlever les endroits où l'épaisseur interpolée des diamictons 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 région d'étude. La carte d'élévation de la surface de l'unité des diamictons a ensuite été dérivée par l'addition du maillage de son épaisseur corrigée au maillage de l'élévation de la surface du roc (Planche 5);
- d) Épaisseur et élévation de la surface de l'unité de silt glaciomarin (Planche 7) : 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 aussi ceux disponibles à la Garnison Valcartier. Tout comme pour les diamictons, 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 n'a pas été observée dans plusieurs forages réalisés dans la région d'étude. 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 des diamictons (Planche 6) qui est sous-jacente à l'unité glaciomarine. Cette élévation a finalement été corrigée par rapport à l'élévation du sol, entre autre pour tenir compte de l'effet de la vallée de la rivière Jacques-Cartier;
- e) Épaisseur de l'unité de sable deltaïque (Planche 8) : comme l'unité de sable deltaïque est l'unité sommitale de toute la séquence sédimentaire (si 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. Ouellon et al. (2010) ont aussi dérivé des cartes d'élévation et d'épaisseur des unités en-dessous et au-dessus des silts prodeltaïques mais ces sédiments ne sont pas présents dans la région d'étude.

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 région d'étude, i.e. les élévations et les épaisseurs montrées dans les cartes correspondent aux valeurs des forages à ces localisations dans les cartes (Planches 5 à 8). 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.

La disponibilité des cartes de surface des unités sous forme électronique a permis le montage relativement rapide d'un modèle en trois dimensions de la distribution des unités sédimentaires dans la région d'étude de Shannon (Planche 9). Le logiciel gOcad (Earth Decision Sciences, 2001) qui a été utilisé pour monter le modèle géologique 3D a été développé spécifiquement à cette fin et il offre les capacités requises pour le développement et la représentation graphique de modèles 3D. 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. Une fois qu'un tel modèle est disponible, des coupes stratigraphiques dans toutes les directions peuvent être générées pour répondre à différentes questions. De plus, une vidéo d'une animation du modèle géologique 3D a été générée pour illustrer la distribution de la stratigraphie : une coupe verticale ouest-est est montrée en se déplaçant du nord vers le sud de la région d'étude (Annexe F). La surface libre (Planche 11) délimitant les sédiments non saturés en eau dans l'aquifère des sables deltaïques a aussi été intégrée dans le modèle géologique 3D. La définition de la surface libre est décrite à la section 2.2.3. 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 18) (voir section 2.4 pour une discussion de ces données).

2.1.2 Contexte hydrostratigraphique à partir des coupes géologiques

La Planche 3 montre la localisation des sept coupes stratigraphiques qui sont présentées sur la Planche 4. 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 (l'écoulement est traité plus en détail à la section 2.2.3). 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 celles-ci. La position des sondages par enfoncement est aussi montrée sur ces mêmes coupes lorsqu'elles sont utilisées pour montrer la distribution du TCE dans l'eau souterraine en profondeur (Section 2.4.3 et Planche 17).

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 des diamictons mais celle-ci forme tout de même des monticules qui ne coïncident pas nécessairement avec la position des dépressions. Ces monticules de forte épaisseur de diamictons 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 endroit 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 lorsque l'épaisseur de cette unité est faible. 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 amincissement de l'unité deltaïque au sud aux abords du Mont Rolland-Auger (plus loin au sud des coupes transversales E-E', F-F' et à la limite sud de la coupe transversale G-G'). 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. Les cartes présentées dans la section suivante (2.1.3) montrent que d'autres unités ont aussi été érodées par endroits par la rivière Jacques-Cartier.

La distribution des unités géologiques montrée sur les coupes stratigraphiques de la Planche 4 a des incidences importantes sur l'écoulement de l'eau souterraine dans la région d'étude. Ces effets sur l'écoulement seront mis en évidence par les coupes piézométriques (Planche 14) à la section 2.2.3 mais nous allons en discuter ici de façon générale. D'abord, rappelons que les unités aquifères dans la région d'étude sont les unités deltaïque et des diamictons alors que l'unité de silt glaciomarin, lorsque présente, joue un rôle d'unité semi-confinante sur l'écoulement dans l'unité des diamictons. 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 2.2.2). Les coupes de la Planche 4 montrent d'abord que la section d'écoulement est très variable, tant dans l'unité des diamictons 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 des diamictons engendre des changements correspondants dans l'épaisseur saturée de l'unité deltaïque. Cette variabilité dans la section d'écoulement dans les unités des diamictons et deltaïque est aussi apparente dans les coupes transversales D-D' à G-G' qui vont de l'amont de la région 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 région d'étude. Les niveaux de la surface libre, surtout dans les coupes E-E', F-F' et G-G', 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 région 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 des diamictons pourrait aussi être drainée par la présence de la rivière. Nous reviendrons à cette question à la section 2.2.3 en discutant de la Planche 14 ainsi que dans la discussion présentée à la section 3.3.

2.1.3 Distribution et modèle 3D des unités hydrostratigraphiques

Les Planches 5 à 8 présentent les cartes de l'élévation et de l'épaisseur des unités géologiques qui ont été générées en suivant la méthodologie décrite à la section 2.1.1. Ces cartes montrent la distribution des sédiments qui ont été présentés en coupes et décrits dans la section précédente. 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 5 montre l'élévation de la surface du roc et l'épaisseur totale des sédiments dans la région 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; Ouellon et al., 2010). En fait, dans la région d'étude, la vallée enfouie est plus profonde (sous 120 m) que sous la partie ouest de la Garnison Valcartier (sous 135 m), 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 région d'étude. Le haut topographique identifié à la limite sud-est de la région 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 région 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 région 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 région d'étude où la surface du roc remonte également. Dans la partie ouest de la région 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 6 illustre l'épaisseur et l'élévation de la surface de l'unité des diamictons, 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 de diamictons est encore plus irrégulière que la surface du roc, cette irrégularité s'expliquant par le style de mise en place de l'unité (amas proglaciaires). Cependant, la surface de l'unité des diamictons présente encore la morphologie d'une vallée enfouie au centre de la région d'étude. La dépression à la surface des diamictons est par contre séparée en deux « bassins », l'une au centre de la région d'étude et l'autre dans la partie est du côté de la Garnison Valcartier. La surface de l'unité des diamictons montre aussi des remontées au nord ainsi qu'au sud de la région d'étude qui sont contrôlées par la topographie de la surface du roc (Planche 5). Au niveau de son épaisseur, il y a des accumulations plus importantes de diamictons à la marge nord de la vallée présente dans la surface du roc (Planche 5), à peu près au centre de la région d'étude, ainsi que dans sa partie sud-ouest. L'épaisseur maximale de diamictons atteint plus de 20 m localement, mais l'épaisseur moyenne de cette unité est généralement plus près de 10 m au centre et au sud-ouest de la région d'étude. L'effet de l'érosion des diamictons par la rivière Jacques-Cartier est apparent dans la carte de son épaisseur dans la partie sud-ouest de la région d'étude. À cet endroit la rivière est donc directement en contact avec les diamictons. Enfin, il y a absence de diamictons 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 7 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 diamictons (Planche 6) parce que l'unité de silt glaciomarin est peu épaisse et ne change donc pas significativement la morphologie de la surface laissée en place suite au dépôt des diamictons. 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 région 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 région d'étude ainsi qu'au sud où la surface des diamictons 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 diamictons. L'extension latérale 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 8 présente l'épaisseur de l'unité de sable deltaïque et l'élévation de la surface du sol. Dans la région d'étude, la surface du sol est d'altitude assez uniforme (± 168 m) et sa surface est 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 des diamictons sous-jacente. Ainsi, la répartition de l'épaisseur de sédiments deltaïques (Planche 8) est similaire à la surface du silt glaciomarin (Planche 7). Au centre de la région d'étude, il y a une restriction importante dans l'épaisseur totale et l'épaisseur saturée 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 deltaïques. 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 (berge) de la rivière Jacques-Cartier. Les sédiments deltaïques sont absents de la partie sud de la région d'étude où la surface de l'unité des diamictons et du roc est élevée. Il y a aussi une épaisseur restreinte de sables deltaïques dans la partie nord de la région d'étude, encore une fois en raison de la remontée de la surface du roc et des diamictons.

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 région d'étude (Planche 9). 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 région d'étude, vers le nord-ouest de la région d'étude. 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, où se retrouve la très grande majorité de la contamination en TCE (section 2.4.3). On ne retrouve pas l'unité deltaïque dans la partie sud et sud-est de la région d'étude. L'épaisseur saturée est aussi faible au sud-ouest et la nappe se retrouve dans les diamictons dans ce secteur. La section d'écoulement dans les sédiments deltaïques est importante à l'est (Garnison) et elle est partiellement « obstruée » par le monticule de diamictons au centre de la région d'étude. Le silt glaciomarin est absent de la partie nord-est ainsi que de la partie sud de la région d'étude et le

lien hydraulique entre les unités deltaïques et des diamictons 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 diamictons, tandis qu'au centre de la région d'étude la rivière est en contact avec les sédiments deltaïques. Compte tenu du fait que les matériaux des diamictons et des sédiments deltaïques sont perméables (section 2.2.2), la morphologie des unités telle qu'illustrée par le modèle géologique 3D exerce un contrôle important sur les directions d'écoulement de l'eau souterraine dans la région d'étude (section 2.2.3), ce qui sera discuté plus loin. Nous verrons donc plus loin à la section 2.4 que ces conditions géologiques et d'écoulement expliquent bien la distribution du TCE dissous observée dans la région d'étude. La compréhension du contexte hydrostratigraphique s'avère donc essentielle à l'explication de la contamination en TCE dissous dans l'eau souterraine dans la région d'étude.

2.2 Propriétés hydrauliques et écoulement de l'eau souterraine

2.2.1 Méthodologie

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 au-dessus du niveau d'eau 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 d'unité 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 (Tableau 2.1).

Tableau 2.1 : Types de réponses des essais de perméabilité à Shannon et méthodes d'interprétation utilisée pour ce type de réponse

Réponse de l'essai de perméabilité	Unité géologique	Nombre*
Log-linéaire (Bouwer & Rice, 1976)	Deltaïque	17 (4)
	Diamictons	36 (1)
	Roc	4
	Unités mixtes	4 (1)
	<i>Total</i>	<i>61</i>
Semi amortie (Butler & Garnet, 2000)	Deltaïque	2 (1)
	Diamictons	4
	<i>Total</i>	<i>6</i>
Oscillatoire (Uffink, 1984)	Deltaïque	30 (1)
	Diamictons	2
	<i>Total</i>	<i>32</i>
Total	Deltaïque	49
	Diamictons	42
	Roc	4
	Unités mixtes	4
	<i>Total</i>	<i>99</i>

* : Le nombre entre parenthèse réfère aux essais réalisés lors des sondages par enfoncement (8), parmi le nombre total d'essais pour l'unité et le type de réponse.

Les réponses oscillatoires (*underdamped*) ont été rencontrées dans environ 32% des essais. La réponse log-linéaire (*overdamped*) a été obtenue dans 62% des tests tandis que la réponse semi-oscillatoire (*critically damped*) a été rencontrée dans 6% 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 2.1 résume les types de réponses obtenus dans les différentes formations testées. L'assignation des unités géologiques aux intervalles crépinés dans le tableau 2.1 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 B). 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 2.1 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 d'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 B présente les données sur la conductivité hydraulique.

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 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 le long de chaque isopièze.

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 (deltaïque et diamictons), de même que moindrement 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, ainsi que 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 C.

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) de la façon suivante : krigeage ordinaire (sans enlever la tendance linéaire), omnidirectionnel et linéaire avec un modèle de variogramme linéaire sans effet de pépité. La Planche 11 présente la carte de l'élévation de la surface libre interpolée à partir des mesures de niveau d'eau dans les puits d'observation ayant des intervalles crépinés dans la partie supérieure de la nappe libre dans l'unité deltaïque. 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 11). La Planche 12 montre les cartes piézométriques interpolées pour l'unité des diamictons 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 région 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 la SIVI, RDDC Valcartier et Garnison Valcartier). La présence de silt glaciomarin

dans la région d'étude limite le contact hydraulique entre les unités deltaïque et des diamictons, ce qui impose les conditions semi-captives dans les diamictons. 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 région d'étude (Planche 13). 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 diamictons) 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 crépines. Pour le calcul du gradient vertical entre les unités deltaïques et des diamictons, ce sont les niveaux d'eau à la base de l'unité deltaïque et au sommet de l'unité des diamictons qui ont été soustraits et divisés par la distance entre le milieu des intervalles crépines. 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 14). 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.

2.2.2 Propriétés hydrauliques des unités

Le tableau 2.2 présente les valeurs moyennes et écarts-types du logarithme des conductivités hydrauliques K (m/s) mesurées dans les unités deltaïque, des diamictons et au roc pour la région d'étude de Shannon en 2004 (Sanexen-Amec, 2005) ainsi que dans le secteur Valcartier en 2001 (Lefebvre et al., 2003).

Tableau 2.2 : Compilation des résultats des essais de perméabilité à Shannon
(N réfère au nombre de mesures)

Données	Unité	N	Conductivité hydraulique moyenne de $\log(K)$ (m/s)	Écart type de $\log(K)$ (m/s)
Shannon 2004	Deltaïque	43	-3.86 (1.4×10^{-4})	0.49
	Diamictons	41	-4.58 (2.6×10^{-5})	0.56
	Roc	4	-5.12 (5.6×10^{-6})	0.82
Valcartier 2001	Deltaïque	199	-3.77 (1.7×10^{-4})	0.61
	Diamictons	16	-4.41 (3.9×10^{-5})	0.60
Total	Deltaïque	242	-3.78 (1.6×10^{-4})	0.59
	Diamictons	57	-4.53 (2.9×10^{-5})	0.57
	Roc	4	-5.12 (5.6×10^{-6})	0.82

Le tableau 2.2 montre que les valeurs moyennes mesurées à Shannon sont très similaires à celles obtenues dans le secteur Valcartier. Pourtant, Boutin et al. (2004) et Ouellon et al. (2008b) 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, est assez semblable aussi pour Shannon et le reste du secteur Valcartier. À Shannon, la valeur

moyenne de K est de 1.4×10^{-4} m/s pour l'unité deltaïque, de 2.6×10^{-5} m/s pour l'unité des diamictons et de 5.6×10^{-6} 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 K dans le roc est normale pour un matériel dont la perméabilité dépend de la fracturation.

Nous avons voulu explorer plus à fond la similarité entre les mesures de conductivité hydraulique à Shannon et dans le reste du secteur Valcartier. Pour ce faire, les mesures de K obtenues pour différents types de matériaux ont été regroupées en suivant le concept « d'hydrofaciès » développé pour le secteur Valcartier par Ouellon et al. (2008b). Ce concept a été développé pour cartographier la conductivité hydraulique en 3D dans l'ensemble du secteur Valcartier en utilisant les descriptions de forage disponibles. Ces données sont beaucoup plus abondantes que les mesures de K et elles permettent de beaucoup mieux définir la distribution de K et l'hétérogénéité du système aquifère. Cette information a été utilisée par Ouellon et al. (2010) pour mieux modéliser numériquement l'écoulement dans le secteur Valcartier. Cinq hydrofaciès regroupant des matériaux différents ont été ainsi définis pour le secteur Valcartier :

Hydrofaciès 1 : Argiles, silts et silts sableux;

Hydrofaciès 2 : Sables silteux;

Hydrofaciès 3 : Sables fins à moyens;

Hydrofaciès 4 : Sables moyens à grossier, sable graveleux, gravier sableux, gravier;

Hydrofaciès 5 : Diamictons – unités proglaciaires et tills non différenciés.

Les quatre premiers hydrofaciès représentent des matériaux différents retrouvés dans les sédiments deltaïques alors que l'hydrofaciès 5 représente les matériaux présents dans l'unité des diamictons. Le tableau 2.3 et la Planche 10 montrent la conductivité hydraulique mesurée pour les cinq hydrofaciès à Shannon, dans le secteur Valcartier et pour la combinaison de ces secteurs. Les résultats indiquent d'abord que pour l'unité deltaïque il y a une augmentation systématique de K de l'hydrofaciès de matériaux fins (1) à celui constitué de matériaux plus grossiers (4). Ensuite, ces résultats montrent que les valeurs de K mesurées à Shannon et à Valcartier sont cohérentes entre elles pour un hydrofaciès donné. Nous en concluons que les valeurs de K mesurées par les essais de perméabilité à Shannon sont cohérentes par rapport à celles obtenues du secteur Valcartier et qu'elles sont valides compte tenu de l'utilisation de procédures similaires et acceptées pour leur réalisation et leur interprétation.

Tableau 2.3 : Nombre de mesures et valeur médiane de $\log(K)$ (m/s) des hydrofaciès retrouvés dans les sédiments deltaïques et les diamictons à Shannon et dans le secteur Valcartier

Hydrofaciès	Shannon 2004		Valcartier 2001		Total	
	N	Médiane de $\log(K)$ (m/s)	N	Médiane de $\log(K)$ (m/s)	N	Médiane de $\log(K)$ (m/s)
1	5	1.7×10^{-5}	15	2.3×10^{-5}	20	2.1×10^{-5}
2	3	1.8×10^{-4}	43	6.6×10^{-5}	46	6.7×10^{-5}
3	20	2.2×10^{-4}	71	2.5×10^{-4}	91	2.5×10^{-4}
4	15	2.6×10^{-4}	70	5.3×10^{-4}	85	5.0×10^{-4}
5	41	1.7×10^{-5}	16	2.5×10^{-5}	57	1.9×10^{-5}

Note: les hydrofaciès 1 à 4 sont dans l'unité deltaïque et l'hydrofaciès 5 dans les diamictons.

2.2.3 Piézométrie et écoulement de l'eau souterraine

Tel que mentionné dans la section 2.2.1 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 des diamictons qui est partiellement confinée par la présence discontinue de l'unité de silt glaciomarin entre les unités deltaïque et de diamictons. La piézométrie et les directions d'écoulement sont 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 des diamictons 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 distinctes comme pour la partie est du secteur Valcartier où il y a 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 des diamictons qu'une deuxième nappe semi-captive est identifiée.

La Planche 11 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 le nombre important de 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 région d'étude, il y a une composante significative de l'écoulement provenant du Mont Rolland-Auger. Ce type de comportement est aussi observé plus à l'est au sud de la SIVI (Lefebvre et al., 2003) mais il n'avait pas été reconnu auparavant dans la région d'étude à Shannon à cause du peu de données piézométriques alors disponibles. La Planche 11 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 5) qui sont tous contrôlés par la forme de la vallée enfouie. Il y a jusqu'à plus de 40 m de sédiments saturés dans le centre de la région d'étude, avec des valeurs de généralement plus de 20 m saturé dans la partie centrale de la vallée enfouie.

La Planche 12 montre la piézométrie et les directions générales d'écoulement de l'eau souterraine dans l'unité des diamictons. 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 points de contrôle pour l'unité des diamictons pour permettre de définir une telle composante. Il n'y a pas assez d'information pour définir l'écoulement dans les diamictons du côté ouest de la rivière Jacques-Cartier. La Planche 12 montre aussi la piézométrie du roc qui est peu définie à partir de 5 puits seulement dans la

région d'étude. Cependant, pour obtenir le patron d'écoulement au roc d'autres puits hors de la région 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 aux diamictons.

Puisque l'unité de silt glaciomarin confine partiellement les diamictons de l'unité deltaïque sus-jacente, des cartes de gradients hydrauliques verticaux ont été produites pour aider à comprendre les échanges entre les unités des diamictons et deltaïque. La Planche 13 montre ainsi trois cartes de gradients hydrauliques verticaux, dont deux cartes des gradients hydrauliques verticaux à l'intérieur des unités deltaïque et des diamictons et une carte des gradients entre ces unités. Dans l'unité deltaïque, les gradients verticaux sont très peu prononcés, sauf à deux localisations (PO-SH-33/PO-SH-34 et PO-SH-44) où de très forts gradients verticaux sont observés (vers le haut dans un cas et le bas dans l'autre). Nous avons un doute au sujet de la validité de ces forts gradients car on s'attendrait à très peu de gradients verticaux 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 des diamictons, la signification des patrons des gradients verticaux observés est très difficile à déterminer. Nous avons encore un doute 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 région 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 région d'étude où le silt glaciomarin est absent. Au niveau des gradients verticaux entre les unités deltaïque et des diamictons, il est encore une fois normal d'avoir un gradient indiquant un écoulement vers le bas au sud de la région 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 des diamictons et deltaïque et les conditions qui engendrent des gradients verticaux. La Planche 14 montre ces coupes qui sont tracées dans le sens de l'écoulement de l'eau souterraine (leur localisation est montrée sur la même planche). Sur ces coupes, les isopièzes sont superposés 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 des diamictons est apparente. En effet, on note des charges hydrauliques distinctes (près de 1 m de différence) dans les unités deltaïques et des diamictons à certains endroits où le silt glaciomarin est présent. Ces importants gradients hydrauliques verticaux impliquent une tendance à l'écoulement vers le haut, des diamictons au deltaïque. De telles conditions sont favorables pour limiter la migration du TCE présent dans l'unité deltaïque vers l'unité des diamictons (voir Planche 17). Sur la coupe A-A', on observe aussi une augmentation des gradients hydrauliques horizontaux dans l'unité des diamictons 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 deltaïque. 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 hydrauliques sont très distinctes dans les unités deltaïques et des diamictons 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 bien une tendance à l'écoulement vers le haut, des diamictons au deltaïque, mais il est plus local (surtout autour de PO-SH-27). Les changements de gradients hydrauliques dans l'unité des diamictons ne sont pas aussi cohérents que sur la coupe A-A' lorsque la 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 les diamictons qui doivent donc 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 diamictons)

2.3 Rivière Jacques-Cartier

2.3.1 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 km². 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 municipalités riveraines du sud vers le nord: Donnacona (5 900 habitants), 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° 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^{er} juin) et 1998 (17 juin). Les débits sont alors en moyenne de l'ordre de 425 m³/s. Les débits maximums ont eu lieu en 1999 (568 m³/s) et 2002 (508 m³/s). Le débit maximal printanier de 2004 a été établi à 231 m³/s. C'est le plus faible débit maximal de 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 m³/s. Les débits minimums survenus à d'autres périodes ont été observés en août 1998 avec 23.4 m³/s et en septembre 2002 avec 17.4 m³/s.

Les débits journaliers de la rivière proviennent de la station hydrométrique 050801, situé au niveau du pont de la rue Gosford (Planche 15C), 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 2 010 km². 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, à 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.

2.3.2 Hydrologie

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 McMahan, 1990 ; Sophocleous, 2002; Gray, 1972). Généralement, dans les régions tempérées, comme au Québec, 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 seulement à des points isolés (Rasmussen et Rouleau, 2003). Son principal désavantage est qu'elle est une méthode empirique dont les paramètres ne peuvent être mesurés (Nathan et McMahan, 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) est une méthode automatique qui ne nécessite pas de jugement et d'expérience de l'utilisateur. Cette méthode 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 McMahan (1990). L'amélioration a lieu au niveau des périodes de récession en permettant une diminution du débit de base, alors que Nathan et McMahan (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 :

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

Où les variables sont définies comme suit :

$Q_b(i)$: Débit de base au temps i (L^3/T);

α : Constante du filtre;

$Q_b(i-1)$: Débit de base au temps $i-1$ (L^3/T);

$Q(i)$: Débit total dans la rivière au temps i (L^3/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 (α) de 0.925 a été appliquée. La valeur α s'ajuste manuellement par essai et erreur, mais d'après Nathan et McMahon (1990), les valeurs de la constante du filtre (α) optimales se situent entre 0.9 et 0.95. Selon Chapman (1991), la valeur de α 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 (α), 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 D.

La Planche 15A 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. Les données de débits (m^3/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^2) (voir annexe D 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 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. Ceci 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 années aurait permis de mieux estimer les 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 de réalisation des travaux de terrain.

La relation entre l'aquifère et le cours d'eau peut aussi être établie par le suivi de l'élévation 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 des diamictons, le silt glaciomarin étant absent à cet endroit (Planche 15C 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 leur interaction. 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 aussi présentés à l'annexe D.

La Planche 15B 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 indiquant 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 15) 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.

2.3.3 Résurgences

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, 5 résurgences ont été répertoriées et échantillonnées au niveau de la ville de Shannon (Planche 15C). La présence de résurgences indique qu'au moins une partie de l'eau souterraine provenant de la nappe libre dans l'aquifère deltaïque se jette dans la rivière. Parmi les 5 résurgences échantillonnées, une seule contenait de TCE avec en 2004 une valeur de 42 µg/L, ce qui indique que le panache de TCE peut émerger dans la rivière Jacques-Cartier.

2.3.4 Flux de filtration en fond de rivière

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 PEIWRB (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 meter*) est utilisé. Cet appareil est constitué d'un cylindre ouvert d'un seul côté et ayant 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 vice-versa. 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^3). 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^3), 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).

Trois emplacements ont été jaugés avec succès dans la rivière Jacques-Cartier (Planche 15C). Sur les trois emplacements jaugés dans la rivière Jacques-Cartier, un seul contenait de TCE à une valeur de 3 µg/L. Les mesures de flux entrant obtenues sont de l'ordre de 4×10^{-9} m/s à 3×10^{-7} m/s (tableau 2.4). 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.

Tableau 2.4 : Mesure aux infiltromètres (Sanexen-Amec, 2005)

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

2.3.5 Mini-piézomètres

La méthodologie utilisant les mini-piézomètres en fond de rivière est également tirée des ouvrages de Rasmussen et Rouleau (2003) et de PEIWRB (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 mesurée. Un niveau d'eau supérieur à la surface de la rivière dans le mini-piézomètre indique un gradient hydraulique correspondant à un écoulement de l'eau souterraine vers l'eau de surface. Un niveau d'eau inférieur dans le mini-piézomètre indique un gradient hydraulique correspondant à un écoulement de l'eau de surface vers l'eau souterraine.

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 15C). 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 2.4. 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 :

$$q = -K \cdot i$$

$$K = -q/i$$

Où :

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 8.16×10^{-8} m/s à 2.46×10^{-6} m/s (tableau 2.4), 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.

2.4 Distribution du TCE dissous

2.4.1 Méthodologie

La délimitation du panache de TCE dissous dans l'eau souterraine dans la région 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 région 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 installés à différentes profondeurs dans les aquifères (en général couvrant 4 intervalles de profondeur avec deux puits à double niveaux à une même localisation);
2. 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 en 2004 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 (MDDEP, 1994). L'annexe E documente les résultats de l'échantillonnage et de l'analyse chimique de l'eau souterraine provenant de la caractérisation réalisée par Sanexen-Amec (2005). Des données sur les concentrations en TCE, DCE et CV à Shannon et dans le secteur Valcartier pour d'autres périodes que celle de la caractérisation de Sanexen-Amec (2005) sont aussi disponibles à l'annexe F. Il 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 peuvent représenter 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 la profondeur désignée et 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 région d'étude à Shannon de même qu'à des puits d'observation à la Garnison Valcartier (Planche 16). La carte produite à Shannon est en fait une version agrandie de celle produite par Ouellon et al. (2010) pour tout le secteur Valcartier (Planche 19). Les zones de concentration en TCE utilisées sont 1) de la limite de détection, 0.1 µg/L, 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 a été utilisée à Shannon en tant que critère par les différents intervenants dans le dossier. Cette concentration représente aussi la recommandation de Santé Canada (2005) pour la qualité de l'eau potable pour le TCE et c'est aussi la norme utilisée par l'US EPA pour le TCE. La valeur de 50 µg/L est la norme pour l'eau potable au Québec (MDDEP, 2001). Enfin, 590 µg/L représente le critère de protection de la vie aquatique pour l'eau de surface (toxicité aiguë) (MDDEP, 2004). Les zones établies pour le panache représentent les secteurs où les concentrations maximales observées sont généralement à l'intérieur de la plage des concentrations 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 aussi utilisées pour illustrer les concentrations en TCE observées en profondeur (Planche 17) en utilisant les mêmes zones de concentration que pour la carte du panache. Tel que mentionné, on pourrait s'attendre à avoir un effet de dilution potentiel et des concentrations moindres pour de longues crépines par rapport à des crépines plus courtes. Dans le cas de la caractérisation à Shannon, les résultats obtenus par les sondages pourraient se révéler avoir des concentrations plus élevées que ceux des puits d'observation. En combinant les concentrations obtenues des puits d'observation et des sondages par enfoncement sur les coupes, il est apparu qu'il n'y avait pas d'évidence de différence importante de concentration entre les puits d'observation et les sondages par enfoncement. Les résultats de ces deux modes d'échantillonnage sont en fait très cohérents. Peut-être que ces résultats indiquent que les longueurs de crépines des sondages par enfoncement (1.125 m) n'étaient pas suffisamment plus courtes que celles des puits d'observation (la plupart entre 3 et 4.5 m) pour générer un effet de dilution notable. L'absence d'effet de dilution significatif est aussi peut-être relié au fait que du TCE dissous se retrouve sur pratiquement toute l'épaisseur de l'aquifère deltaïque, comme ce sera illustré à la section 2.4.3. Les longues crépines des puits

d'observation sont ainsi moins susceptibles de chevaucher des intervalles à l'intérieur desquels il y aurait de l'eau souterraine avec et sans TCE. Considérant cette situation, les concentrations obtenues des échantillons provenant des puits d'observation et des sondages par enfoncement ont été combinées pour définir les zones de concentration du TCE en profondeur dans les coupes.

2.4.2 Distribution en plan de la contamination en TCE

Le panache de la contamination en TCE dissous dans la région d'étude est illustré à la Planche 16 avec les zones de concentration 1) de la limite de détection, 0.1 µg/L, à 5 µg/L; 2) de 5 à 50 µg/L; 3) de 50 à 590 µg/L; et 4) de plus de 590 µg/L. Cette carte combine les concentrations obtenues des puits d'observation et des sondages par enfoncement (*direct push*). Cette carte est limitée au sud de la région d'étude par les abords du Mont Rolland-Auger où il n'y a presque plus de dépôts meubles selon la carte géologique (Planche 1; 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 µg/L. Dans le panache principal, on retrouve deux autres zones de concentration (5 à 50; 50 à 590). 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 n'est pas présentée en plan et elle est restreinte en profondeur. Selon le critère de continuité dans le temps utilisé par Ouellon et al. (2010) pour tracer les zones de concentrations, cette zone excédant 590 µg/L n'a pas été représentée en plan parce que les concentrations de cet ordre n'ont été observées qu'en 2004, alors que pour les suivis subséquents les concentrations étaient moindres. Les fortes concentrations en TCE excédant 590 µg/L qui ont été observées uniquement en 2004 se retrouvent à l'intérieur d'un secteur défini par la limite ouest de la garnison et le « triangle » des rues King, Jacques-Cartier et de la Station à Shannon. Enfin, le panache est interprété continu en plan jusqu'à la rivière Jacques-Cartier à un niveau de concentration entre 50 et 590 µg/L. Cependant, les concentrations dans les résurgences échantillonnées en bordure de la rivière n'avaient que 3 et 42 µg/L de TCE, ce qui est cohérent avec les concentrations observées en coupe à proximité de la rivière (Coupes A-A' et B-B', Planche 17). La distribution du panache présentée à la Planche 16 est généralement cohérente avec les suivis du MDDEP dans les puits résidentiels de Shannon. Les données de l'annexe E montrent qu'il y a des produits de dégradation du TCE (DCE et CV), des BTEX et du perchlorate aussi présents dans la région d'étude (Sanexen-Amec, 2005). Nous ne nous sommes pas penchés en détail sur les implications de la présence de ces composés à Shannon.

La forme de la distribution du TCE dans le panache est cohérente avec les directions d'écoulement de l'eau souterraine (Planche 11). Il semble que ce soient 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.

2.4.3 Distribution en profondeur de la contamination en TCE

Les coupes de la Planche 17 montrent les mêmes distributions des concentrations en TCE que dans le panache (Planche 16) 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 d'observation et dans les sondages par enfoncement. La localisation des coupes est indiquée sur la Planche 17. La Planche 18 montre aussi la distribution spatiale du TCE à l'intérieur du modèle géologique 3D.

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 des diamictons 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 des diamictons ou du silt glaciomarin sous-jacents 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 16). 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 17 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 venant du sud. Bien que le panache apparaisse continu jusqu'à la rivière Jacques-Cartier en plan (Planche 16), 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 14), il ne fait pas de doute cependant que le panache émerge éventuellement dans la rivière Jacques-Cartier, soit à sa berge ou plus loin sous son lit.

2.4.4 Carte régionale du panache de TCE

La Planche 19 présente la carte du panache de TCE dans l'ensemble du secteur Valcartier produite par Ouellon et al. (2010). Les concentrations en TCE mesurées en 2004-2005 ont permis de définir des zones de concentration en TCE continues qui sont susceptibles d'être

rencontrées dans différentes portions du panache. Cette carte permet ainsi de mettre en relation la situation observée à Shannon avec ce qui est présent à l'est (terrains de la Garnison Valcartier, de RDDC Valcartier et de la SIVI), qui représente l'amont de Shannon par rapport à l'écoulement de l'eau souterraine. Sur la Planche 19 on montre la piézométrie de l'aquifère deltaïque régional qui a été produite à partir des données mesurées en 2006 dans l'ensemble du secteur Valcartier (Ouillon et al., 2010). Les contours des zones du panache ont été définies à partir des données de la caractérisation réalisée à Shannon en 2004 ainsi que des données disponibles pour la période 2004-2005 dans l'ensemble du secteur Valcartier (Ouillon et al., 2010). Sur la Planche 16, la carte du panache de TCE rencontré localement à Shannon représente en fait un agrandissement de la carte régionale (Planche 19). Ouillon et al. (2010) donnent les sources des données utilisées pour la production de la carte du panache dans l'ensemble du secteur Valcartier, tant pour la période 2004-2005 que pour les autres périodes discutées à la section 2.4.5. La Planche 19 montre que les concentrations en TCE retrouvées à Shannon sont généralement en continuité et du même ordre que celles présentes à l'est de Shannon. Il y a par contre deux exceptions : tel que souligné précédemment, deux localisations à Shannon montrent des concentrations en TCE qui excèdent 590 µg/L (Puits PO-SH-25/26 et PO-SH-47/48), alors qu'il n'y a pas d'observations de concentrations excédant 590 µg/L dans les puits en amont (à l'est) de Shannon à la même période. Cependant, la section 2.4.5 montre que des concentrations supérieures à 590 µg/L n'ont pas été observées après 2004 à Shannon.

2.4.5 Évolution temporelle des concentrations en TCE

Les concentrations en TCE dans l'eau souterraine ne sont pas constantes mais varient dans le temps. Cette évolution temporelle des concentrations en TCE dans le temps est décrite dans cette section sous plusieurs perspectives qui sont illustrées par une série de planches. La Planche 20 montre les variations des zones du panache de TCE dans l'aquifère deltaïque régional à quatre périodes : 1) en 2001, 2) en 2004-2005, 3) en 2007-2008 et 4) à la fin 2009. Pour assurer la lisibilité des graphiques, les concentrations aux puits qui ont servi à tracer les zones du panache ne sont pas montrées. Ouillon et al. (2010) montrent les zones du panache ainsi que les concentrations des puits pour ces mêmes périodes ainsi qu'uniquement les concentrations des puits à d'autres périodes (avant la fin 2000, 2002-2003, 2005-2006, mars 2007 et 2008-2009). La carte du panache pour 2001 utilise surtout les données tirées de la caractérisation réalisée par le MDN sur son territoire à cette époque (Lefebvre et al., 2003). À cette époque, il n'y avait pas de données fiables de concentrations de TCE à Shannon, ce qui fait que le panache n'est pas représenté à Shannon pour cette période. L'extrapolation du panache faite par Lefebvre et al. (2003) s'est révélée non représentative des conditions réellement rencontrées à Shannon lors de la caractérisation faite à Shannon en 2004 (Sannexen-Amec, 2005) et qui fait l'objet du présent rapport. Sur la Planche 20, le panache pour la période 2004-2005 correspond à celui du présent rapport déjà présenté à la Planche 19. Le panache pour la période 2007-2008 précise les conditions à l'extrémité est du panache suite à la caractérisation du MDN dans le secteur Val-Bélair (Ouillon et al., 2008a). Pour la fin 2009, il y a plus de puits d'observation dans la partie ouest de la Garnison suite à la caractérisation complémentaire réalisée par Biogénie (2009) pour préciser les conditions hydrogéologique et la présence de TCE dans les diamictons dans cette partie du système aquifère. Pour les périodes après 2001, la majorité des données provient des campagnes de suivi de la qualité d'eau réalisées par le MDN dans le secteur Valcartier. En 2001, les concentrations en TCE excédant 590 µg/L se retrouvent surtout à proximité des zones sources

identifiées par Lefebvre et al. (2003), soient à RDDC Nord et sur les terrains de la SIVI (Secteur 214 et au sud de la Lagune C). D'autres valeurs ponctuelles excédant 590 µg/L se retrouvaient aussi ailleurs dans le panache mais des zones de concentrations n'ont pas été associées à ces détections parce que ces concentrations n'étaient pas soutenues, c'est-à-dire qu'elles étaient moindres que 590 µg/L pour les périodes précédant ou suivant la période représentée (voir Ouellon et al. (2010) pour la présentation des données pour toutes les périodes de suivi). Les concentrations entre 50 et 590 µg/L tracent le mieux le parcours suivi par le TCE lors de sa migration vers l'ouest à partir des zones sources jusqu'à la rivière Jacques-Cartier. Entre 2001 et la fin 2009, il y a une réduction progressive et générale des concentrations observées dans le secteur Valcartier; l'étendue de la zone avec des concentrations entre 50 et 590 µg/L est significativement réduite et en 2009 il y a très peu de puits où des concentrations excédant 590 µg/L sont observées.

Localement à Shannon, la Planche 21 montre l'évolution dans le temps des zones de concentrations en TCE ainsi que des valeurs observées aux puits pour les périodes 2004-2005, 2007-2008 et fin 2009. Les concentrations observées pour les autres périodes où des suivis du TCE ont été réalisés à Shannon sont présentées en annexe du rapport de Ouellon et al. (2010), mais sans définir les zones de concentration du panache. En 2004-2005, au nord du panache, des concentrations en TCE inférieures à 5 µg/L ont été observées aux puits d'observation PO-SH-7/8, PO-SH-35/36 et PO-SH-33/34. Il y a régression dans le temps de l'étendue de ces faibles concentrations; à partir du suivi de mars 2007, il n'y a plus de TCE détecté à PO-SH-7/8 (cartes pour les périodes 2007-2008 et fin 2009 sur la Planche 21). La carte pour la période de la fin 2009 de la Planche 21 montre qu'il n'y a plus qu'une détection à PO-SH-35/36. À Shannon, l'étendue du panache de TCE où les concentrations excèdent 5 µg/L demeure stable entre 2004-2005 et la fin 2009; il n'y a en effet aucun puits d'observation à l'extérieur du panache défini en 2004-2005 avec des nouvelles détections de TCE (Planche 21). Cependant, les concentrations changent avec le temps à l'intérieur de ce panache, avec une tendance générale de diminution des concentrations. Entre 2004-2005 et 2007-2008, il y a un élargissement de la zone de concentrations entre 50 et 590 µg/L, mais cet élargissement est causé par le changement d'une concentration passant de 41 à 65 µg/L à PO-SH-21/22 (Planche 22), alors que toutes les autres concentrations tendent plutôt à diminuer significativement. Notamment, il n'y a plus de concentrations observées excédant 590 µg/L après 2004-2005.

La Planche 22 compare la distribution des concentrations en TCE sur la coupe longitudinale A-A' ainsi que sur les coupes transversales D-D' et F-F' pour les périodes 2004-2005, 2007-2008 et fin 2009. Les valeurs des concentrations en TCE mesurées sont indiquées sur les coupes, ce qui permet de représenter plus précisément l'évolution dans le temps et l'espace des concentrations en TCE à Shannon. Moins de points de contrôle des concentrations sont disponibles pour les périodes après 2004-2005, parce qu'il n'y a plus d'échantillonnage par enfoncement (*direct push*) et que ce ne sont pas tous les puits qui ont été échantillonnés aux cours des différents suivis du TCE. Sur la coupe longitudinale A-A' qui suit approximativement l'écoulement de l'eau souterraine, on constate qu'entre 2004-2005 et 2007-2008 les concentrations observées à Shannon ont toutes diminué très significativement, particulièrement les concentrations qui excédaient 590 µg/L à PO-SH-25/26 et PO-SH-47/48 qui ne sont plus respectivement qu'à 88 et 40 µg/L. Par contre entre ces mêmes périodes, les concentrations ont augmenté en amont à deux points d'observation de PO-116-117. Entre 2007-2008 et la fin 2009, les zones de concentration

ne changent pas significativement de forme ou d'étendue, mais les concentrations observées à l'intérieur de la zone entre 50 et 590 µg/L diminuent de façon générale et sont toutes inférieures à 100 µg/L. Les coupes transversales D-D' et F-F' montrent aussi des diminutions significatives des concentrations en TCE entre les périodes 2004-2005, 2007-2008 et fin 2009. Dans les deux cas, il y a même pratiquement disparition des zones de concentration excédant 50 µg/L. On peut aussi noter sur ces coupes la quasi-disparition des concentrations inférieures à 5 µg/L au nord des coupes aux puits PO-SH-7/8 et PO-SH-35/36.

Murphy et al. (2010) ont réalisé une caractérisation géochimique de l'eau souterraine dans le secteur Valcartier qui a permis de déterminer que le panache de TCE observé à Shannon est en fait composé d'émissions de TCE provenant probablement de trois zones sources distinctes. La Planche 23 montre l'évolution dans le temps des concentrations en TCE à des puits situés à l'est de Shannon et qui sont représentatifs de la provenance du TCE de ces trois zones sources. La partie nord du panache principal (Figure A sur la Planche 23) serait reliée aux zones sources de RDDC Nord et du Secteur 214 sur les terrains de la SIVI, la partie centrale du panache (Figure B sur la Planche 23) où les plus fortes concentrations ont été observées proviendrait d'un ancien lieu d'enfouissement à l'extrémité ouest des terrains de la SIVI et la partie sud du panache (Figure C sur la Planche 23) recevrait du TCE provenant de la Lagune C aussi située sur les terrains de la SIVI. Les concentrations à ces puits situés à la limite ouest de la Garrison Valcartier sont montrées parce que ces puits ont été mis en place avant ceux de Shannon et ont donc fait l'objet d'un suivi sur une plus longue période à partir de 2001. Puisque le TCE migre vers l'ouest, les concentrations à ces puits situés en amont de Shannon sont surtout utiles pour indiquer l'évolution future des concentrations en TCE à Shannon, si les conditions actuelles se maintiennent. Sur la Planche 23, les concentrations sont montrées sur deux graphiques différents : une échelle linéaire est utilisée pour mieux représenter les variations absolues de concentrations tandis qu'une échelle logarithmique permet de mieux montrer les faibles concentrations qui peuvent être comparées aux concentrations de référence de 5 et de 50 µg/L. Les graphiques A reliés à des puits au nord du panache montrent qu'il y a eu des concentrations très fortes localement (PO-94-32m), mais que ces concentrations ont diminué rapidement pour atteindre des valeurs inférieures à 50 µg/L. Pour les autres puits sélectionnés, les concentrations étaient sous 5 µg/L à partir de 2001, mais ces concentrations ont augmenté généralement au-dessus de 50 µg/L entre 2004 et 2005 pour finalement diminuer à partir de la fin 2007 et atteindre des valeurs inférieures à 5 µg/L pour le dernier suivi. La partie nord du panache à Shannon où les concentrations excèdent 50 µg/L devrait donc éventuellement atteindre ces concentrations inférieures à 50 µg/L. Les graphiques B pour des puits reliés à la partie centrale du panache montrent des concentrations généralement supérieures à 50 µg/L et qui ont excédé 400 µg/L en 2002. Après une période de variabilité importante entre 2002 et le début 2006, les concentrations sont en déclin progressif, mais se situent encore au-dessus de 50 µg/L. Au centre du panache à Shannon, on peut donc s'attendre au maintien de concentrations supérieures à 50 µg/L. Enfin, les graphiques C pour des puits représentant la partie sud du panache montrent des concentrations très variables entre 2001 et la fin 2004, avec des valeurs excédant 600 µg/L en 2002 à PO-127-21m. Depuis 2005, les concentrations sont relativement stables au-dessus de 50 µg/L, mais les plus fortes valeurs ont diminué sous 100 µg/L. Une diminution des concentrations serait donc attendue dans la partie sud du panache, ce qui est observé aux puits PO-SH-27/28 et PO-SH-5/6 sur la section D-D' de la Planche 22.

2.4.6 Produits de dégradation du TCE

Le TCE présent dans l'eau souterraine subit une dégradation et se transforme en 1,2-dichloroéthène (DCE) qui se dégrade à son tour en chlorure de vinyle (CV) (Wiedmeyer et al., 1998). Le DCE peut se retrouver sous différentes formes, le cis-1,2-DCE et le trans-1,2-DCE. Les analyses de composés organiques volatils (COV) réalisées sur les échantillons d'eau souterraine prélevés à Shannon en 2004 donnent les concentrations totales de cis-1,2-DCE et de trans-1,2-DCE ainsi que les concentrations uniquement en cis-1,2-DCE (Sanexen-Amec, 2005). Le cis-1,2-DCE ne provient que de la dégradation du TCE et c'est la forme qui domine à Shannon; le cis-DCE représente toujours plus de 90% du DCE total et une moyenne de 99.8% du DCE des échantillons prélevés par sondages et de 99.4% du DCE des échantillons provenant des puits d'observation. Pour produire les graphiques et les statistiques discutés dans la présente section, les concentrations utilisées, si disponibles, ont été le DCE total, ou le cis-1,2-DCE en remplacement du DCE total.

Le tableau 2.5 donne des statistiques sur les concentrations en TCE, DCE et CV dans l'eau souterraine dans les échantillons prélevés en 2004 à Shannon à l'aide de sondages ou dans des puits d'observation par Sanexen-Amec (2005). Les statistiques pour les types d'échantillonnages sont du même ordre, ce qui fait que la discussion portera ici sur les statistiques combinant les échantillonnages par sondages et dans les puits. Les concentrations de référence indiquées sous chacun des trois composés chimiques correspondent aux « critères d'eau souterraine aux fins de consommation » du MDDEP (1998). Ces critères sont généralement les mêmes que ceux du règlement sur la qualité de l'eau potable du MDDEP (2001). Il n'y a cependant pas de critère pour l'eau potable pour le DCE. Dans le cas du TCE, le nombre de détections dépassant 5 µg/L est aussi indiqué au tableau, ce qui correspond à la recommandation de Santé Canada (2008) pour l'eau potable. Le nombre d'échantillons d'eau souterraine et les autres statistiques citées au tableau 2.5 excluent les blancs et les duplicatas. Pour le TCE, ce ne sont pas tous les échantillons qui ont été analysés. Sur les échantillons analysés, le TCE, le DCE et le CV ont été détectés 69, 54 et 7 fois, respectivement. La concentration médiane est respectivement de 20.0, 3.8 et 2.1 µg/L pour le TCE, le DCE et le CV. La concentration en TCE a dépassé la valeur de référence de 50 µg/L pour 15.3% des échantillons et la valeur de 5 µg/L pour 33.1% des cas. Les dépassements des valeurs de référence (50 et 2 µg/L) représentent 3.7% et 2.9% des cas pour le DCE et le CV, respectivement. L'échantillonnage couvre assez uniformément le territoire de la municipalité de Shannon où du TCE pouvait être susceptible d'être présent en tenant compte du panache délimité en amont hydrogéologique sur le territoire de la Garnison Valcartier (Ouillon et al., 2010). La proportion des dépassements des concentrations de référence pour le TCE, le DCE et le CV est donc représentative de la proportion du volume de l'aquifère deltaïque dans la région d'étude, puisque la grande majorité des échantillons a été prélevée dans cet aquifère.

La figure A de la Planche 24 montre la fréquence cumulative des concentrations en TCE, DCE et CV pour les échantillons où ces composés ont été détectés lors des sondages par enfoncement, ce qui représente 49%, 34% et 5% des cas, respectivement, pour le TCE, le DCE et le CV. Une échelle logarithmique a été utilisée pour montrer les concentrations puisque les valeurs faibles sont prépondérantes et qu'une échelle linéaire ne permet pas de bien montrer toutes les concentrations.

Tableau 2.5 : Concentrations en TCE, DCE et CV dans l'eau souterraine à Shannon en 2004
(Données tirées de Sanexen-Amec, 2005 – Excluant les blancs et les duplicatas)

	Échantillons de sondages		
	TCE	DCE	CV
Référence (µg/L)	50	50	2
Échantillons	136	136	136
N analyses	124	136	136
Détections	69 (56%)	54 (40%)	7 (5%)
Min (µg/L)	0.2	0.2	0.6
Max (µg/L)	1100	150	6
Moyenne (µg/L)	77.6	18.0	2.4
Médiane (µg/L)	20.0	3.8	2.1
N > Référence	19	5	4
% > MCL / N	15.3%	3.7%	2.9%
N > 5 µg/L	45		
% > 5 / N	33.1%		
	Échantillons de puits d'observation		
	TCE	DCE	CV
Référence (µg/L)	50	50	2
Échantillons	98	98	98
N analyses	98	98	98
Détections	39 (40%)	25 (26%)	4 (4%)
Min (µg/L)	0.2	0.5	1.5
Max (µg/L)	960	120	3.7
Moyenne (µg/L)	101.5	25.9	2.8
Médiane (µg/L)	14	6.9	3
N > Référence	13	6	3
% > MCL / N	13.3%	6.1%	3.1%
N > 5 µg/L	23		
% > 5 / N	23.5%		
	Tous les échantillons d'eau		
	TCE	DCE	CV
Référence (µg/L)	50	50	2
Échantillons	234	234	234
N analyses	222	234	234
Détections	108 (49%)	79 (34%)	11 (5%)
Min (µg/L)	0.2	0.2	1.5
Max (µg/L)	1100	150	6
Moyenne (µg/L)	86.3	20.5	2.6
Médiane (µg/L)	16.5	5.1	2.2
N > Référence	32	11	7
% > MCL / N	14.4%	4.7%	3.0%
N > 5 µg/L	68		
% > 5 / N	30.6%		

Les figures B et D de la Planche 24 montrent les relations entre les concentrations en TCE et celles de DCE et de CV, respectivement. Dans le cas du CV, il y a relativement peu de détections par rapport à celles de TCE et les concentrations en CV sont au moins 100 fois moindres que celles de TCE. Pour le DCE, on peut remarquer trois regroupements distincts qui ont différentes proportions de concentrations en TCE et DCE. La figure C de la Planche 24 indique que ces regroupements, nommés Groupe A, Groupe B et Groupe C, ont des rapports de concentration en TCE/DCE allant d'environ 0.5 à 2.8 pour le Groupe A, de 2.8 à 10 pour le Groupe B et d'environ 10 à 30 pour le Groupe C. Puisque le DCE est issu de la dégradation du TCE, ces groupes d'échantillons avec des rapports TCE/DCE distincts pourraient indiquer des conditions de dégradation et de migration (durée) distinctes qui pourrait être relié à des zones sources différentes à l'origine du TCE. La Planche 25 montre la distribution du TCE, du DCE et des groupes reliés au rapport TCE/DCE pour les données de 2004 (Sanexen-Amec, 2005) sur la coupe A-A' longitudinale à l'écoulement ainsi que sur les coupes D-D' et F-F' qui sont perpendiculaires à l'écoulement. La coupe A-A' montre une prédominance du Groupe B tandis que les coupes D-D' et F-F' montrent que ce groupe prédomine au centre du panache de TCE où passe la coupe A-A', alors que les Groupes A et C prédominent respectivement au sud et au nord du panache de TCE. La distribution spatiale des regroupements des rapports TCE / DCE est très cohérente avec les zones du panache définies par Murphy et al. (2010) à partir de traceurs géochimiques. Ainsi, le Groupe A est dans une partie du panache reliée à la zone source de la Lagune C sur les terrains de la SIVI, le Groupe B est dans la partie du panache reliée à la zone source présumée de l'ancien lieu d'enfouissement à la limite ouest de la SIVI et le Groupe C est en relation avec la partie du panache provenant des zones sources de RDDC Nord et du Secteur 214 sur les terrains de la SIVI.

3. Discussion en relation avec les objectifs du mandat

3.1 Synthèse du contexte hydrogéologique

Cette section fait la synthèse du contexte hydrogéologique de la région d'étude à l'aide de la Planche 18 qui montre le modèle géologique en trois dimensions dans la région d'étude présenté sous forme de coupes. Le modèle montre les unités géologiques ainsi que la surface libre avec une perspective représentant une vue de la région d'étude du sud-ouest (rivière Jacques-Cartier) vers le nord-est (Garnison Valcartier). Le modèle montre aussi les concentrations en TCE observées dans les puits d'observation ou les sondages par enfoncement en utilisant les mêmes intervalles de contamination que pour la carte de contamination (Planche 16). Enfin, la morphologie de la vallée de la rivière Jacques-Cartier est aussi intégrée dans le modèle.

Le modèle géologique 3D montre bien la topographie accentuée de la surface du roc et la géométrie variable des unités aquifères, soit les sables deltaïques et les diamictons. L'unité de silt glaciomarin peu perméable et apparemment discontinue contrôle les échanges entre les unités aquifères. La vallée de la rivière Jacques-Cartier découpe les deux unités aquifères, l'aquifère deltaïque au centre et les diamictons au nord et au sud de la région 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 région d'étude il y a une composante importante de l'écoulement qui se fait vers le nord en provenance du Mont Rolland-Auger. Il y a un lien hydraulique direct de la rivière Jacques-Cartier avec la nappe libre dans l'unité deltaïque au centre de la région d'étude et un lien direct avec l'unité des diamictons surtout au sud.

La contamination en TCE dissous est présente dans la partie centrale de la région d'étude dans une bande s'étendant de l'ouest vers l'est. Le TCE est présent presque exclusivement dans l'unité deltaïque (pratiquement absent des diamictons et pas détecté dans le roc). Ce fait est difficile à voir dans la perspective présentée dans Planche 18 mais on peut toutefois remarquer les symboles pour les concentrations non détectées dans la partie inférieure des puits ou des sondages montrés dans le modèle (voir Planche 17 pour les détails). Les concentrations plus importantes de TCE sont au centre de la région 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.

3.2 Distribution de la contamination en TCE

Les Planches 16 et 17 ont permis de définir la distribution et les limites de la contamination en TCE dans la région d'étude pour la caractérisation réalisée en 2004 par Sanexen-Amec (2005). Des détails sur la distribution du TCE sont donnés aux sections 2.4.2 et 2.4.3. 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 Valcartier et Shannon est de près de 500 m et cette largeur diminue à moins de 200 m en bordure de la rivière Jacques-Cartier à l'ouest. Compte tenu de l'irrégularité de la limite entre la Garnison Valcartier

et Shannon, le parcours du panache entre la Garnison et la rivière se fait sur une distance d'environ 500 m dans la partie nord et d'environ 800 m dans la partie sud du panache. La forme de la distribution du TCE dans le panache est très cohérente avec les directions d'écoulement de l'eau souterraine (Planche 11). L'étendue du panache est cohérente avec les résultats du suivi du TCE par le MDDEP dans des puits résidentiels à Shannon. Cette distribution du panache à Shannon est aussi en continuité avec le panache retrouvé dans l'ensemble du secteur Valcartier (Planche 19).

Deux zones de concentration en TCE sont présentes dans le panache : 5 à 50 µg/L et 50 à 590 µg/L. Les concentrations ponctuelles à plus de 590 µg/L n'ont pas été représentées par une zone de concentration parce que ces concentrations n'ont été observées qu'en 2004 et pas par la suite (Ouillon et al., 2010). 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 dans la Planche 16 utilise les valeurs maximales de concentrations en TCE retrouvées en profondeur). La zone à plus forte concentration excédant 590 µg/L est restreinte tant en plan qu'en profondeur. Les fortes concentrations en TCE sont dans un secteur délimité par la limite ouest avec la garnison et le « triangle » des rues King, Jacques-Cartier et de la Station à Shannon.

En profondeur, 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 des diamictons et 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 proglaciaire ou du silt glaciomarin sous-jacents à l'unité deltaïque.

Les Planches 20, 21 et 22 montrent que les concentrations en TCE dans le panache ont progressivement diminué depuis la caractérisation réalisée en 2004. La variabilité ainsi que la tendance à la diminution générale des concentrations est aussi illustrée par la Planche 23 qui montre les concentrations en TCE reliées aux parties nord, centrale et sud du panache. La Planche 24 montre que les concentrations en produits de dégradation du TCE, le DCE et le CV, sont généralement moindres que celles du TCE et les détections de DCE et surtout de CV sont moins fréquentes. La Planche 24 montre aussi qu'il y a des groupes distincts d'échantillons qui ont des rapports différents de concentrations en TCE/DCE. La Planche 25 illustre le fait que des ces groupes se retrouvent dans différentes parties du panache qui ont été mises en relation avec différentes zones sources par Murphy et al. (2010).

3.3 Lien avec la rivière Jacques-Cartier

Les unités aquifères deltaïques et des diamictons sont continues jusqu'à la rivière Jacques-Cartier. Il y a un lien direct de la rivière Jacques-Cartier avec la nappe libre dans l'unité deltaïque au centre de la région d'étude et un lien direct avec l'unité des diamictons surtout au sud. Les coupes piézométriques (Planche 14) indiquent que ces deux unités sont affectées 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. Entre

mai et octobre 2005, le suivi du niveau de l'eau souterraine dans un puits en bordure de la rivière Jacques-Cartier ainsi que dans la rivière elle-même montre 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.

Le panache de TCE dissous apparaît continu jusqu'à la rivière Jacques-Cartier en plan (Planche 16) avec un niveau de concentration entre 50 et 590 µg/L. Cependant, les concentrations dans les résurgences échantillonnées en bordure de la rivière n'avaient que 3 et 42 µg/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 17). Compte tenu du lien hydraulique démontré entre les unités aquifères et la rivière (Planche 14), il ne fait pas de doute cependant que le panache délimité à Shannon émerge dans la rivière Jacques-Cartier, soit à sa berge ou plus loin sous son lit. Conant et al. (2004) ont cependant montré qu'il était possible que le TCE soit fortement dégradé lors de son transfert à travers le lit d'une rivière, de sorte que les concentrations émises en rivière peuvent être significativement inférieures à celles présentes dans le panache.

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 nombre de points de contrôle est limité de ce côté de la rivière (présence de seulement 3 puits d'observation et 4 sondages par enfoncement). Il y a eu détection de perchlorate dans un puits du côté ouest de la rivière (Annexe C) dont la provenance pourrait être présumée provenir de l'est de la rivière (Puits d'observation PO-SH-30H). Cette détection est cependant faible et près de la limite analytique et devrait être confirmée par un suivi avant de tirer des conclusions fermes sur la signification de cette détection.

3.4 Sources de la contamination en TCE

La contamination en TCE dissous à Shannon est en continuité et en aval de celle observée sur la Garnison Valcartier (Lefebvre et al., 2003) (Planche 19). Il est certain que la migration du TCE détecté sous le territoire de la Garnison Valcartier apporte de la contamination sous le territoire de Shannon jusqu'à la bordure de la rivière Jacques-Cartier. Sur la base de traceurs géochimiques, les travaux de Murphy et al. (2010) ont montré que le TCE retrouvé dans différentes parties du panache à Shannon pouvait être mis en relation avec les zones sources de RDDC Nord sur les terrains du MDN ainsi que trois zones sources sur les terrains de la SIVI, soient le Secteur 214, la Lagune C ainsi que potentiellement l'ancien dépotoir à l'extrémité ouest des terrains de la SIVI. Murphy et al. (2010) mentionnent aussi que la présence de concentrations en TCE sur toute l'épaisseur de l'aquifère serait reliée à une dispersion importante dans la partie ouest de la Garnison et à Shannon à cause des variations importantes de l'épaisseur saturée de l'aquifère deltaïque. Les patrons de concentrations des traceurs géochimiques n'indiquent pas qu'un apport de soluté ou de TCE aurait pu se faire à partir de la surface du sol à Shannon (Murphy et al., 2010). Ces données indiquent donc que la contamination en TCE à Shannon ne serait pas en partie d'origine locale, mais proviendrait bien des zones sources localisées en amont hydrogéologique à l'est de Shannon.

4. Conclusions

Ce rapport présente les résultats de l'analyse par l'INRS-ETE 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 Sanexen-Amec (2005) sous la supervision de Construction de Défense Canada (CDC). Ces travaux ont impliqué la réalisation de 53 forages, l'installation de 99 puits d'observation échantillonnés pour l'eau souterraine, la mesure des niveaux d'eau et la réalisation d'essais de perméabilité dans ces puits, 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. Les concentrations en TCE provenant des suivis réalisés par le MDN entre 2005 et 2009 ont aussi été analysées.

L'INRS-ETE avait pour mandat d'analyser les données de caractérisation. 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 région 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. Enfin, une carte et des coupes ont permis la délimitation du panache de contamination en TCE dans la région d'étude pour les données de 2004 ainsi que pour les données acquises à des périodes subséquentes.

Dans la région d'étude, la topographie de la surface du roc est accentuée et la géométrie des unités aquifères, les sables deltaïque et les diamictons, 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, les sables deltaïques au centre et les diamictons au nord et au sud de la région 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 région d'étude il y a une composante importante de l'écoulement qui se fait vers le nord en provenance du Mont Rolland-Auger. La présence du silt glaciomarin engendre des gradients hydrauliques entre l'unité des diamictons et l'unité deltaïque.

La contamination en TCE dissous est présente dans la partie centrale de la région 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 des diamictons et pas détecté dans le roc. Les concentrations plus importantes de TCE sont au centre de la région 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 à l'ouest de la rivière. Les concentrations en TCE dans le panache ont progressivement diminué depuis la caractérisation réalisée en 2004. Les concentrations en produits de dégradation du TCE, le DCE et le CV, sont généralement moindres que celles du TCE et les détections de DCE et surtout de CV sont moins fréquentes.

Les unités aquifères deltaïques et des diamictons sont continues jusqu'à la rivière Jacques-Cartier. Il y a un lien hydraulique direct entre la rivière Jacques-Cartier et la nappe libre dans l'unité deltaïque au centre de la région d'étude et un lien direct avec l'unité des diamictons 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 µg/L. Cependant, les concentrations dans les résurgences échantillonnées en bordure de la rivière n'avaient que 3 et 42 µg/L de TCE, ce qui est cohérent avec les concentrations observées dans l'eau souterraine en bordure de la rivière avec les puits d'observation ou les sondages par enfoncement. 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 présentement délimité à Shannon émerge dans la rivière Jacques-Cartier, soit à sa berge ou plus loin sous son lit. Conant et al. (2004) montrent toutefois que le TCE peut être significativement dégradé lors de son passage à travers le lit d'une rivière.

La contamination en TCE dissous à Shannon est en continuité et en aval de celle observée sous le territoire de la Garnison Valcartier (Lefebvre et al., 2003). Il est certain que la migration du TCE détecté sous le territoire de la Garnison Valcartier apporte de la contamination sous le territoire de Shannon jusqu'à la bordure de la rivière Jacques-Cartier. Il y a des groupes distincts d'échantillons qui ont des rapports différents de concentrations en TCE/DCE. Ces groupes se retrouvent dans différentes parties du panache qui ont été mises en relation avec différentes zones sources par Murphy et al. (2010) à l'aide d'une caractérisation géochimique de l'eau souterraine. Le rapport TCE/DCE apporte également une autre évidence du lien entre différentes parties du panache de TCE retrouvé à Shannon et les zones sources situées à RDDC Nord ainsi que sur les terrains de la SIVI (Secteur 214, Lagune C et potentiellement l'ancien dépotoir à l'extrémité ouest des terrains de la SIVI). Ces indications amènent à conclure que le TCE retrouvé à Shannon n'est pas susceptible de provenir d'une source locale mais bien de zones sources localisées en amont hydrogéologique à l'est de la municipalité de Shannon.

Références citées ou utilisées

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

Biogénie, 2009. Caractérisation Environnementale - Unité Proglaciaire, Garnison Valcartier, Courcelette (Québec), Référence Biogénie CD8310, Référence du Ministère de la Défense Nationale V/Réf.: IE090455 / Contrat no 39553 SC, Juin 2009, 42 p., plus cartes et annexes.

Boutin, A., Lefebvre, R., Blais, V., Martel, R., Therrien, R., et Parent, M., 2004. Modeling of groundwater flow and TCE transport in the Valcartier area aquifer system. In D. Demers, D. Leahy, R. Lefebvre, S. Leroueil et R. Martel, ed., *Proceedings, 57th Canadian Geotechnical Conference and 5th Joint CGS/IAH Conference*, October 24-27, 2004, Quebec City, Canada, ISBN 0-920505-29-5, Session 4B, 36-43.

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/ofr0040/).

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 Resour. Res.*, 27(7), 1783-1784.

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

Conant, B., Jr., Cherry, J.A., et Gillham, R.W., 2004. A PCE groundwater plume discharging to a river: influence of the streambed and near-river zone on contaminant distribution. *J. Contam. Hydrol.*, 73, 249-279.

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

Earth Decision Sciences, 2001.: gOcad 2.0.8.

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

Golden Software Inc., 1999.: Surfer 7.

Golder Associés Ltée, 2004. Évaluation environnementale de site Phase I détaillée, Territoire de la municipalité de Shannon, Québec.

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 (2nd edition, completely revised). International Institute for Land Reclamation and Improvement, The Netherlands, 377 p.

Lefebvre, R., Boutin, A., Blais, V., Martel, R., Therrien, R. Parent, M., Ouellon, T., Roy, N., et Lapointe, M., 2004. Characterization of the hydrogeological context and dissolved TCE plume in the granular aquifer system of the Valcartier area, Quebec, Canada. In D. Demers, D. Leahy, R. Lefebvre, S. Leroueil et R. Martel, ed., *Proceedings, 57th Canadian Geotechnical Conference and 5th Joint CGS/IAH Conference*, October 24-27, 2004, Quebec City, Canada, ISBN 0-920505-29-5, Session 4B, 28-35.

Lefebvre, R., Boutin, A., Martel, R., Therrien, R., Parent, M., et 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 INRS-ETE R-631, mai 2003, 99 p., 28 planches et annexes. <http://www.inrs-ete.quebec.ca/publications/epub.htm>

Levy, B.S., et Pannell, L., 1991. Evaluation of a pressure system for estimating in-situ hydraulic conductivity. Ground Water Management No. 5, *Proceedings 5th 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, 26 p.

Marsily, G. de, 1986. Quantitative hydrogeology - Groundwater hydrology for engineers. Academic Press, Inc., San Diego, CA, 440 p.

Michaud, Y., Parent, M., Mailloux, M., Boisvert, É., Lefebvre, R., Martel, R., Boivin, R., Roy, N., et 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 du développement durable de l'environnement et des parcs du Québec (MDDEP), 2004. Critères de qualité de l'eau de surface au Québec. (http://www.menv.gouv.qc.ca/eau/criteres%5Feau/critere_t3.htm)

Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs du Québec (MDDEP), 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>)

Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs du Québec (MDDEP), 2001. Règlement sur la qualité de l'eau potable (c. Q-2, r.18.1.1), Québec, Éditeur officiel du Québec, à jour au 1^{er} mars 2010. <http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/>

Ministère du Développement durable, de l'environnement et des Parcs du Québec (MDDEP), 1998. Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés. Parue en juin 1998, changements en mars 1999, en juin 2000 et en novembre 2001.

<http://www.mddep.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/index.htm>

Grille des critères applicables aux cas de contamination des eaux souterraines

http://www.mddep.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/annexe_2_grille_eaux.htm

Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs du Québec (MDDEP), 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 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.

Murphy, S., Ouellon, T., Lefebvre, R., Clark, I.D., Ballard, J.-M., Racine, C., 2010. Tritium-Helium dating and geochemical characterization of groundwater in the Valcartier deltaic aquifer system. INRS, Centre-Eau Terre Environnement, Rapport de recherche R-960, soumis en février 2010 à Construction de Défense Canada, ISBN 978-2-89146-558-8, 103 p., 24 planches cartographiques et annexes.

Nathan R.J., et McMahon T.A., 1990. Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analyses, *Water resour. Res.*, 26 (7), 1465-1473.

Ouellon, T., Lefebvre, R., Blais, V., Racine, C., Ballard, J.-M., 2010. Synthèse du contexte hydrogéologique et de la problématique du TCE dans le secteur Valcartier, Québec, Canada. INRS, Centre - Eau Terre Environnement, Rapport de recherche R-961, version finale soumise en juillet 2010 à Construction de Défense Canada, ISBN 978-2-89146-560-1.

Ouellon, T., Blais, V., Lefebvre, R., Ballard, J.-M., 2008a. Contexte hydrogéologique et modélisation de l'écoulement de l'eau souterraine dans la vallée de Val-Bélair en relation avec la présence de TCE dans le secteur Valcartier, Ville de Québec, Québec, Canada. INRS, Centre - Eau Terre Environnement, Rapport R-962, soumis au Ministère de la Défense Nationale, Décembre 2008, 81 p., 30 planches cartographiques et annexes, ISBN 978-2-89146-557-1.

Ouellon, T., Lefebvre, R., Marcotte, D., Boutin, A., Blais, V., Parent, M., 2008b. Hydraulic conductivity heterogeneity of a local deltaic aquifer system from the kriged 3D distribution of hydrofacies from borehole logs, Valcartier, Canada. *J. of Hydrology*, 351 (1-2), 71-86.

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

Parent, M., Girard, F., Fagnan, N., Michaud, Y., Boisvert, É. et Fortier, R., 2008. Chapitre 5 - Caractérisation géologique de la subsurface. In *Guide méthodologique pour la cartographie hydrogéologique régionale des aquifères granulaires*. Contribution 2003016 de la Commission Géologique du Canada, réalisée conjointement avec l'INRS-Géoressources (maintenant INRS-Eau Terre Environnement), le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, la MRC de Portneuf et l'université Laval. Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, ISBN 978-2-550-51189-2 (pdf), 101 p.

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

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 Canada : 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.

Santé Canada, 2008. Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : Tableau sommaire. Préparé par le Comité fédéral-provincial-territorial sur l'eau potable du Comité fédéral-provincial-territorial sur la santé et l'environnement, mai 2008, 14 p.

Sophocleous, M., 2002. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology J.*, 10, 52-67.

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].

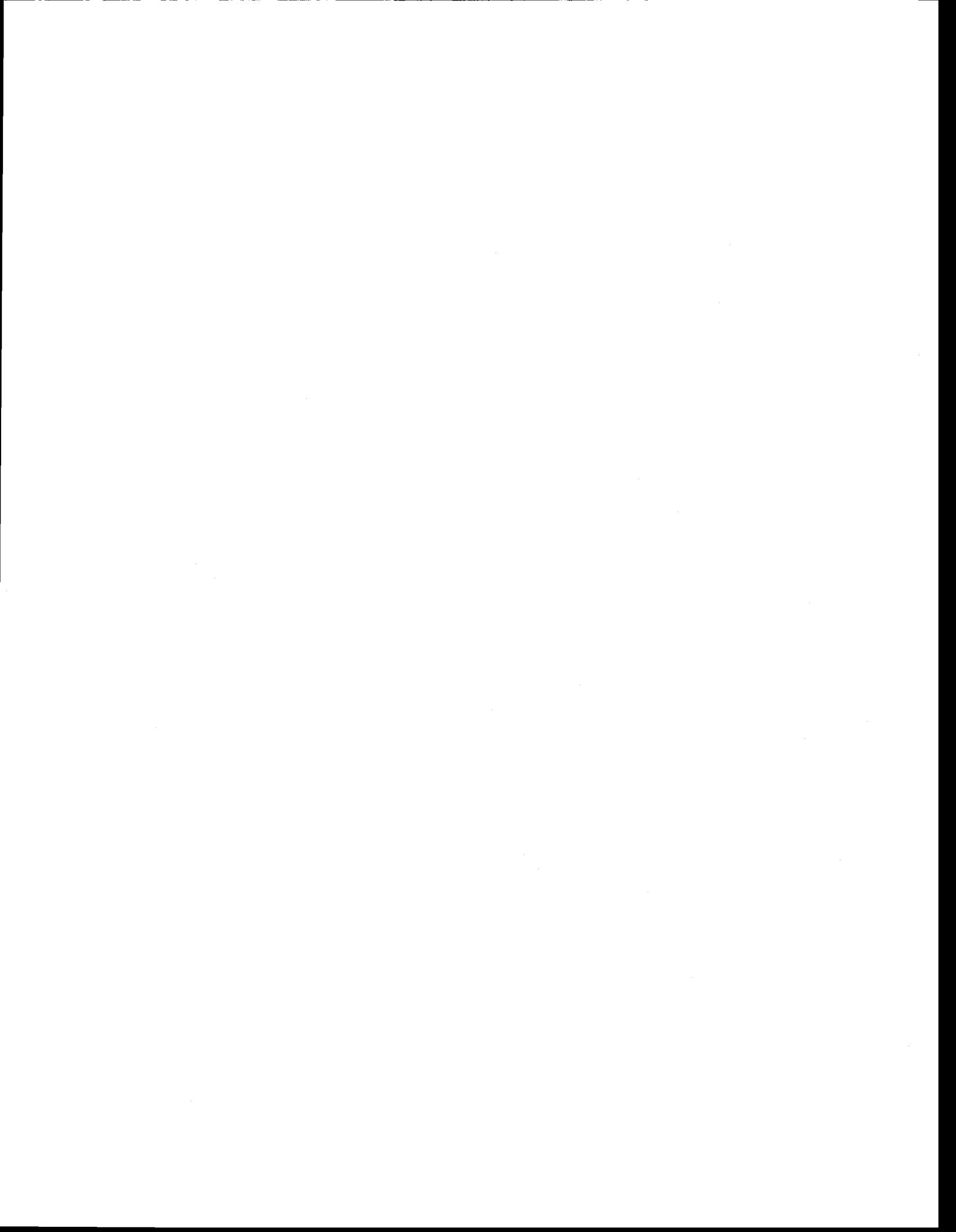
van der Kamp, G., 1976. Determining aquifer transmissivity by means of a well response tests: The underdamped case. *Water Resour. Res.*, 12 (1), 71-77.

Weidmeyer, T.H., Swanson, M.A., Moutoux, D.E., Gordon, E.K., Wilson, J.T., Wilson, B.H., Kampbell, D.H., Hass, P.E., Miller, R.N., Hansen, J.E., et Chapelle, F.H., 1998. Technical protocol for evaluating natural attenuation of chlorinated solvents in ground water. U.S. EPA, Report EPA/600/R-98/128, September, 1998, 78 p. and appendices.

Winter, T.C., 1998. Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems. *Hydrogeology J.*, 1999, 7, 28-45.

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

Planches



Interprétation de la caractérisation
du TCE dans l'eau souterraine
à Shannon, Québec, Canada

René Lefebvre, Véronique Blais,
Thomas Ouellon, Michel Parent
Jean-Marc Ballard et Cintia Racine

INRS, Centre - Eau Terre Environnement
RAPPORT FINAL
Juillet 2010

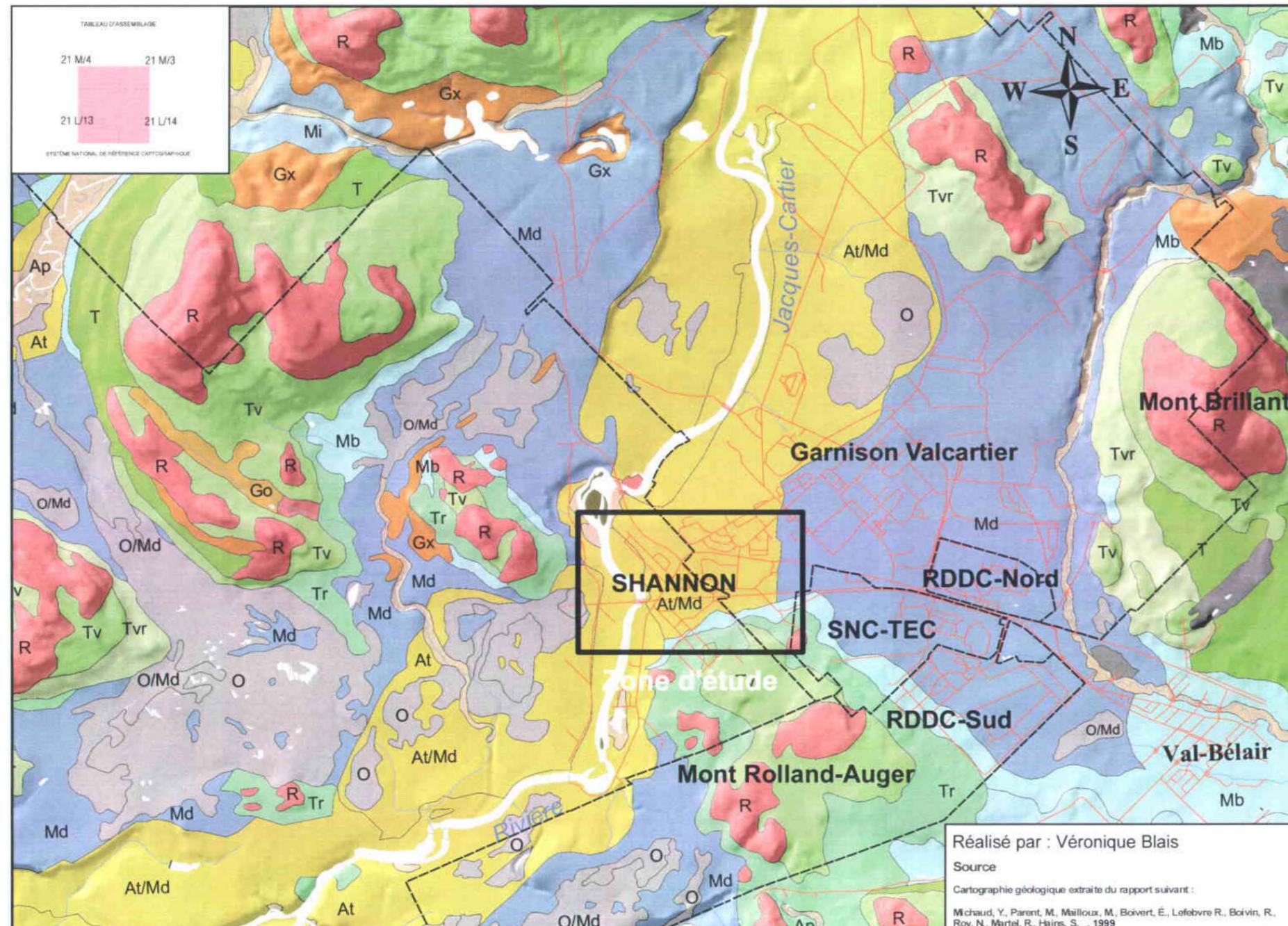
Planche 1
Localisation régionale et
géologie des dépôts meubles

LÉGENDE

Formations superficielles

-  O Dépôts organiques
-  Ap Sédiments alluviaux : actuels
-  At Sédiments alluviaux : terrasses fluviales
-  Md Sédiments marins : deltaïques
-  M Sédiments marins : intertidaux
-  Mb Sédiments marins : littoraux, pré-littoraux et d'exondation
-  Go Sédiments fluvio-glaciaires : épandage subaérien
-  Gs Sédiments fluvio-glaciaires : épandage subaquatique
-  Gx Sédiments fluvio-glaciaires : juxtaposés
-  Tr Sédiments glaciaires : Till remanié
-  Trv Sédiments glaciaires : Till remanié sur roc
-  T 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



Carte régionale de localisation et géologie des dépôts meubles



Interprétation de la caractérisation
du TCE dans l'eau souterraine
à Shannon, Québec, Canada

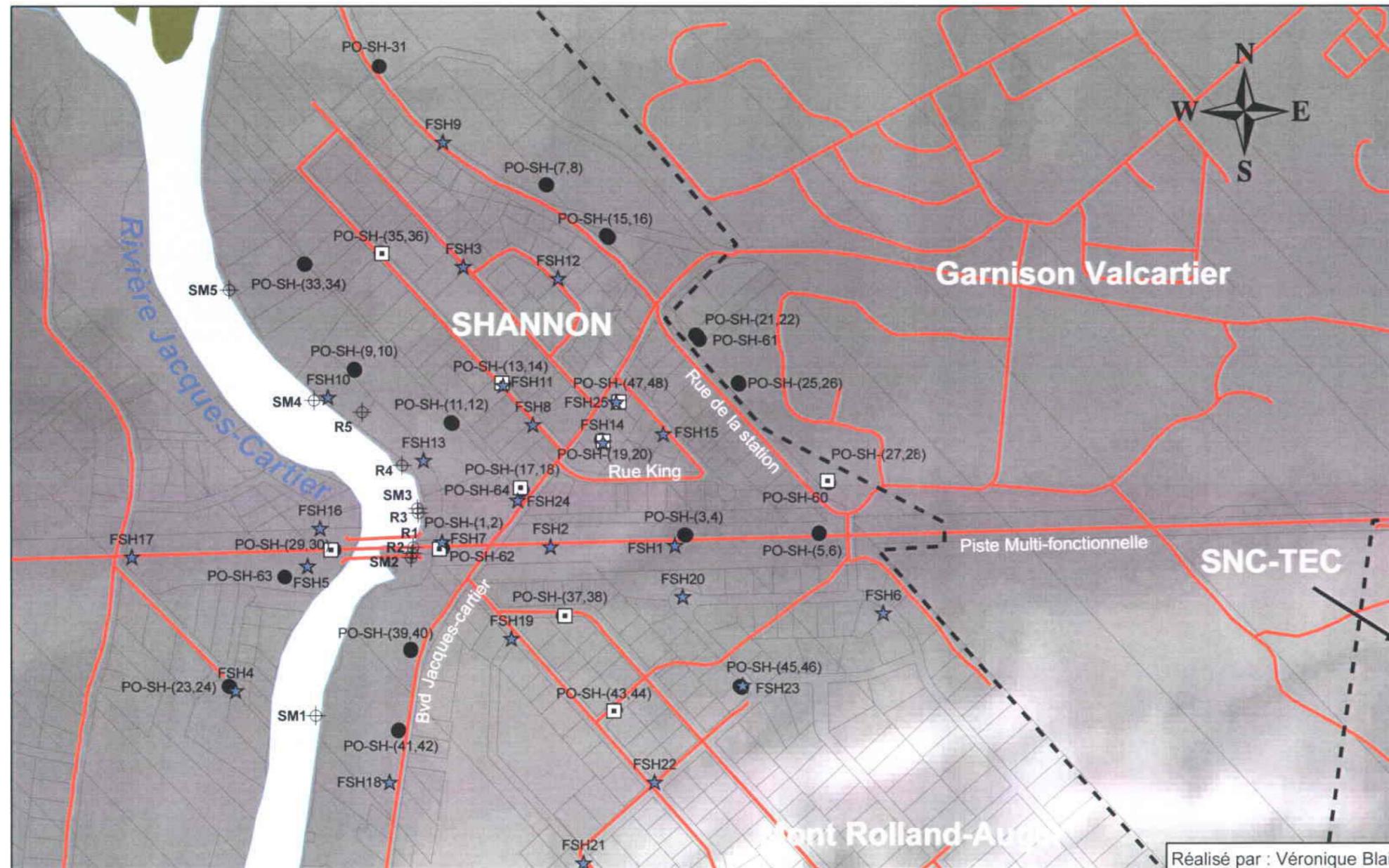
René Lefebvre, Véronique Blais,
Thomas Ouellon, Michel Parent
Jean-Marc Ballard et Cintia Racine

INRS, Centre - Eau Terre Environnement
RAPPORT FINAL
Juillet 2010

Planche 2
Localisation des travaux
à Shannon

- ★ Geoprobe 2004
- Forages 2004 échantillons sols
- Forages 2004 destructifs
- ⊕ Points en bordure de la rivière JC
- - - Limite de propriété
- Routes

Échelle 1 : 8 000



Carte de localisation des travaux, Shannon, secteur Valcartier

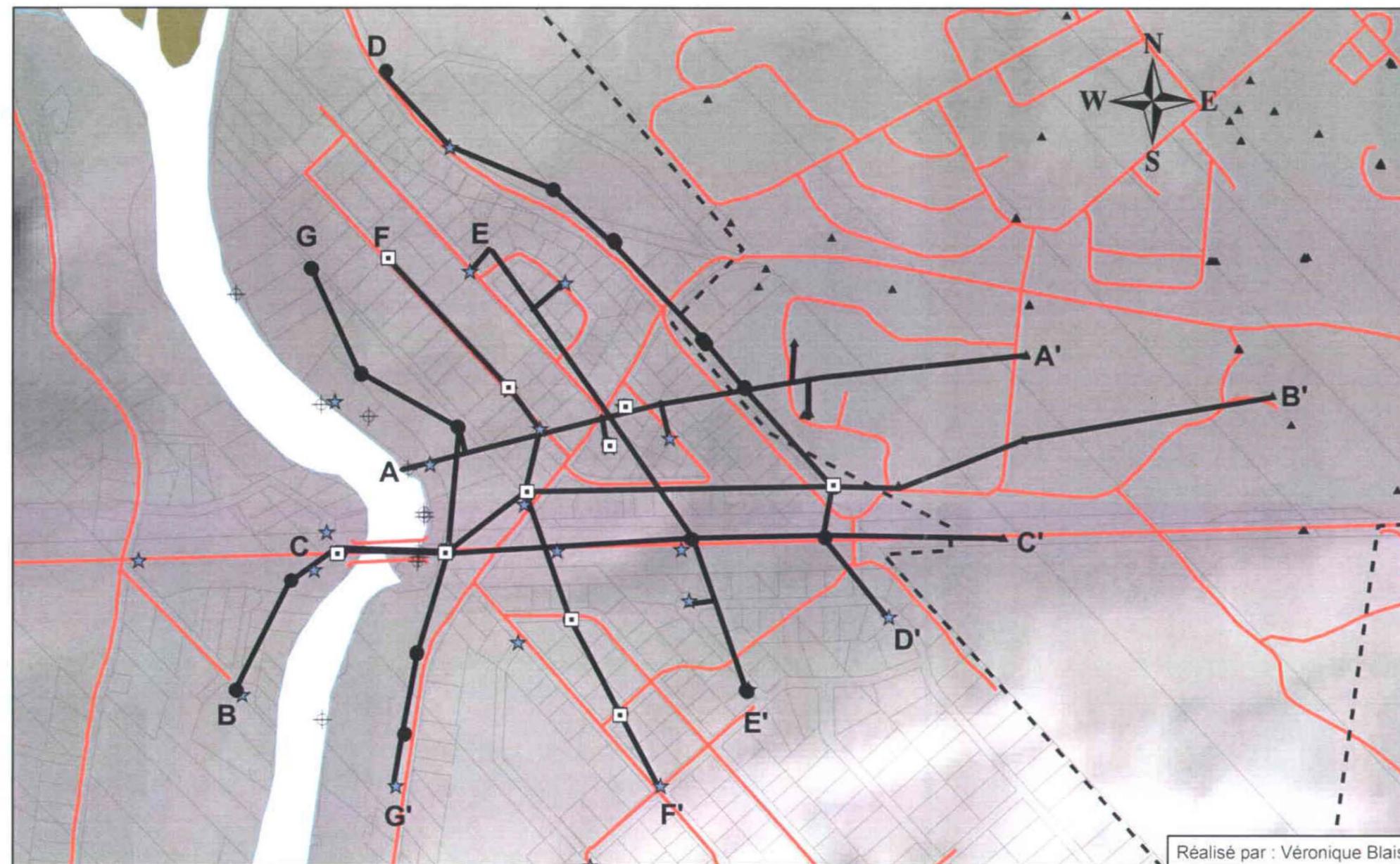
Interprétation de la caractérisation
du TCE dans l'eau souterraine
à Shannon, Québec, Canada

René Lefebvre, Véronique Blais,
Thomas Ouellon, Michel Parent
Jean-Marc Ballard et Cintia Racine

INRS, Centre - Eau Terre Environnement
RAPPORT FINAL
Juillet 2010

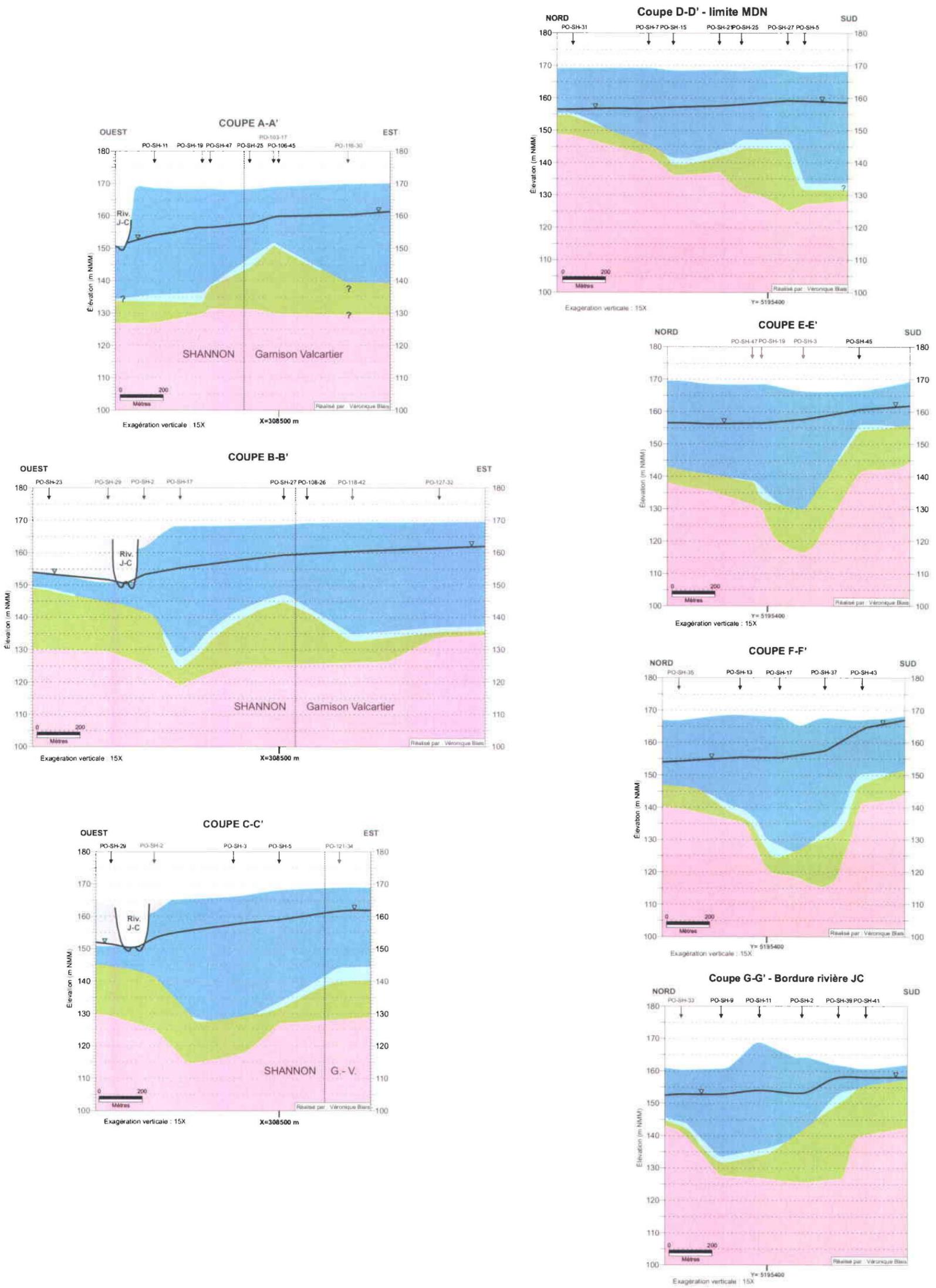
Planche 3
Localisation des coupes
stratigraphiques

- Forages 2004 échantillons sols
- ★ Forages 2004 destructifs
- ▲ Puits d'observation 2001
- ⊕ Points en bordure de la rivière JC
- - - Limite de propriété
- Coupes stratigraphiques (A-G)
- Routes



Carte de localisation des coupes stratigraphiques

Échelle 1 : 8000



Coupes stratigraphiques longitudinales (A-A', B-B', C-C') et transversales (D-D', E-E', F-F', G-G')

Interprétation de la caractérisation
du TCE dans l'eau souterraine
à Shannon, Québec, Canada

René Lefebvre, Veronique Blais,
Thomas Ouelton, Michel Parent
Jean-Marc Ballard et Cintia Racine

INRS, Centre - Eau Terre Environnement
RAPPORT FINAL
Juillet 2010

Planche 4
Coupes stratigraphiques
longitudinales
et transversales

Unités géologiques :

- Deltaïque
- Glaciomarin
- Diamictons
- Roc
- Remblai
- Surface libre

Interprétation de la caractérisation
du TCE dans l'eau souterraine
à Shannon, Québec, Canada

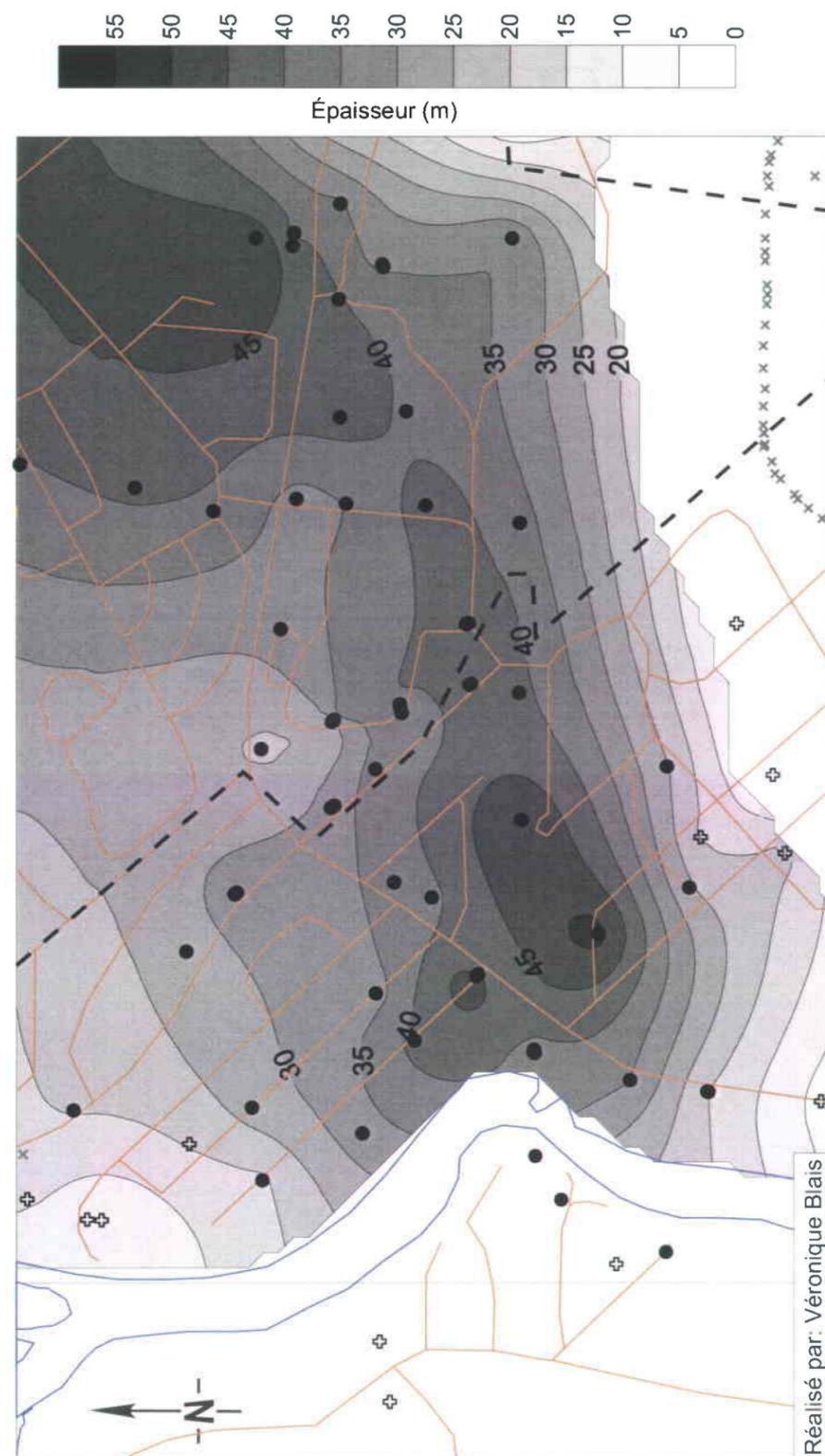
René Lefebvre, Véronique Blais,
Thomas Ouellon, Michel Parent
Jean-Marc Ballard et Cintia Racine

INRS, Centre - Eau Terre Environnement
RAPPORT FINAL
Juillet 2010

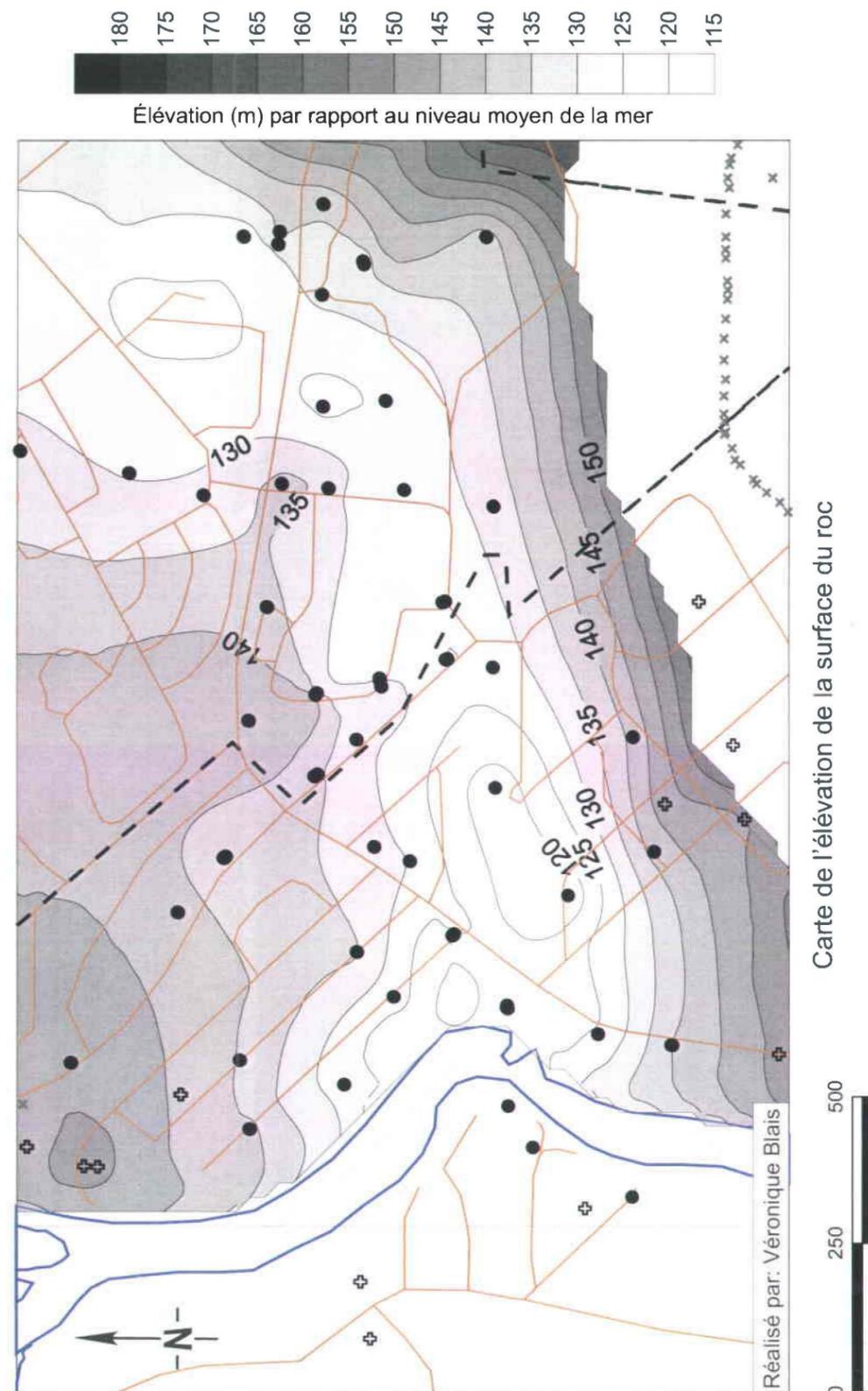
Planche 5
Épaisseur totale de
sédiments et élévation de la
surface du roc

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

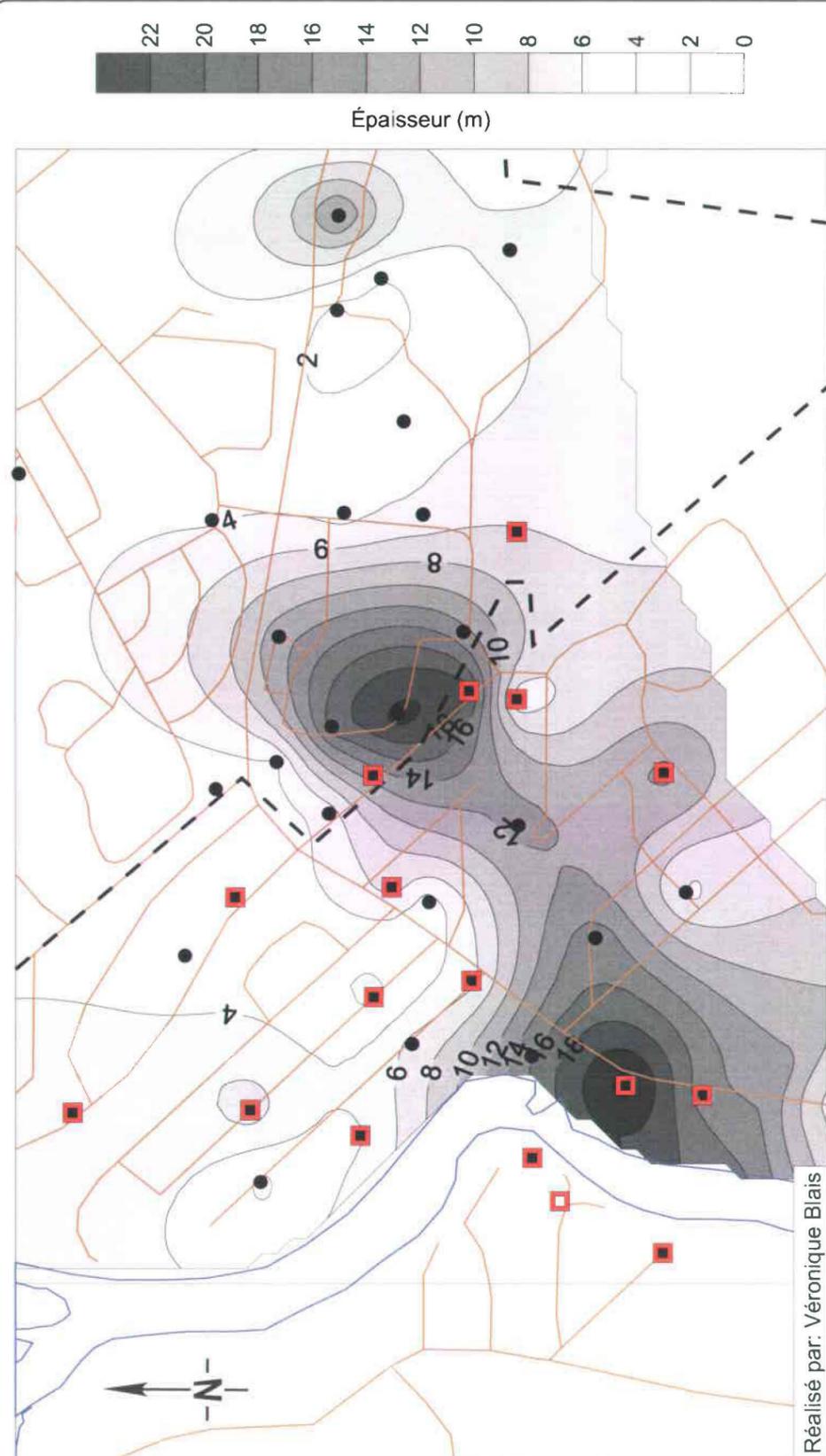
Échelle 1:10 000



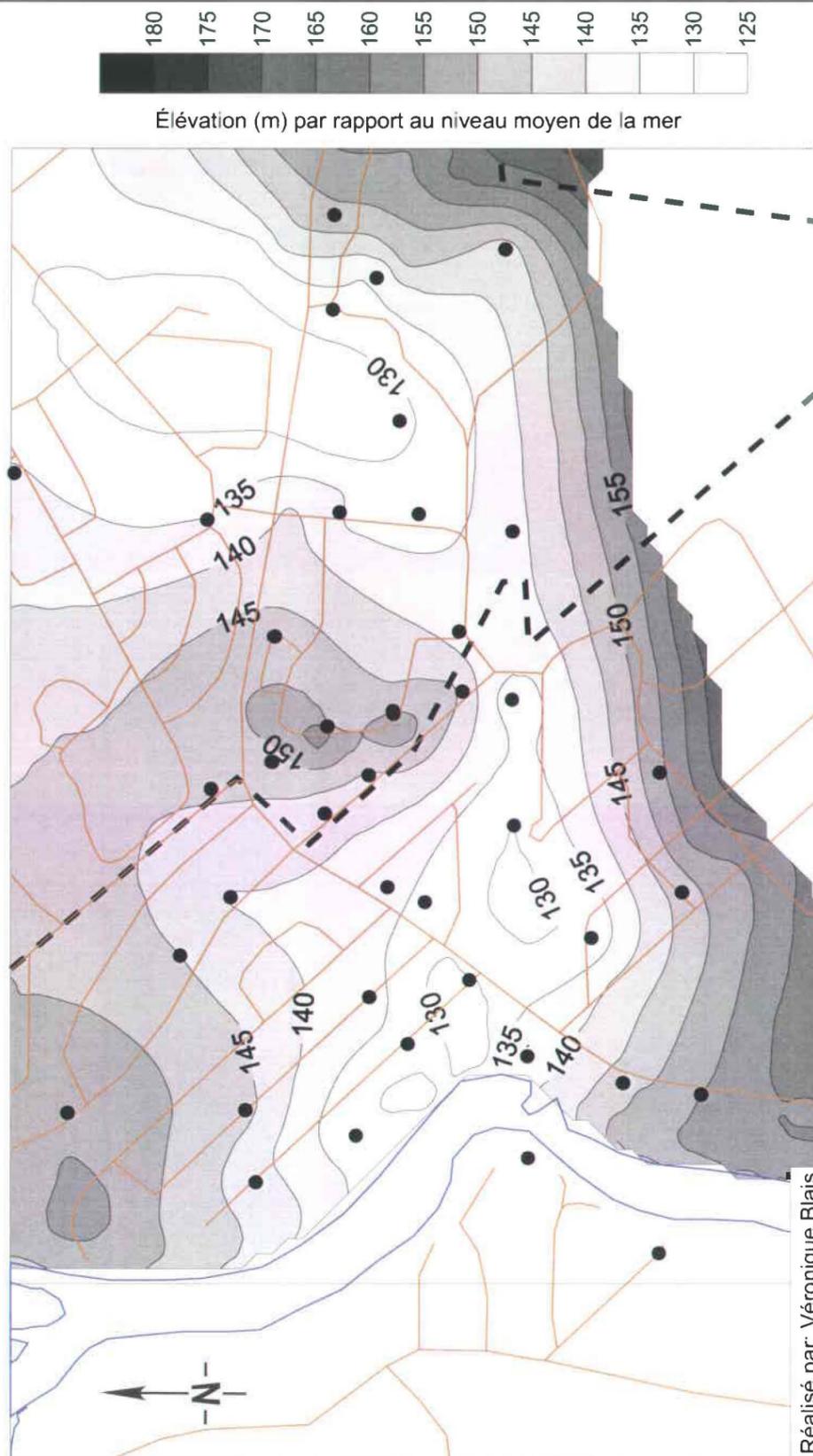
Carte de l'épaisseur totale de sédiments



Carte de l'élévation de la surface du roc



Carte de l'épaisseur de l'unité diamictions (incluant till)



Carte de l'élévation de la surface de l'unité diamictions



Interprétation de la caractérisation
du TCE dans l'eau souterraine
à Shannon, Québec, Canada

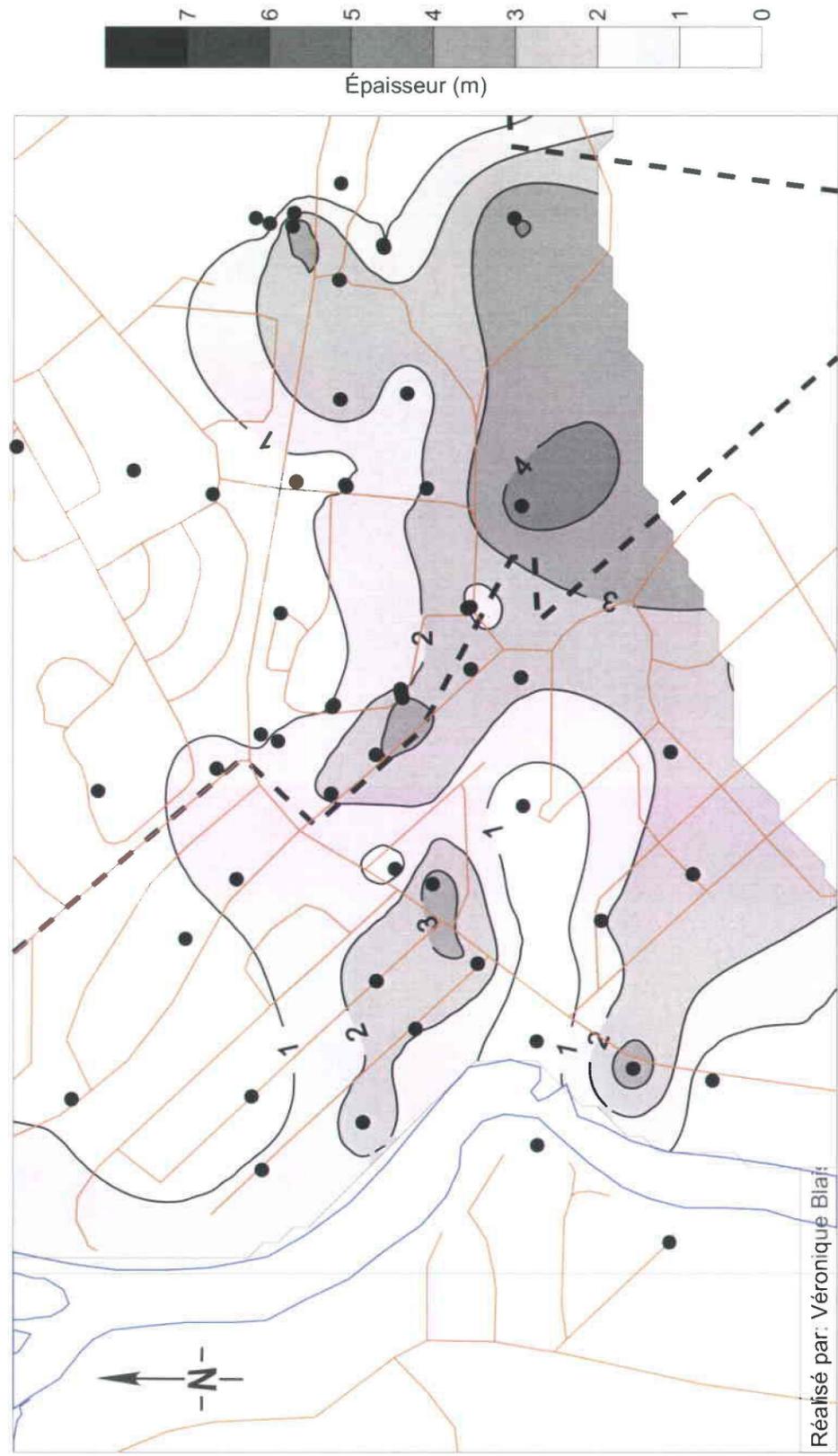
René Lefebvre, Véronique Blais,
Thomas Ouellon, Michel Parent
Jean-Marc Ballard et Cintia Racine

INRS, Centre - Eau Terre Environnement
RAPPORT FINAL
Juillet 2010

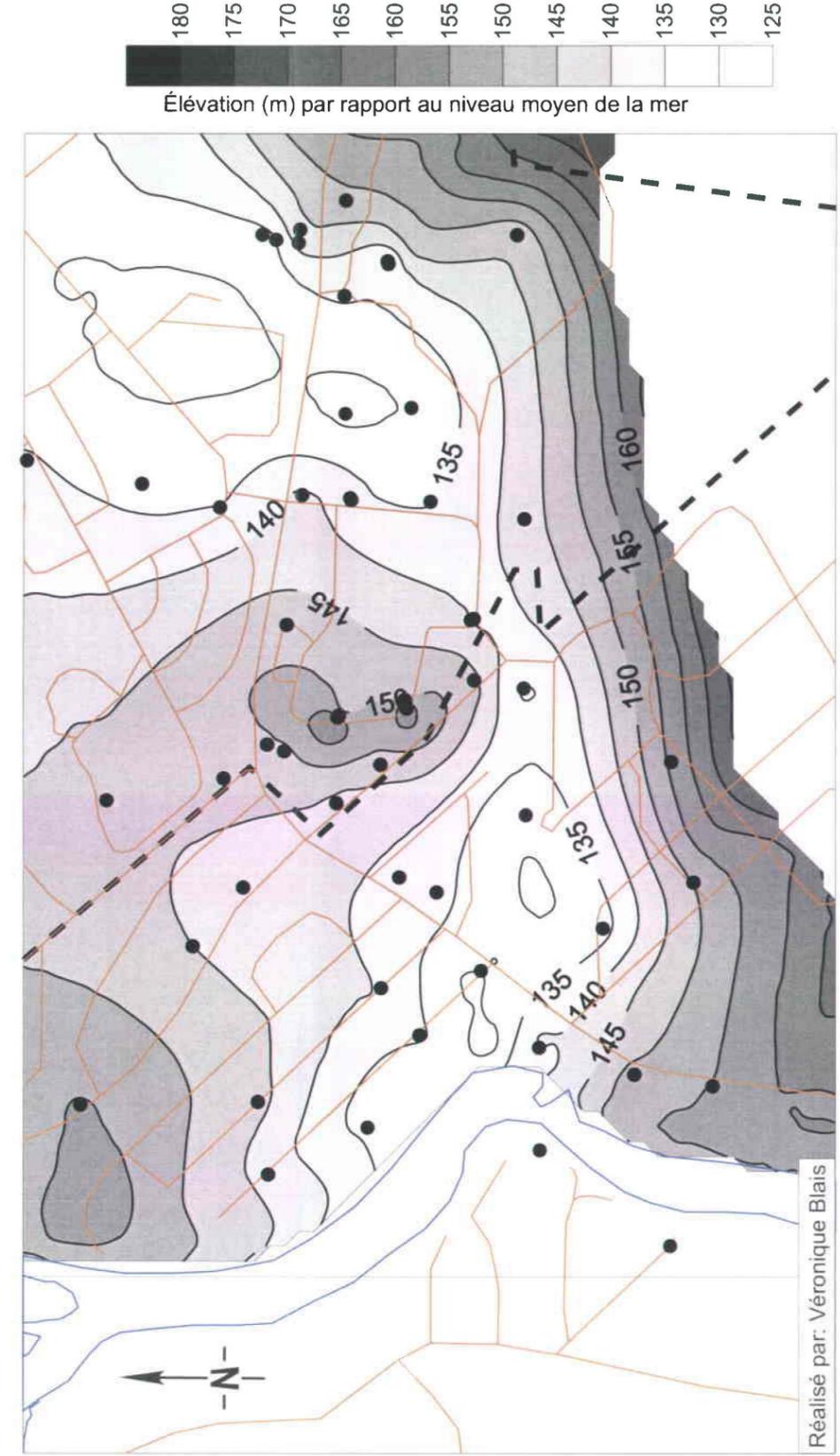
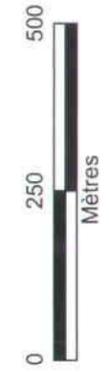
Planche 6

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

- Puits
- Forages avec blocs sur le roc
(Symbole superposé aux autres)



Carte de l'épaisseur de l'unité de silt glaciomarin



Carte de l'élévation de la surface de l'unité de silt glaciomarin



Interprétation de la caractérisation
du TCE dans l'eau souterraine
à Shannon, Québec, Canada

René Lefebvre, Véronique Blais,
Thomas Ouellon, Michel Parent
Jean-Marc Ballard et Cintia Racine

INRS, Centre - Eau Terre Environnement
RAPPORT FINAL
Juillet 2010

Planche 7
Épaisseur et élévation de la
surface de l'unité de
silt glaciomarin

● Puits

Interprétation de la caractérisation
du TCE dans l'eau souterraine
à Shannon, Québec, Canada

René Lefebvre, Véronique Blais,
Thomas Ouellon, Michel Parent
Jean-Marc Ballard et Cintia Racine

INRS, Centre - Eau Terre Environnement
RAPPORT FINAL
Juillet 2010

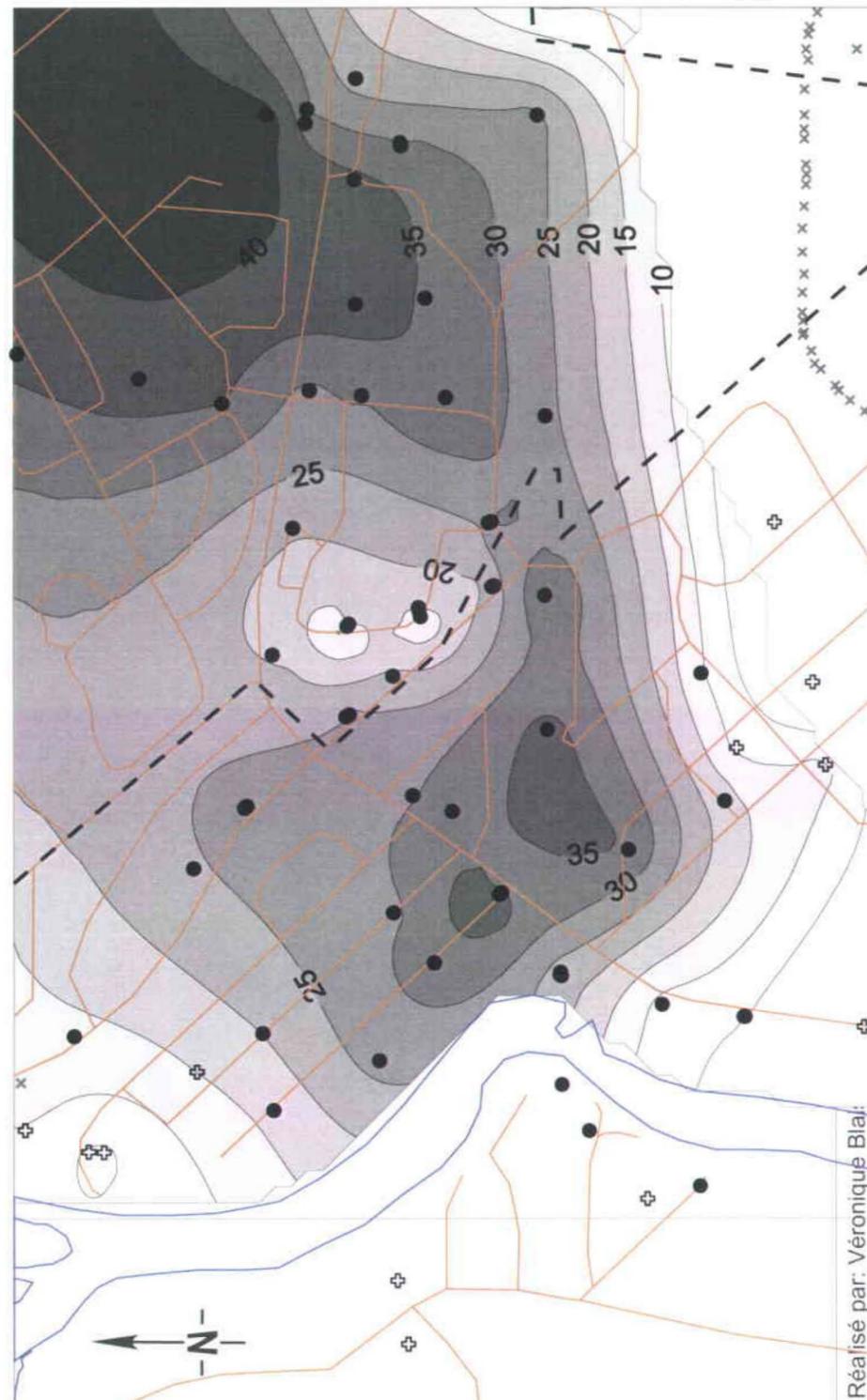
Planche 8
Épaisseur de l'unité de
sable deltaïque et élévation
de la surface du sol

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

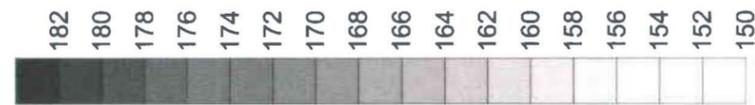
Échelle 1:10 000



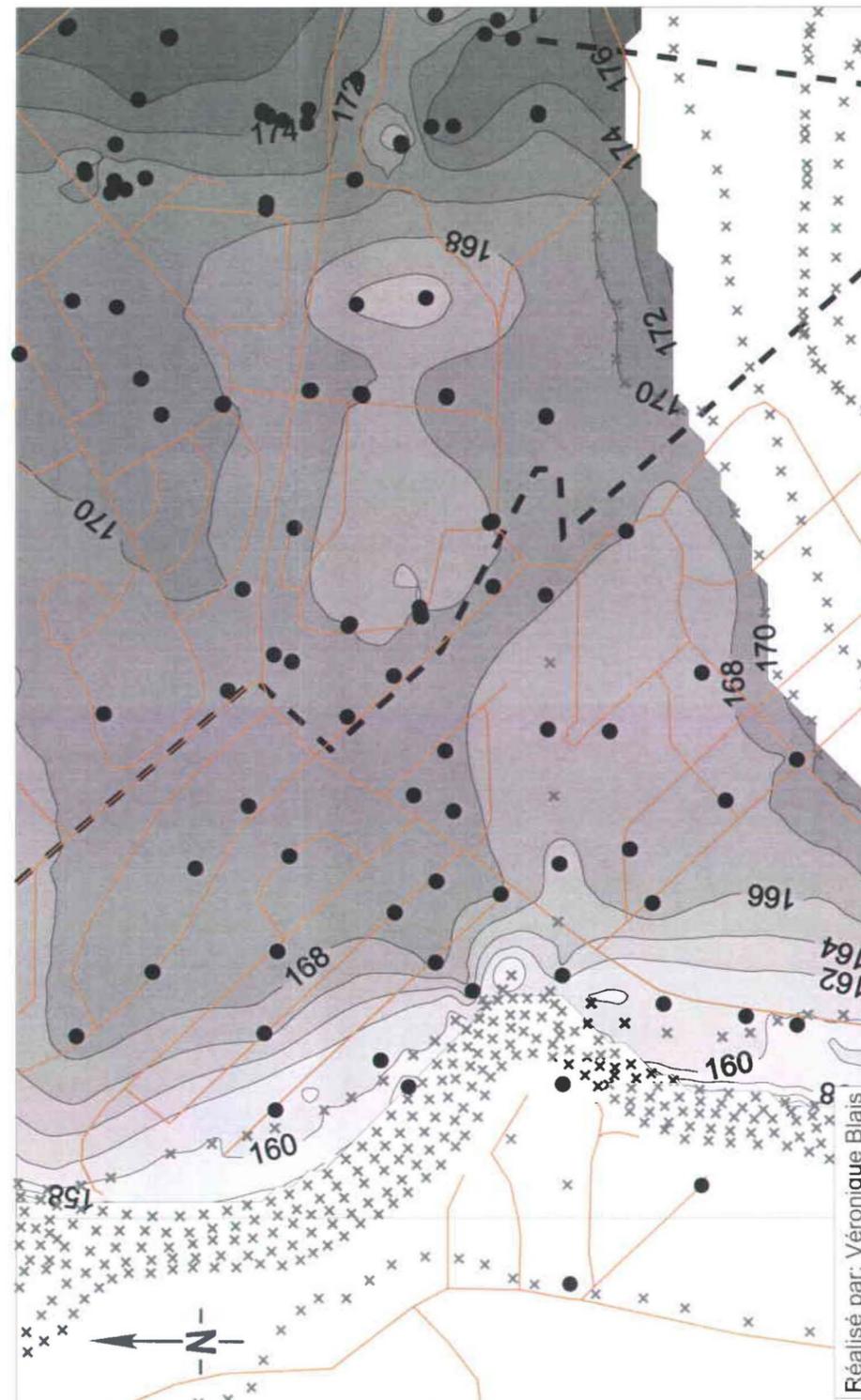
Épaisseur (m)



Carte de l'épaisseur de l'unité de sable deltaïque



Élévation (m) par rapport au niveau moyen de la mer



Carte de l'élévation de la surface du sol



Interprétation de la caractérisation
du TCE dans l'eau souterraine
à Shannon, Québec, Canada

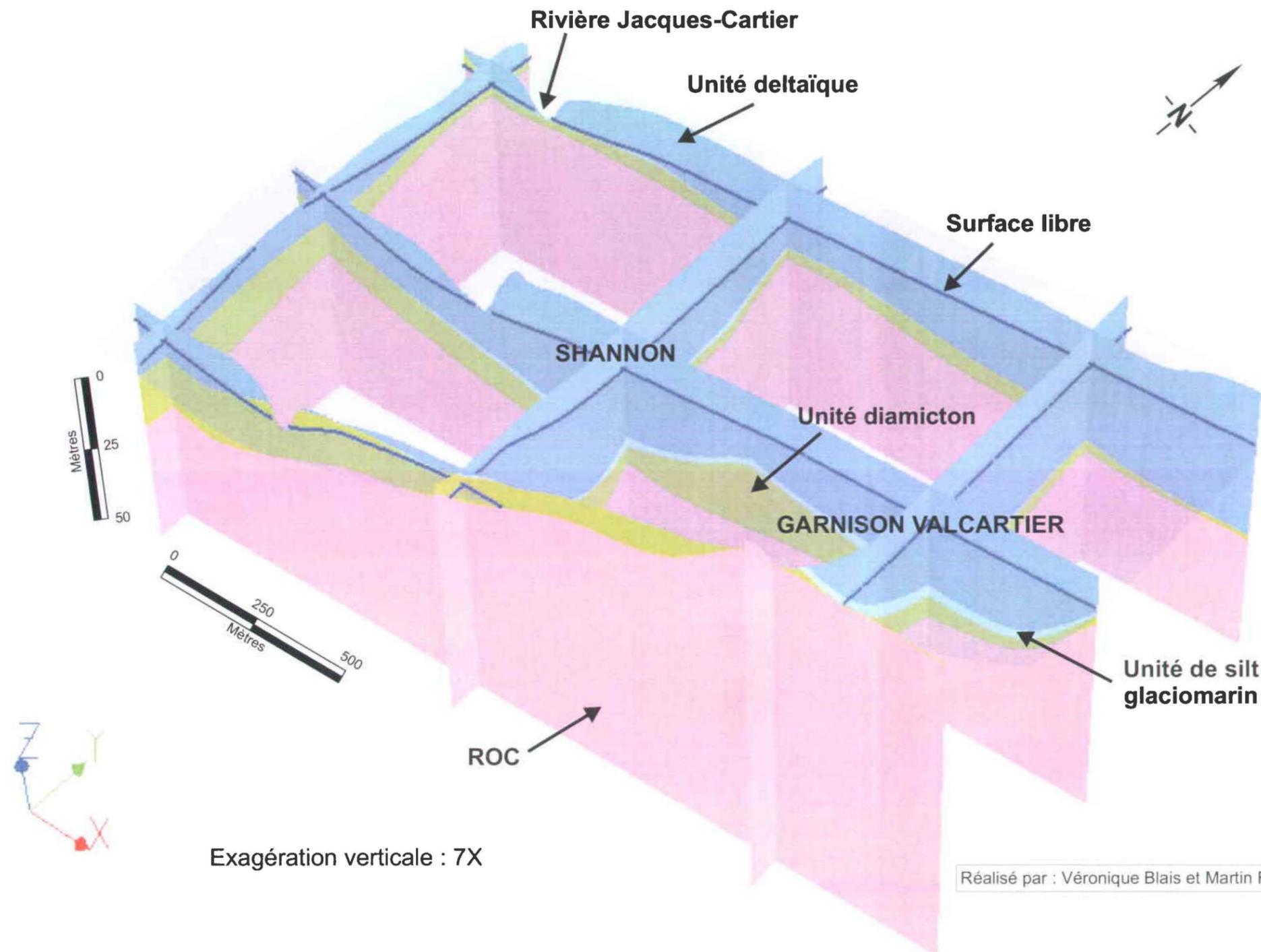
René Lefebvre, Véronique Blais,
Thomas Ouellon, Michel Parent
Jean-Marc Ballard et Cintia Racine

INRS, Centre - Eau Terre Environnement
RAPPORT FINAL
Juillet 2010

Planche 9
Modèle géologique en
trois dimensions

Unités géologiques :

-  Deltaïque
-  Glaciomarin
-  Diamictons
-  Roc



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

Interprétation de la caractérisation
du TCE dans l'eau souterraine
à Shannon, Québec, Canada

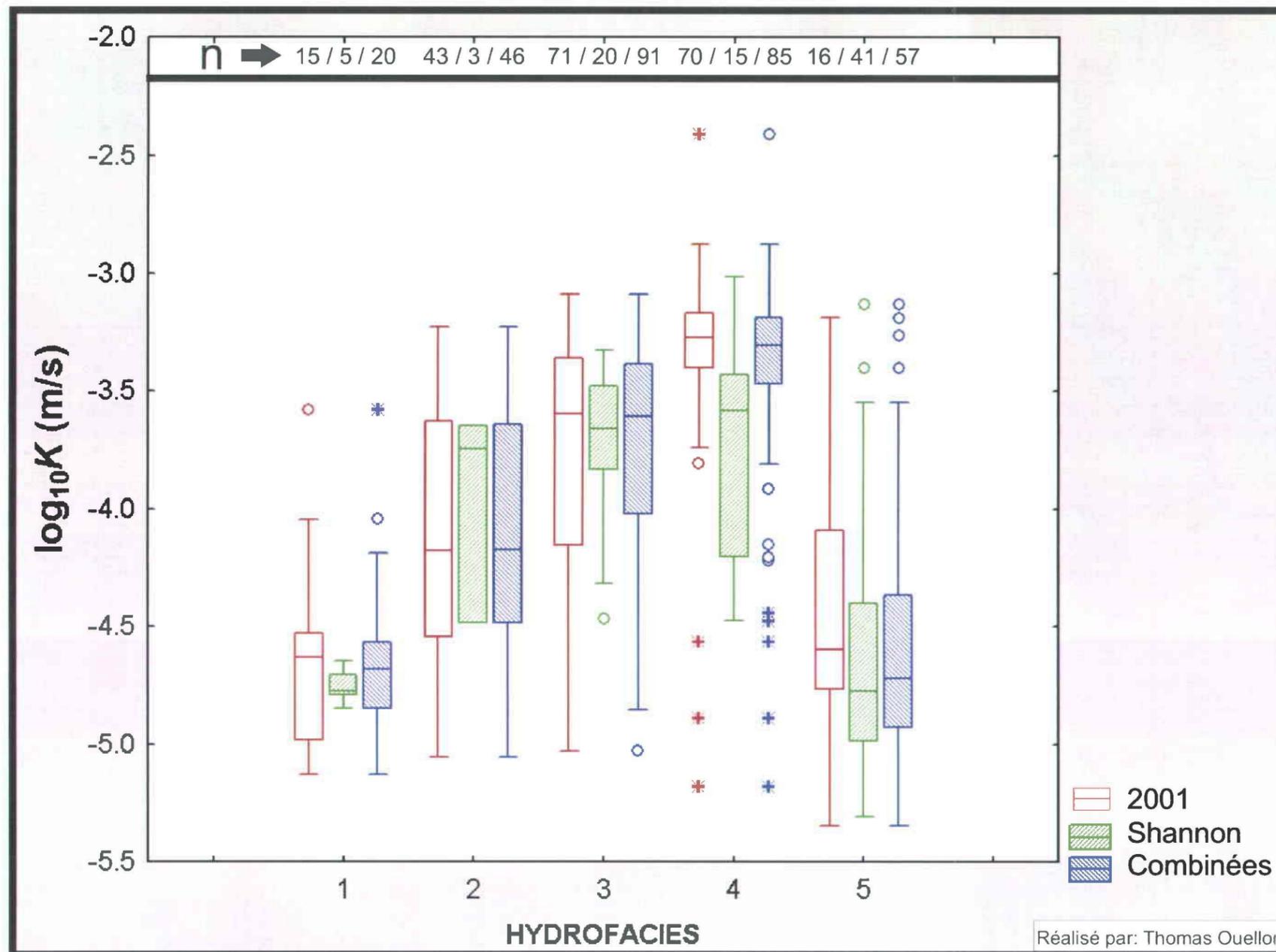
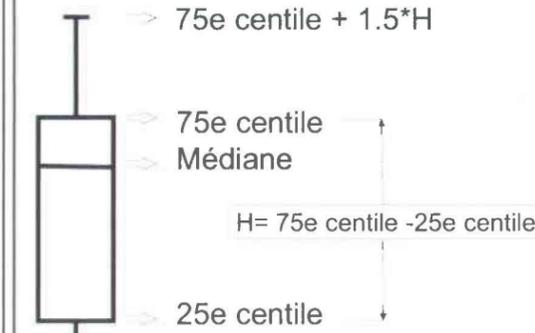
René Lefebvre, Véronique Blais,
Thomas Ouellon, Michel Parent
Jean-Marc Ballard et Cintia Racine

INRS, Centre - Eau Terre Environnement
RAPPORT FINAL
Avril 2010

Planche 10

Propriétés hydrauliques
des unités

- * \Rightarrow Mesure $> 75^{\text{e}}$ centile $+ 3 \cdot H$
- \Rightarrow Mesure $> 75^{\text{e}}$ centile $+ 1.5 \cdot H$
- \Rightarrow 75e centile $+ 1.5 \cdot H$
- \Rightarrow 75e centile
- \Rightarrow Médiane
- \Rightarrow 25e centile
- \Rightarrow 25e centile $- 1.5 \cdot H$
- \Rightarrow Mesure $< 25^{\text{e}}$ centile $- 1.5 \cdot H$
- * \Rightarrow Mesure $< 25^{\text{e}}$ centile $- 3 \cdot H$



Réalisé par: Thomas Ouellon

HYDROFACIES*

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5

DESCRIPTION

- 1 Argiles, silts et silts sableux
- 2 Sables silteux
- 3 Sables fins à moyens
- 4 Sables moyens à grossiers, sables graveleux, graviers sableux, graviers
- 5 Diamictons

* Tels que définis par Ouellon et al. (2005)

Distribution de la conductivité hydraulique pour les hydrofaciès des unités deltaïque et diamictons.
Comparaison des données de Shannon en 2004 avec celles obtenues dans le secteur Valcartier en 2001

Interprétation de la caractérisation
du TCE dans l'eau souterraine
à Shannon, Québec, Canada

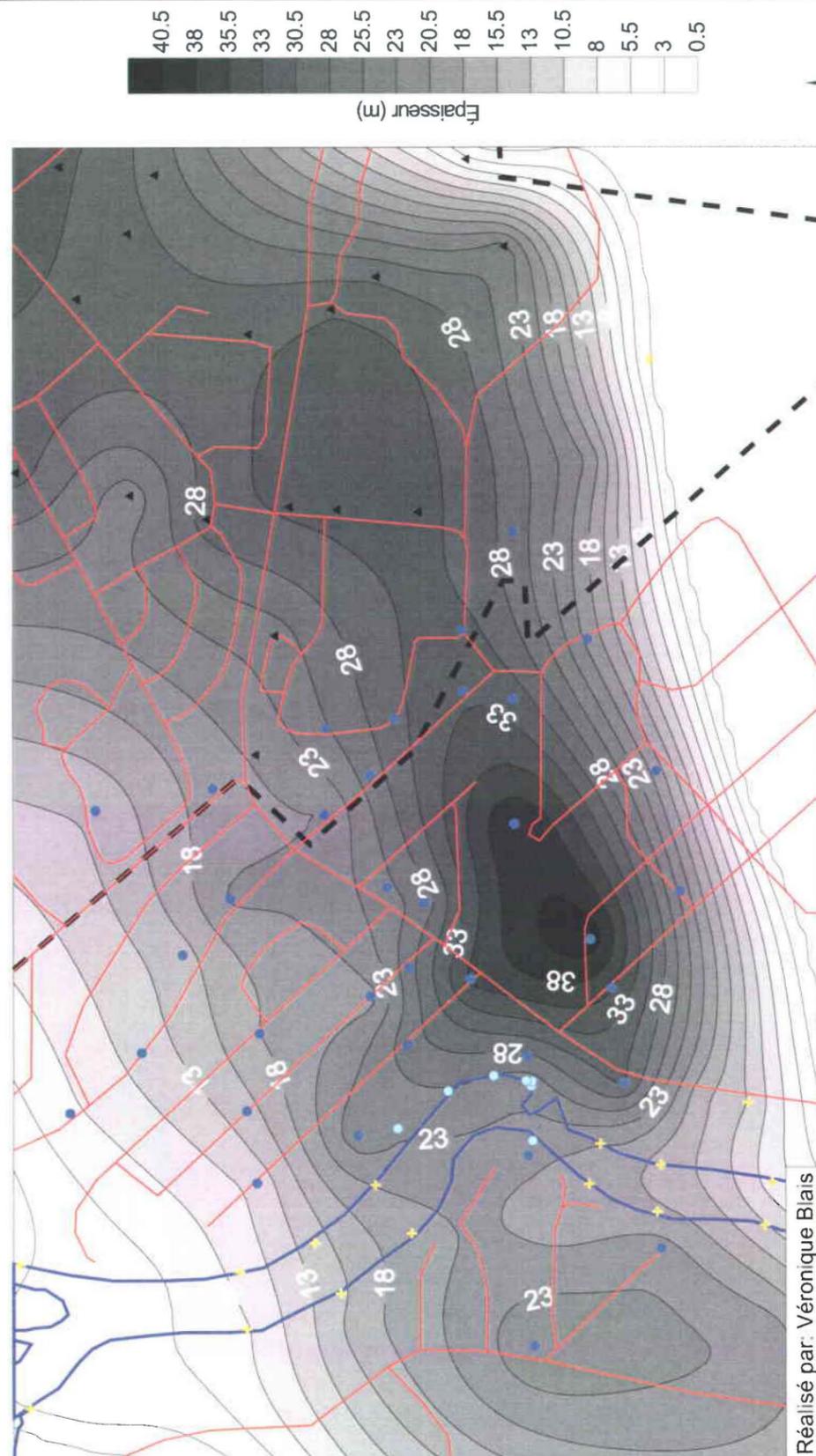
René Lefebvre, Véronique Blais,
Thomas Ouellon, Michel Parent
Jean-Marc Ballard et Cintia Racine

INRS, Centre - Eau Terre Environnement
RAPPORT FINAL
Juillet 2010

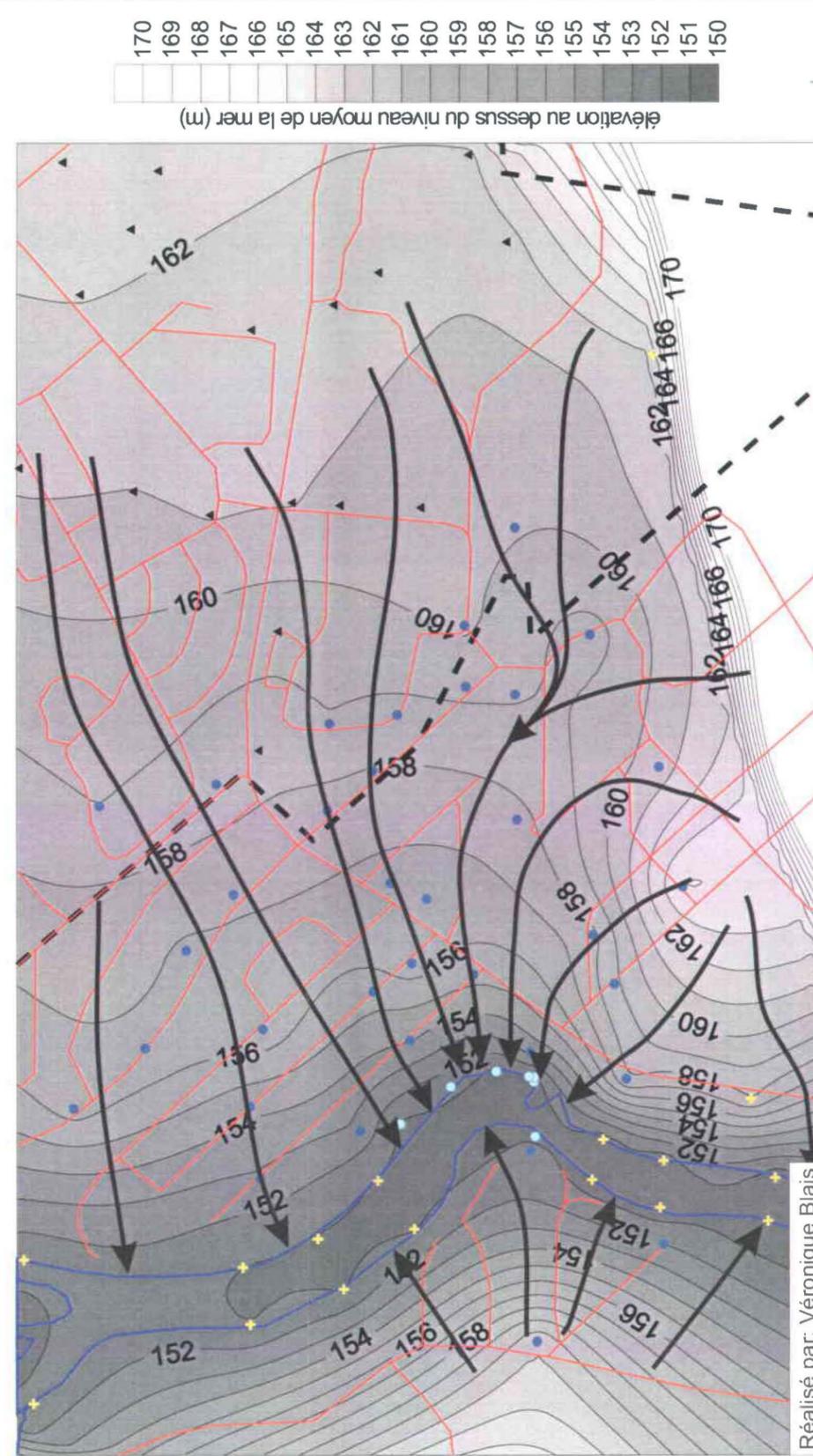
Planche 11
Surface libre et
épaisseur saturée
en 2004-2005

- Puits Shannon 2004
- Contrôles rivière JC 2004
- ▲ Puits Garrison
- ★ Contrôles manuels
- ➔ Direction générale d'écoulement de l'eau souterraine

Échelle 1:10 000



Carte de l'épaisseur totale saturée des dépôts meubles



Carte de l'élévation de la surface libre

Interprétation de la caractérisation
du TCE dans l'eau souterraine
à Shannon, Québec, Canada

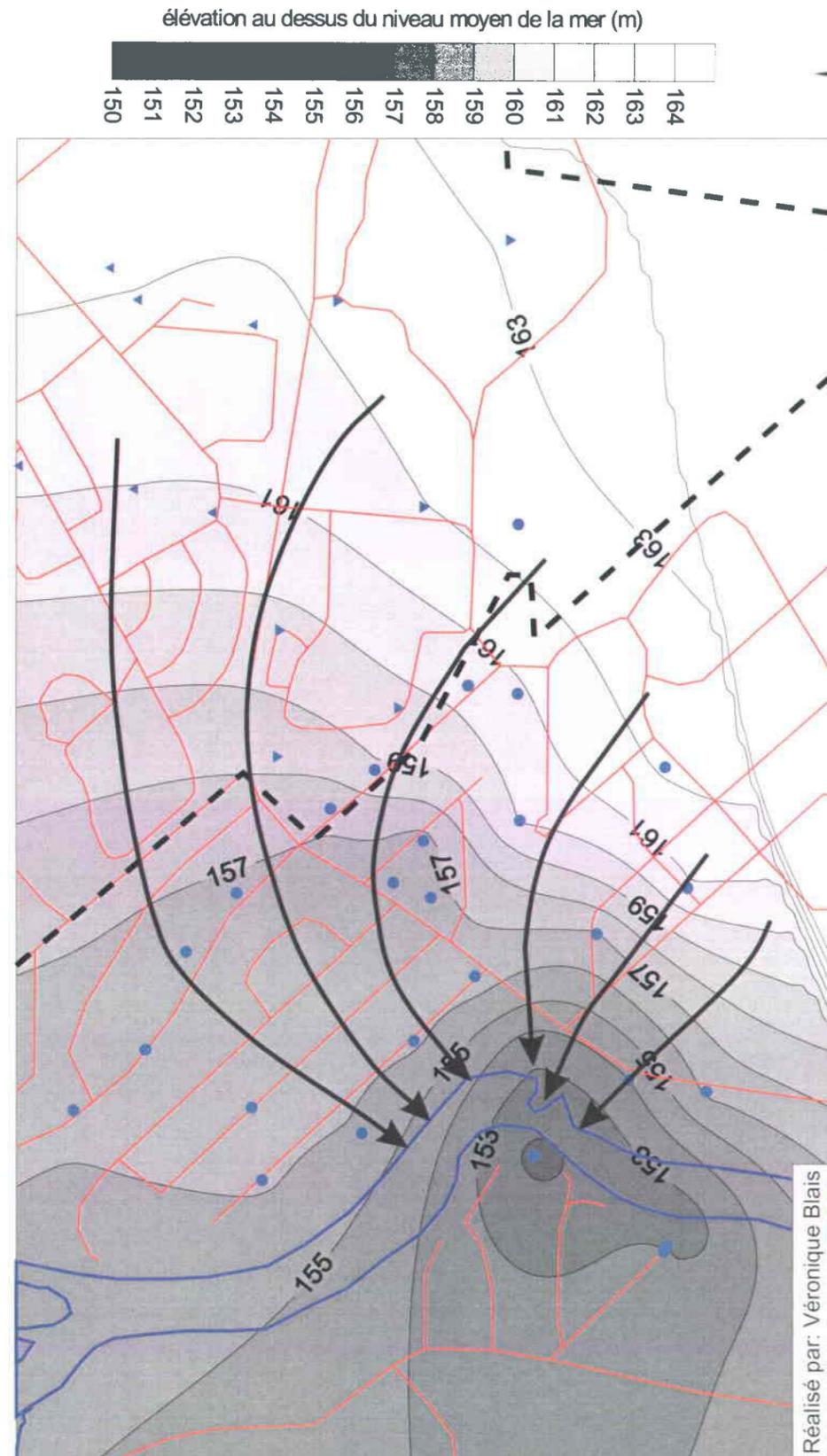
René Lefebvre, Véronique Blais,
Thomas Ouellon, Michel Parent
Jean-Marc Ballard et Cintia Racine

INRS, Centre - Eau Terre Environnement
RAPPORT FINAL
Juillet 2010

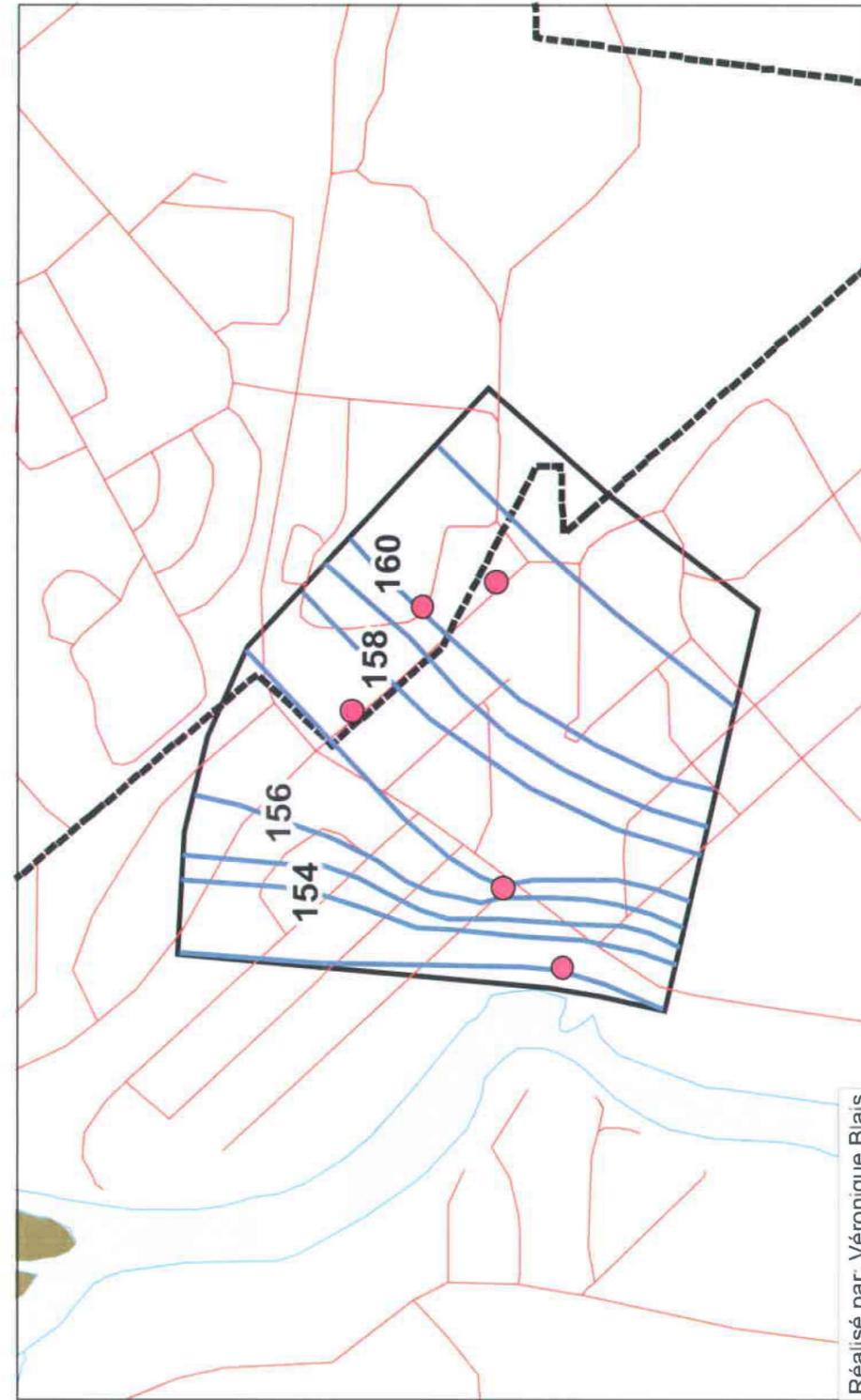
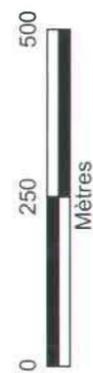
Planche 12
Piézométrie de l'unité
diamictons et du roc
en 2004-2005

- Contrôles dans diamictons (Shannon, 2004)
- ▼ Contrôles dans diamictons, avec silt glaciomarin (Garnison, 2001)
- ▲ Contrôles dans zone sans silt glaciomarin (Garnison, 2001)
- Contrôles au roc (Shannon, 2004)
- ➔ Direction générale d'écoulement de l'eau souterraine

Échelle 1:10 000



Carte piézométrique de l'unité diamictons



Carte piézométrique du roc



Interprétation de la caractérisation
du TCE dans l'eau souterraine
à Shannon, Québec, Canada

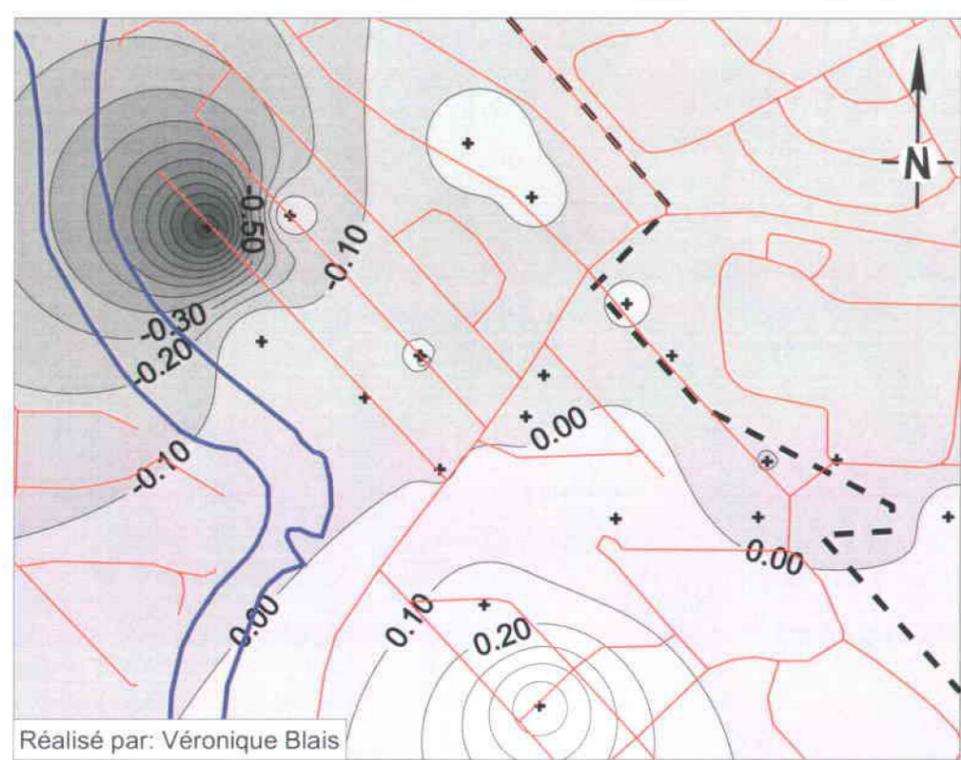
René Lefebvre, Véronique Blais,
Thomas Ouellon, Michel Parent
Jean-Marc Ballard et Cintia Racine

INRS, Centre - Eau Terre Environnement
RAPPORT FINAL
Juillet 2010

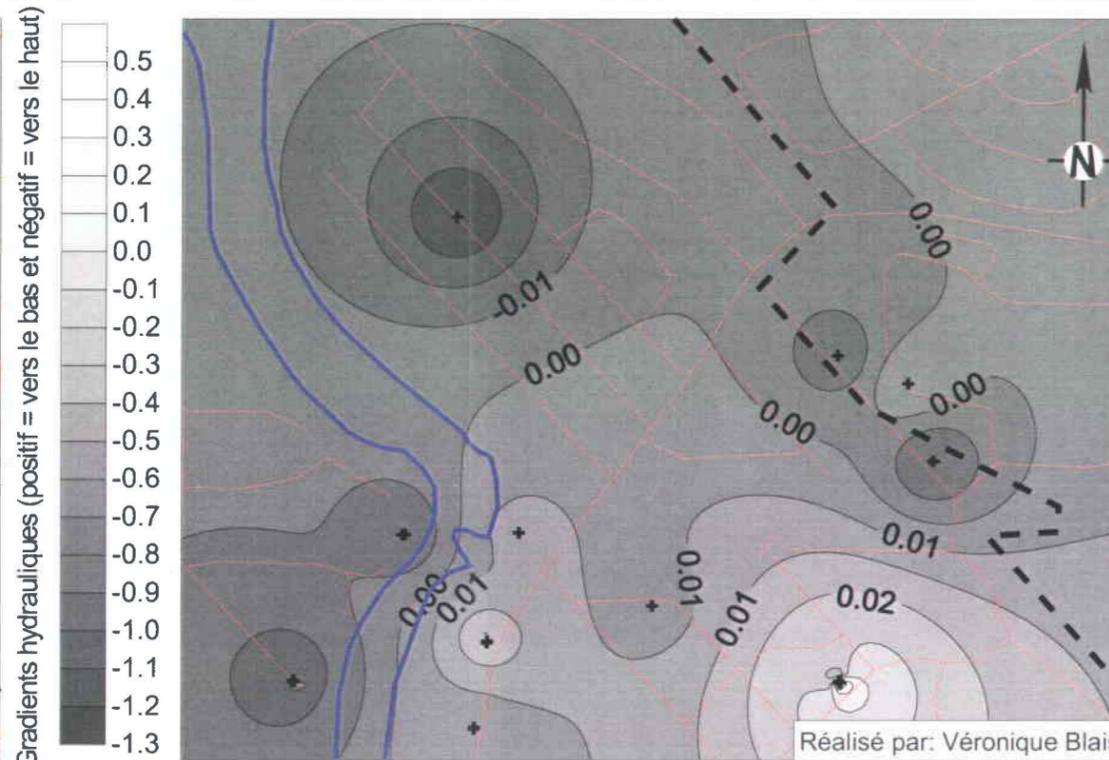
Planche 13
Gradients hydrauliques
verticaux en 2004-2005

✦ Points de contrôles 2004

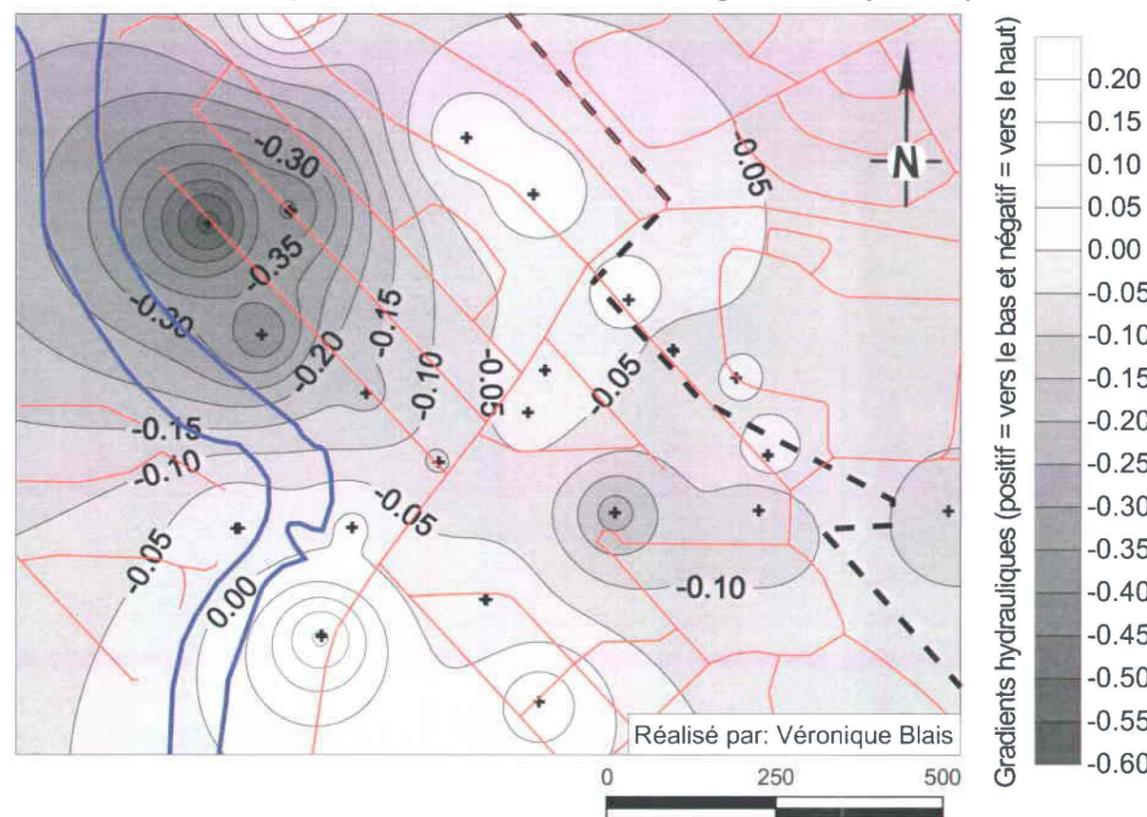
Échelle 1:10 000



Carte des gradients hydrauliques verticaux dans l'unité deltaïque



Carte des gradients hydrauliques verticaux dans l'unité diamictons



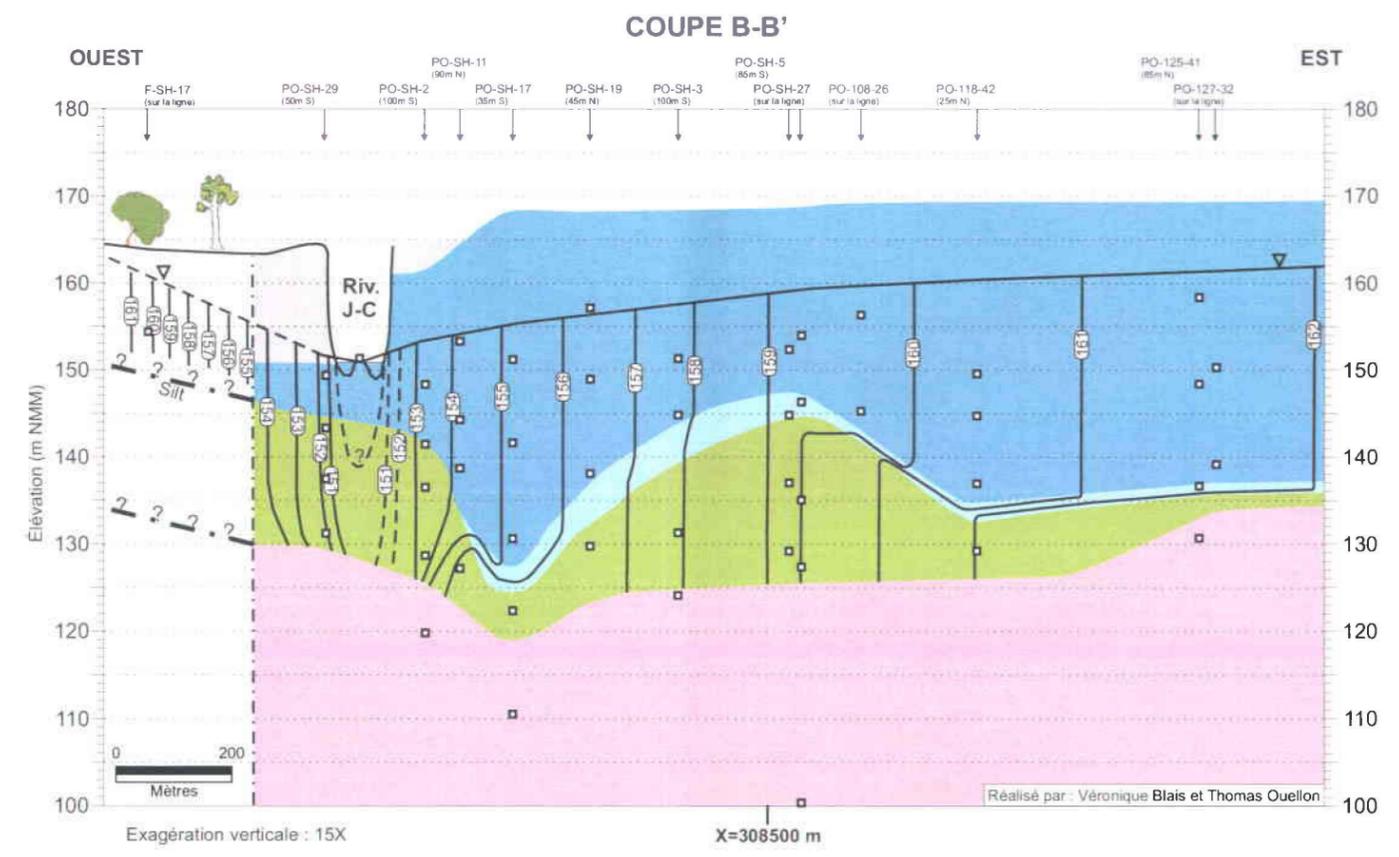
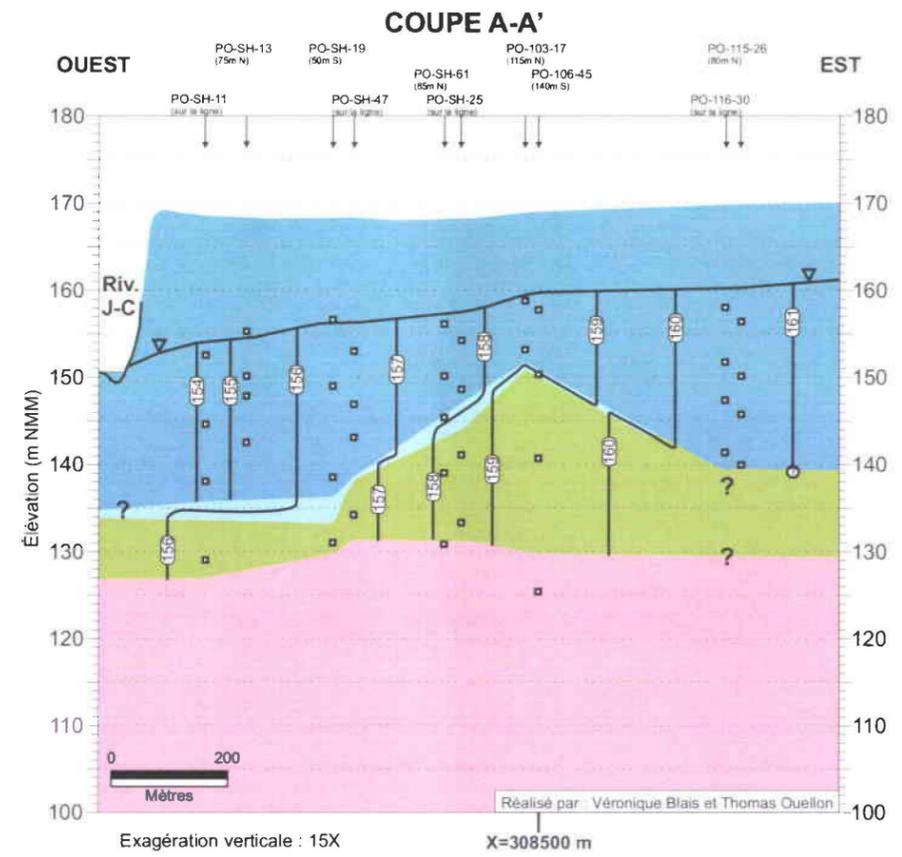
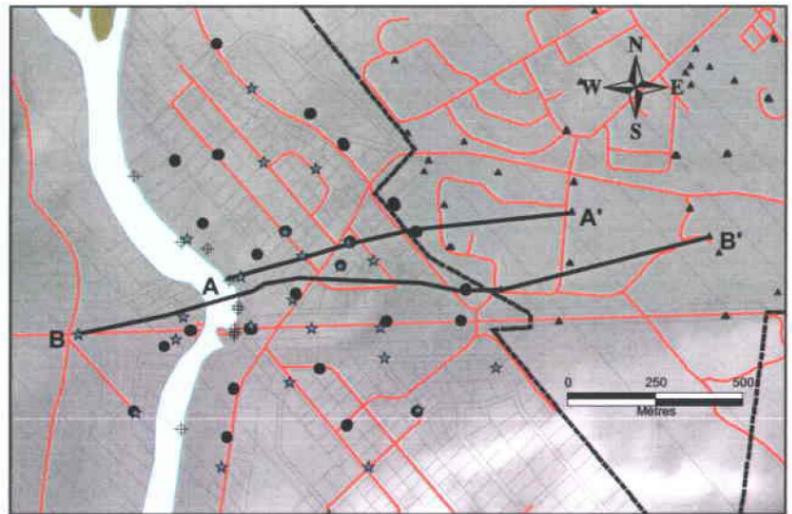
Carte des gradients hydrauliques verticaux entre l'unité deltaïque et l'unité diamictons

Interprétation de la caractérisation
du TCE dans l'eau souterraine
à Shannon, Québec, Canada

René Lefebvre, Véronique Blais,
Thomas Ouellon et Michel Parent

INRS-Eau, Terre et Environnement
RAPPORT FINAL
Juillet 2010

Localisation des coupes piézométriques



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

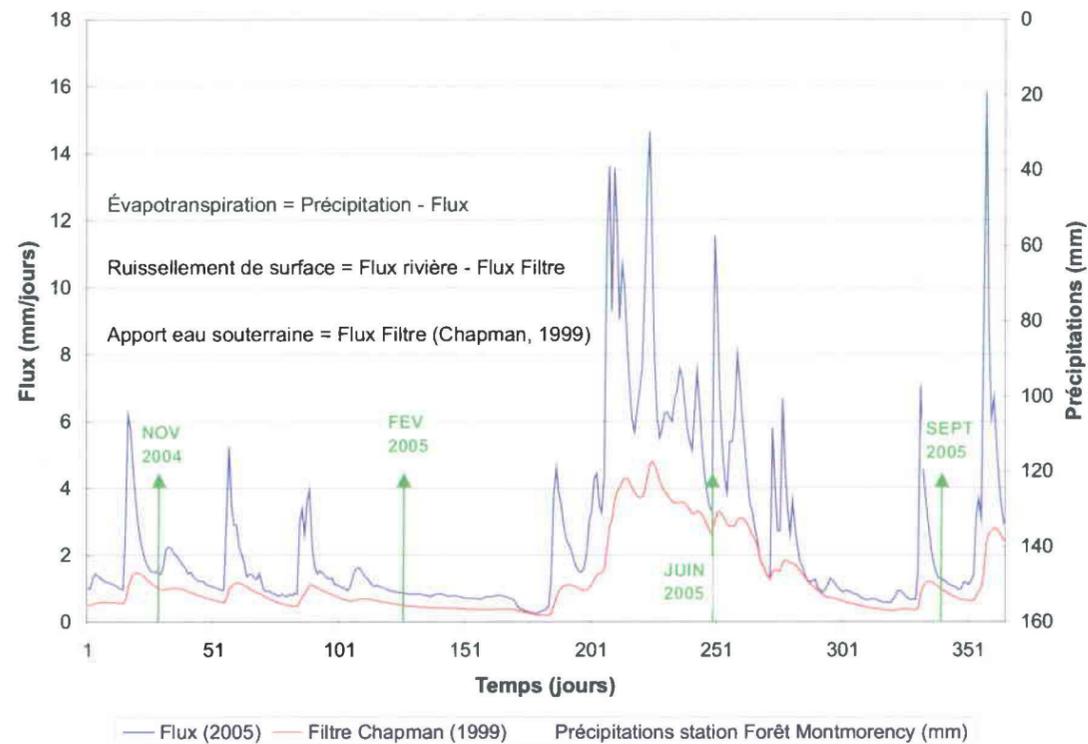
Planche 14
Coupes piézométriques
en 2004-2005

Coupes piézométriques :

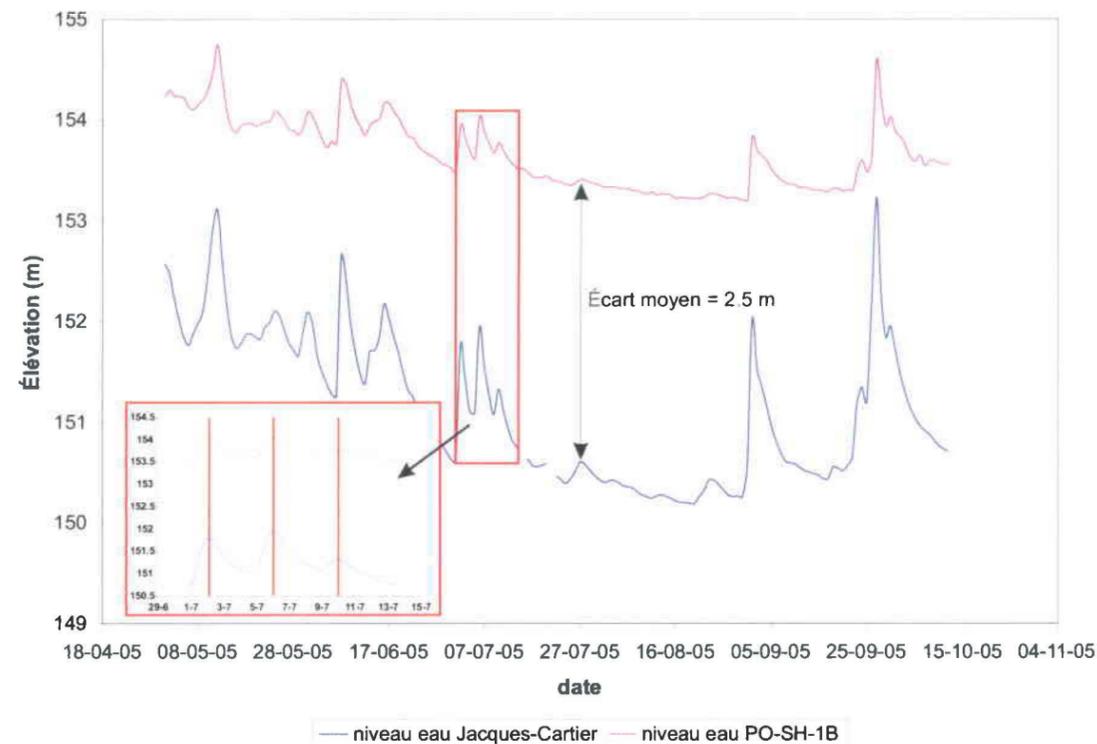
- Points de contrôles
- (161) Niveau piézométrique
- Ligne piézométrique (Incertaine en pointillé)

Localisation :

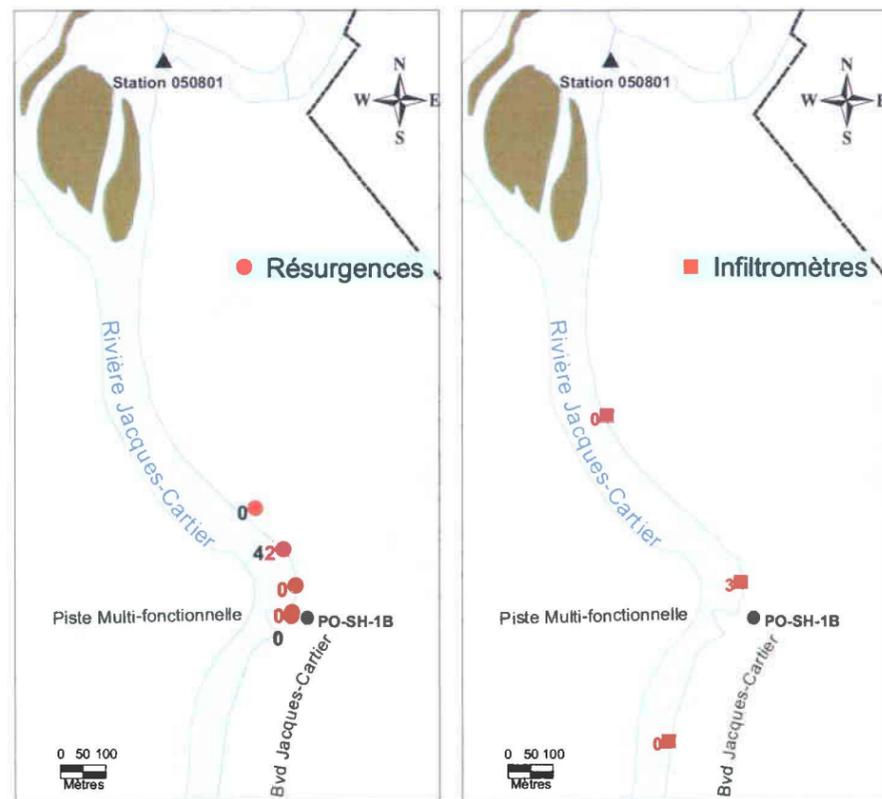
- ★ Geoprobe 2004
- Puits d'observation 2004
- ▲ Puits d'observation 2001
- ⊕ Contrôles Jacques-Cartier
- Limite de propriété
- Routes
- localisation coupes



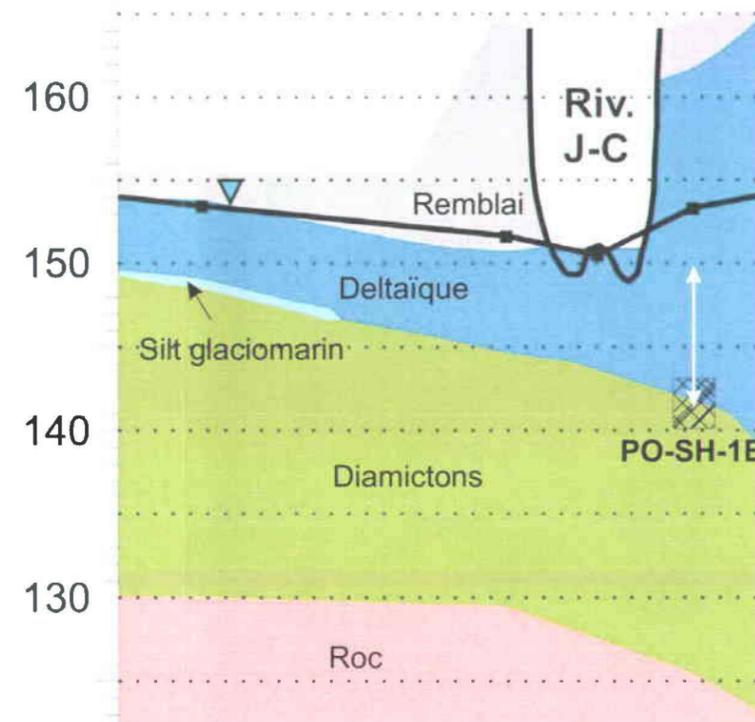
A) Séparation de l'hydrogramme de la rivière Jacques-Cartier en 2004-2005



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



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



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

Interprétation de la caractérisation
du TCE dans l'eau souterraine
à Shannon, Québec, Canada

René Lefebvre, Véronique Blais,
Thomas Ouellon, Michel Parent
Jean-Marc Ballard et Cintia Racine

INRS, Centre - Eau Terre Environnement
RAPPORT FINAL
Juillet 2010

Planche 15
Hydrologie de la rivière
Jacques-Cartier

Note: les chiffres sur les
cartes à la figure C indiquent
les concentrations en
TCE ($\mu\text{g/L}$)

Interprétation de la caractérisation
du TCE dans l'eau souterraine
à Shannon, Québec, Canada

René Lefebvre, Véronique Blais,
Thomas Ouellon, Michel Parent
Jean-Marc Ballard et Cintia Racine

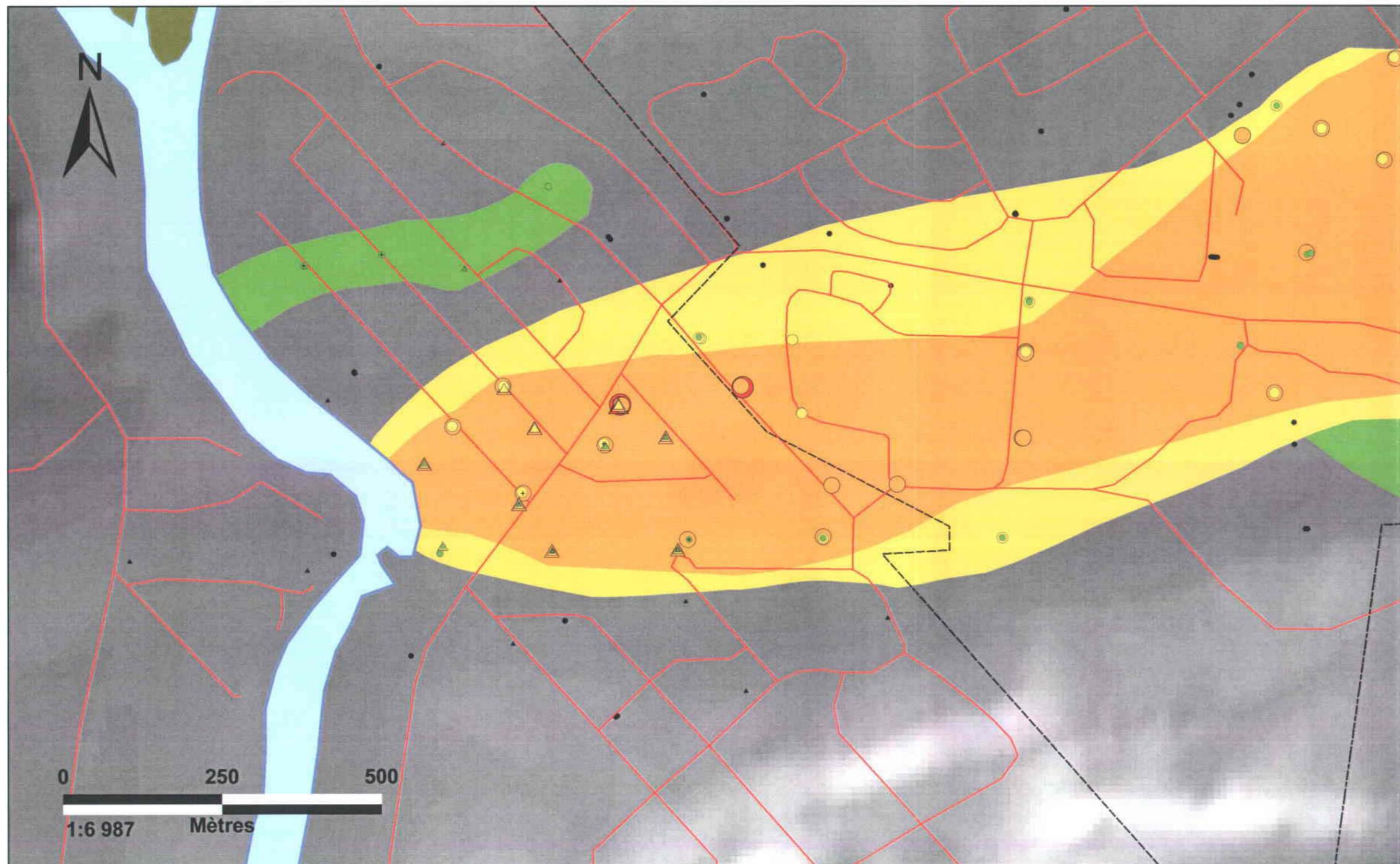
INRS, Centre - Eau Terre Environnement
RAPPORT FINAL
Juillet 2010

Planche 16
Panache de TCE local
en 2004-2005

- Données [TCE] - Puits
- ▲ Données [TCE] - Sondages

- Limite de détection <[TCE]< 5 µg/L
- 5 <[TCE]< 50 µg/L
- 50 <[TCE]< 590 µg/L
- [TCE] > 590 µg/L

? Extension du panache et concentrations
inconnues ou incertaines

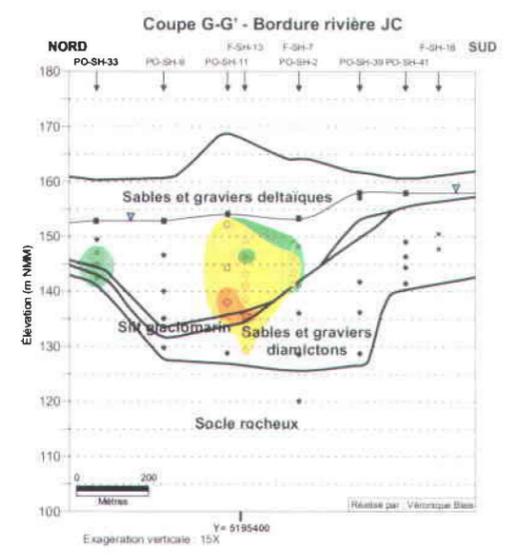
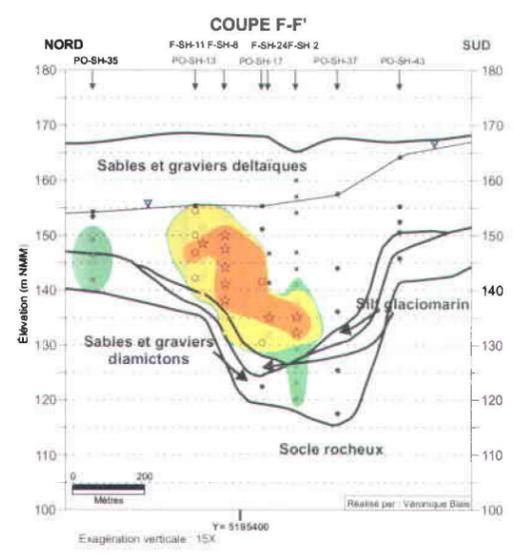
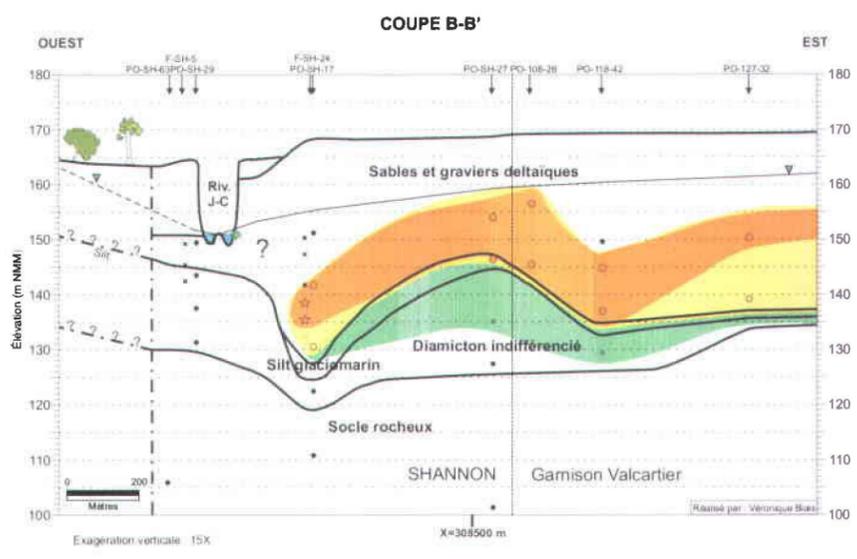
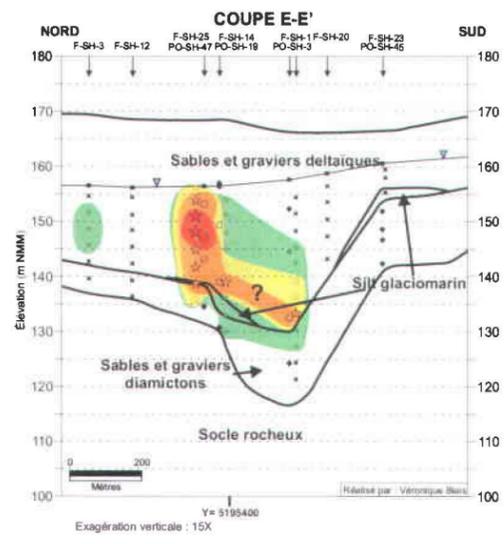
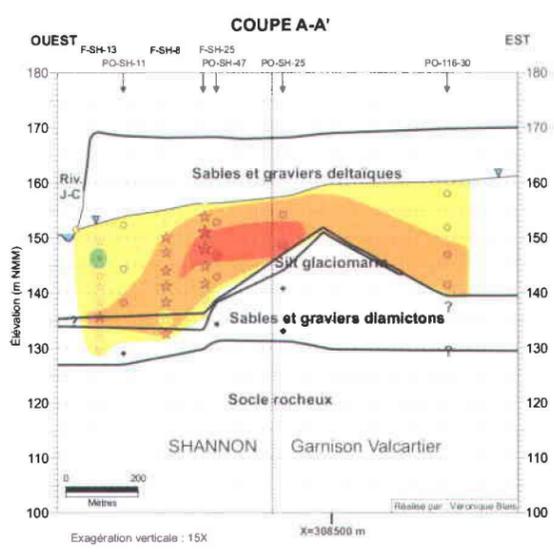
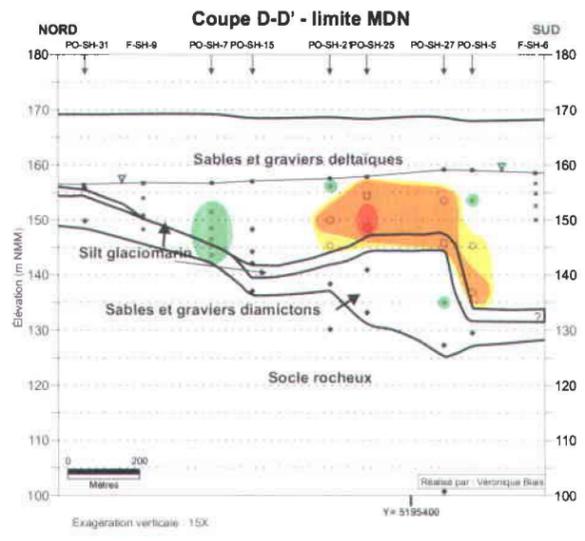


Modèle numérique de terrain produit par le LCNP

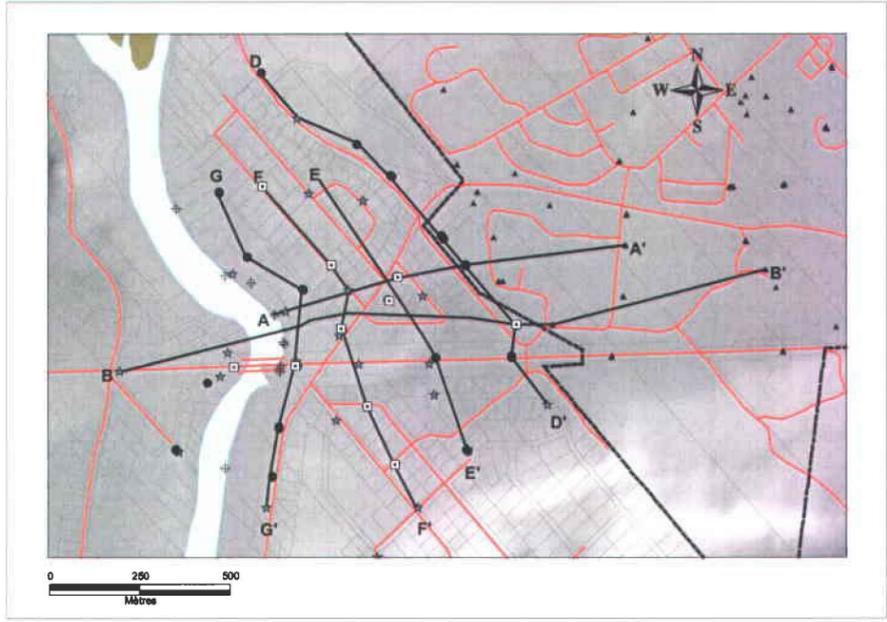


- 1- Les zones hachurées ont des concentrations couvrant les plages des deux couleurs utilisées
- 2- Les couleurs des points correspondent aux mêmes plages de concentrations que les couleurs des zones du panache

Modèle numérique de terrain utilisé comme fond de carte



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')

Interprétation de la caractérisation
du TCE dans l'eau souterraine
à Shannon, Québec, Canada

René Lefebvre, Véronique Blais,
Thomas Ouelton, Michel Parent
Jean-Marc Ballard et Cintia Racine

INRS, Centre - Eau Terre Environnement
RAPPORT FINAL
Juillet 2010

Planche 17
Coupes de la
contamination en TCE
en 2004-2005

Contamination Geoprobe :

- x non détecté
- ★ détecté à 5 ug/L
- ★ 5 à 50 ug/L
- ★ 50 à 590 ug/L
- ★ > 590 ug/L

Contamination Puits :

- + non détecté
- détecté à 5 ug/L
- 5 à 50 ug/L
- 50 à 590 ug/L
- > 590 ug/L

Panaches :

- détecté à 5 ug/L
- 5 à 50 ug/L
- 50 à 590 ug/L
- > 590 ug/L

▽ Surface libre

Interprétation de la caractérisation
du TCE dans l'eau souterraine
à Shannon, Québec, Canada

René Lefebvre, Véronique Blais,
Thomas Ouellon, Michel Parent
Jean-Marc Ballard et Cintia Racine

INRS, Centre - Eau Terre Environnement
RAPPORT FINAL
Juillet 2010

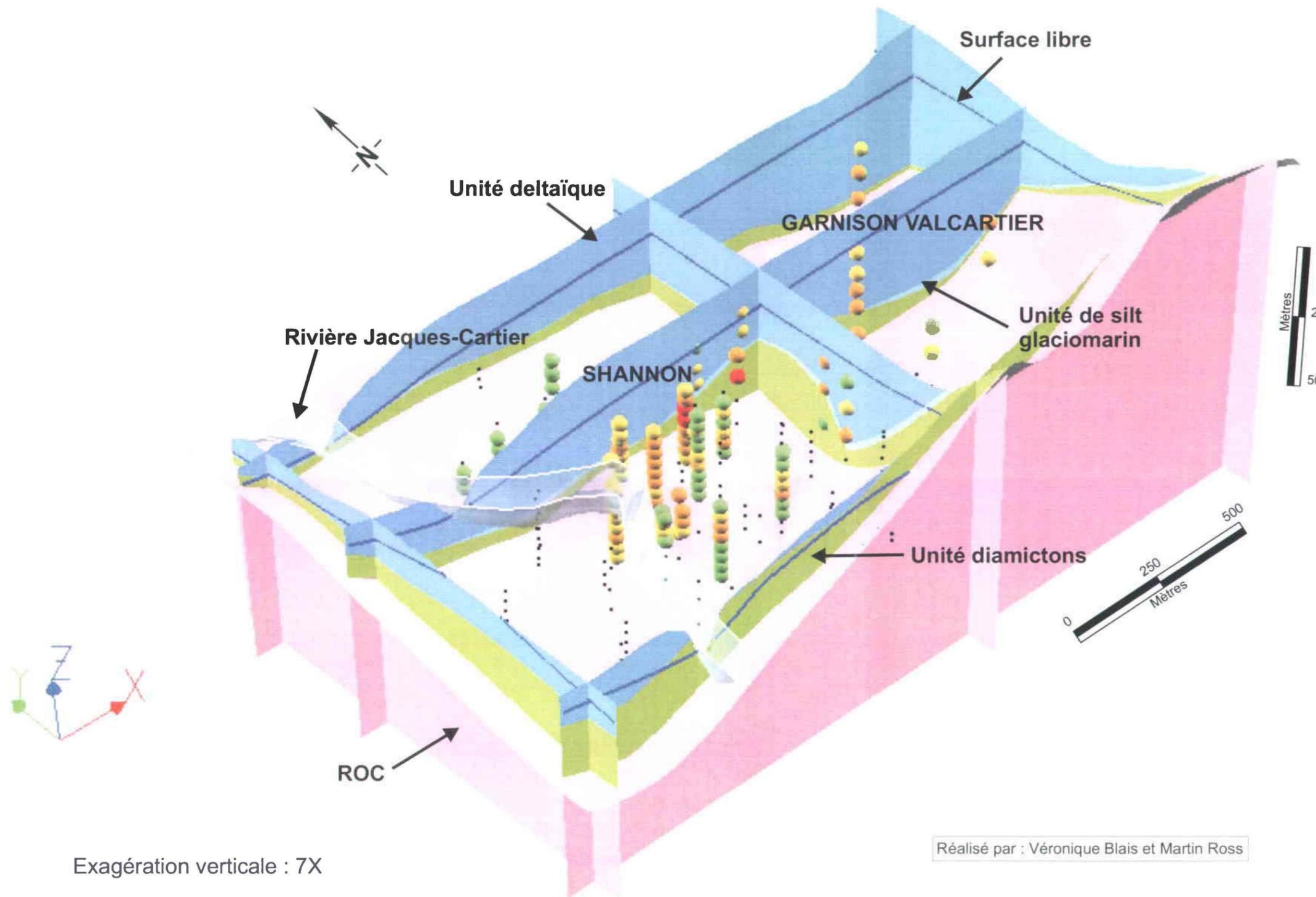
Planche 18
Distribution de la
contamination du TCE
en 2004-2005 dans
le modèle géologique 3D

Unités géologiques :

- Deltaïque
- Glaciomarin
- Diamictons
- Roc

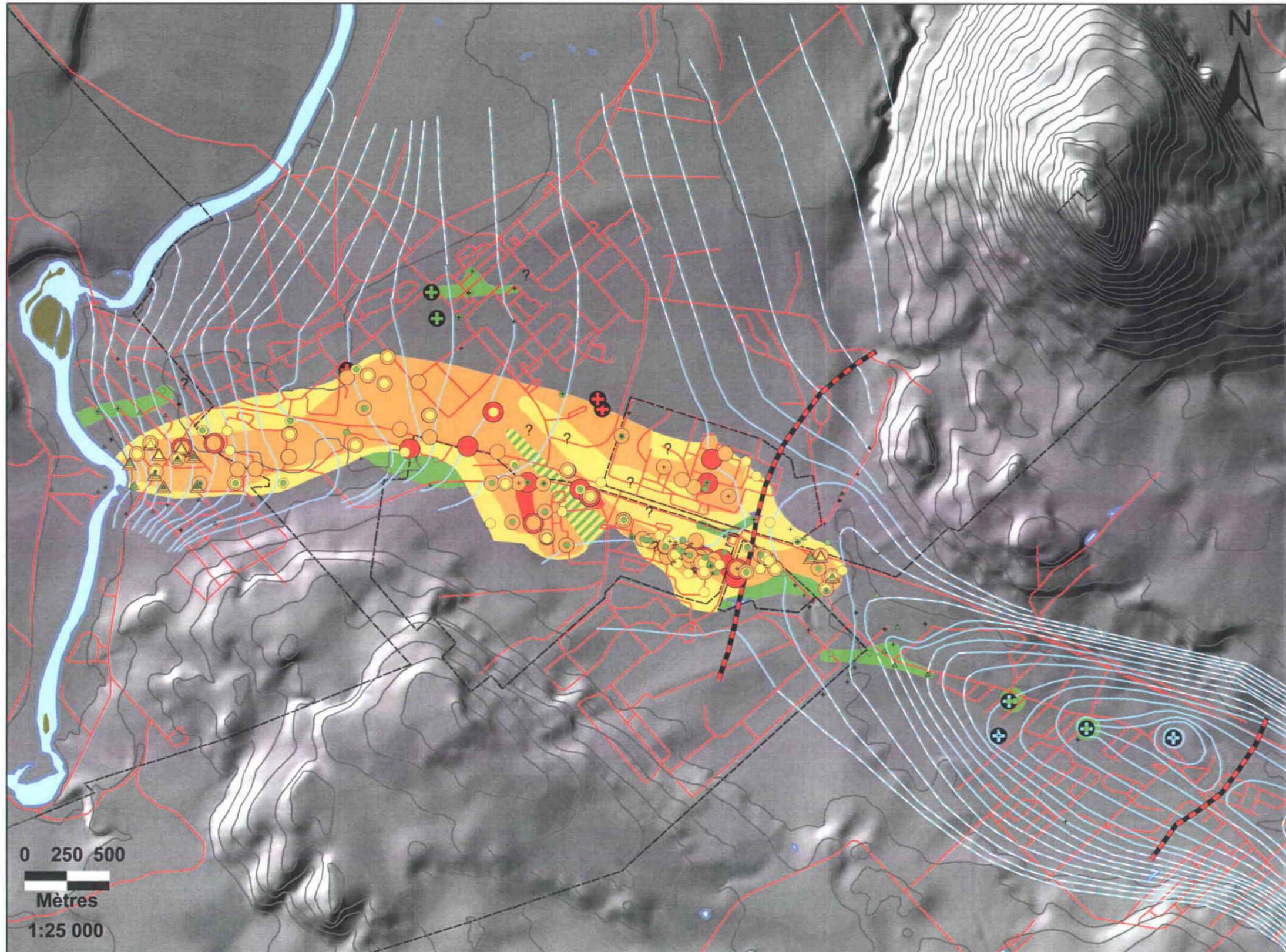
Contamination en TCE :

- non détecté
- détecté à 5 ug/L
- 5 à 50 ug/L
- 50 à 590 ug/L
- > 590 ug/L



Exagération verticale : 7X

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



Interprétation de la caractérisation
du TCE dans l'eau souterraine
à Shannon, Québec, Canada

René Lefebvre, Véronique Blais,
Thomas Ouellon, Michel Parent
Jean-Marc Ballard et Cintia Racine

INRS, Centre - Eau Terre Environnement
RAPPORT FINAL
Juillet 2010

Planche 19
Panache de TCE régional
en 2004-2005

- Données [TCE] - Puits
- ▲ Données [TCE] - Sondages
- ▨ [TCE] Incertaine
Non détecté ou Limite de détection-5 µg/L
- Limite de détection <[TCE]< 5 µg/L
- ▨ [TCE] Incertaine
Limite de détection-5 ou 5-50 µg/L
- 5 <[TCE]< 50 µg/L
- 50 <[TCE]< 590 µg/L
- [TCE] > 590 µg/L
- Isopièzes
- - - Isopièzes incertains
- Ligne de partage des eaux souterraines
- Puits de captage - MDN - Inactifs
- Puits de captage - MDN - Actifs
- ⊕ Puits de captage - Québec - Actifs
- ? Extension du panache et concentrations
inconnues ou incertaines

1- Les zones hachurées ont des concentrations couvrant les plages des deux couleurs utilisées

2- Les couleurs des points correspondent aux mêmes plages de concentrations que les couleurs des zones du panache

Modèle numérique de terrain produit par le LCNP

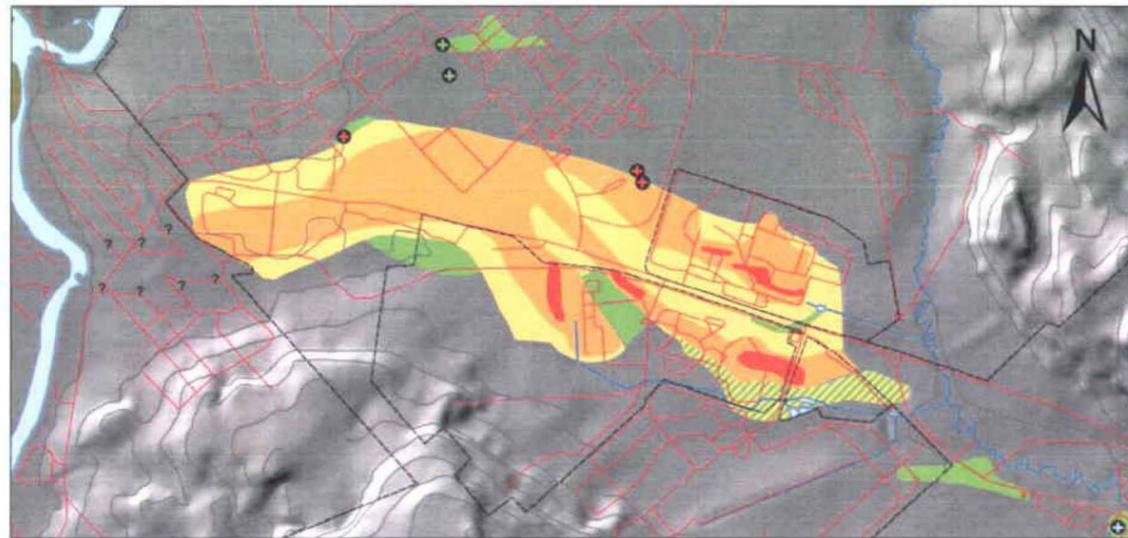
Modèle numérique de terrain utilisé comme fond de carte

Interprétation de la caractérisation
du TCE dans l'eau souterraine
à Shannon, Québec, Canada

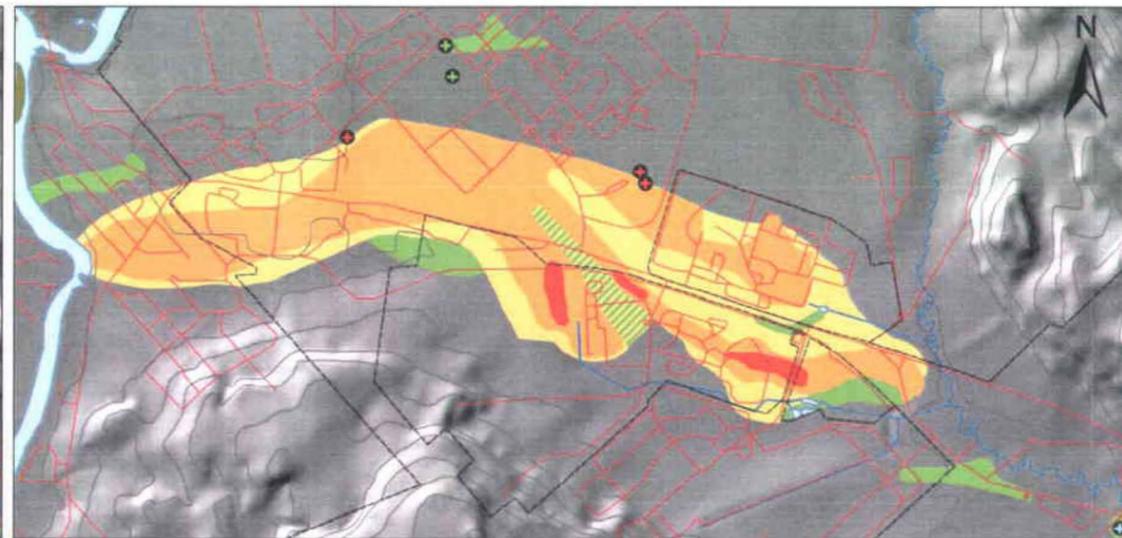
René Lefebvre, Véronique Blais,
Thomas Ouellon, Michel Parent
Jean-Marc Ballard et Cintia Racine

INRS, Centre - Eau Terre Environnement
RAPPORT FINAL
Juillet 2010

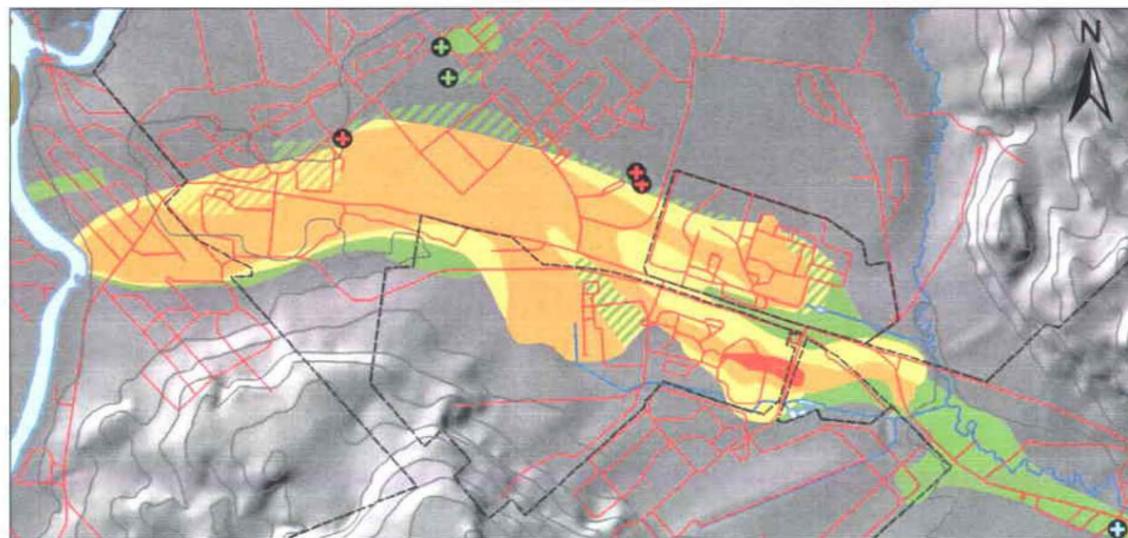
Planche 20
Évolution dans le temps
des concentrations en TCE:
panache régional



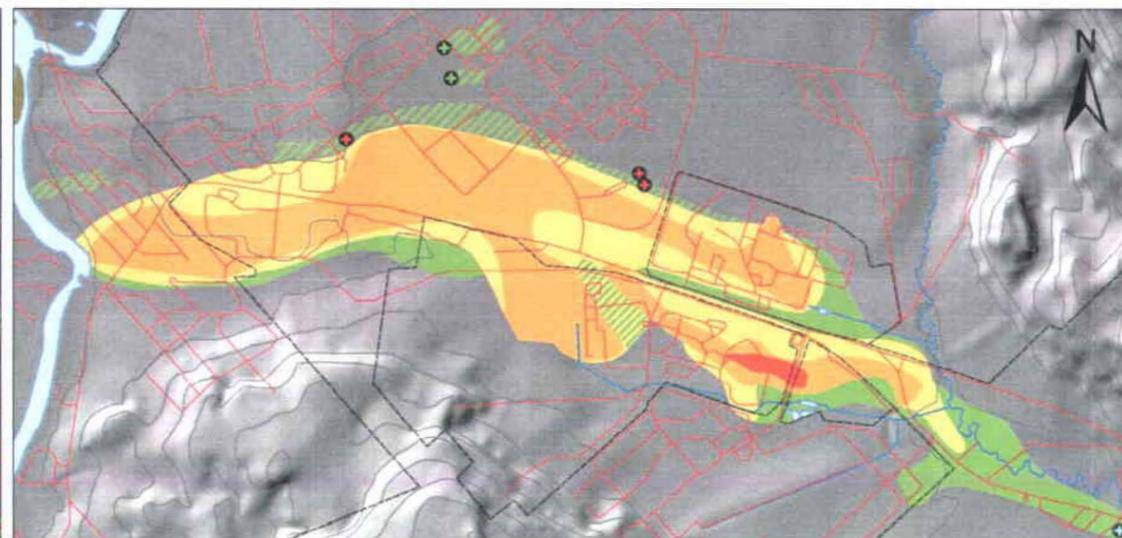
**A) Zones de concentrations en TCE
interprétées en 2001**



**B) Zones de concentrations en TCE
interprétées en 2004-2005**



**C) Zones de concentrations en TCE
interprétées en 2007-2008**



**D) Zones de concentrations en TCE
interprétées en 2009**

- [TCE] Incertaine
Non détecté ou Limite de détection-5 µg/L
- Limite de détection <[TCE]< 5 µg/L
- [TCE] Incertaine
Limite de détection-5 ou 5-50 µg/L
- 5 <[TCE]< 50 µg/L
- 50 <[TCE]< 590 µg/L
- [TCE] > 590 µg/L
- Puits de captage - MDN - Inactifs
- Puits de captage - MDN - Actifs
- Puits de captage - Québec - Actifs
- Extension du panache et concentrations
inconnues ou incertaines

Source: Ouellon et al. (2010)

Interprétation de la caractérisation
du TCE dans l'eau souterraine
à Shannon, Québec, Canada

René Lefebvre, Véronique Blais,
Thomas Ouellon, Michel Parent
Jean-Marc Ballard et Cintia Racine

INRS, Centre - Eau Terre Environnement
RAPPORT FINAL
Juillet 2010

Planche 21

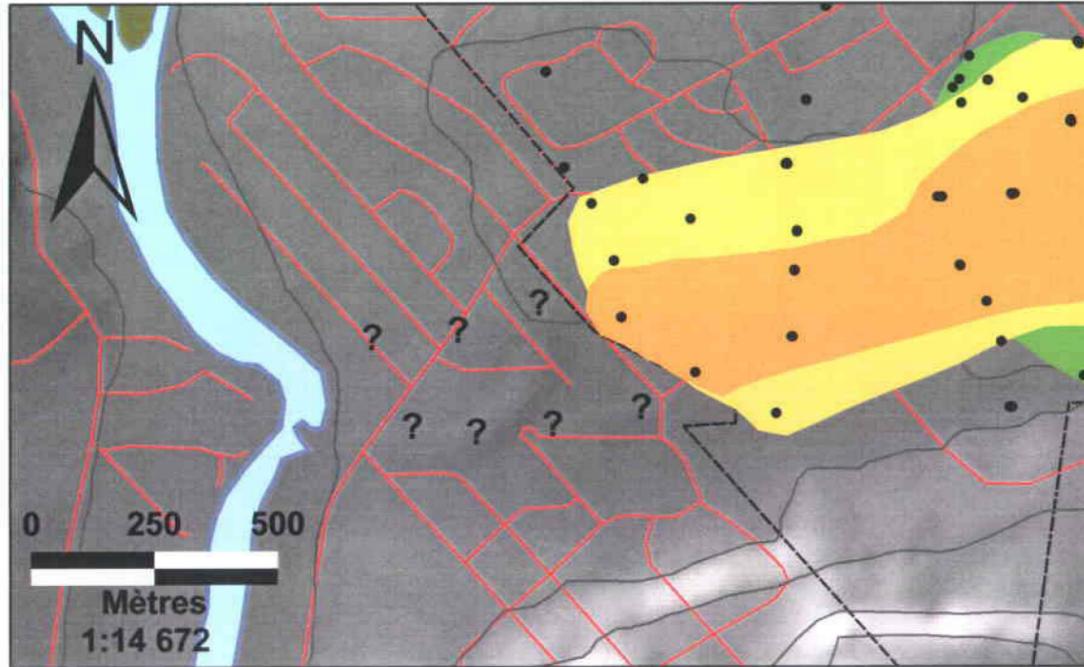
Évolution dans le temps
des concentrations en TCE:
panache local

- Données [TCE] - Puits
- ▲ Données [TCE] - Sondages

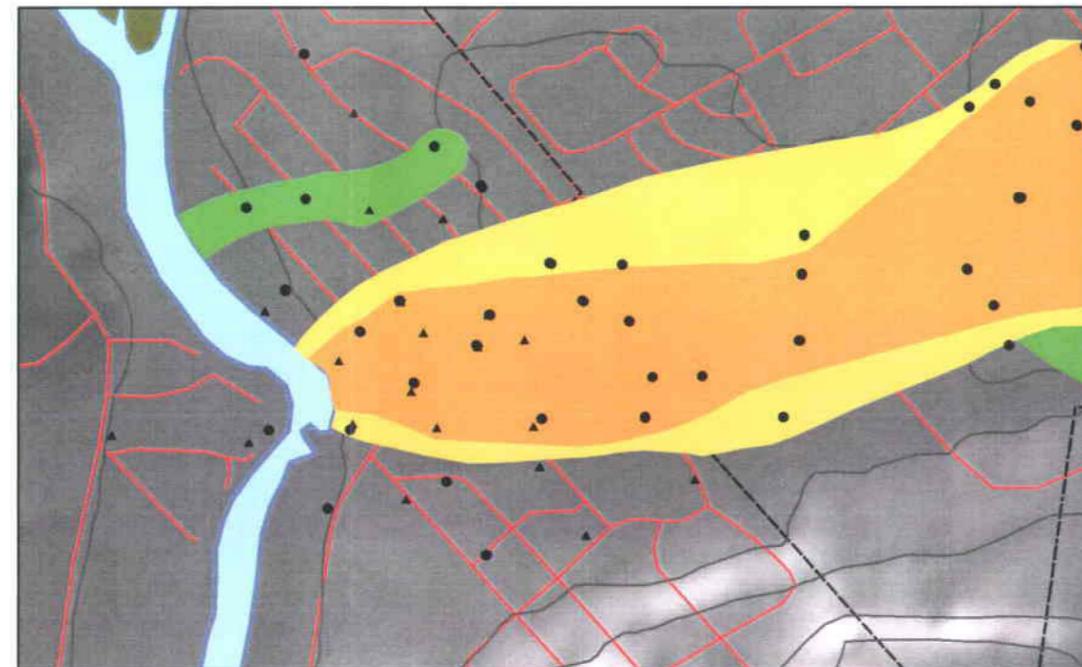
- ▨ [TCE] Incertaine
Non détecté ou Limite de détection-5 µg/L
- Limite de détection <[TCE]< 5 µg/L
- ▨ [TCE] Incertaine
Limite de détection-5 ou 5-50 µg/L
- 5 <[TCE]< 50 µg/L
- 50 <[TCE]< 590 µg/L
- [TCE] > 590 µg/L

- ? Extension du panache et concentrations
inconnues ou incertaines

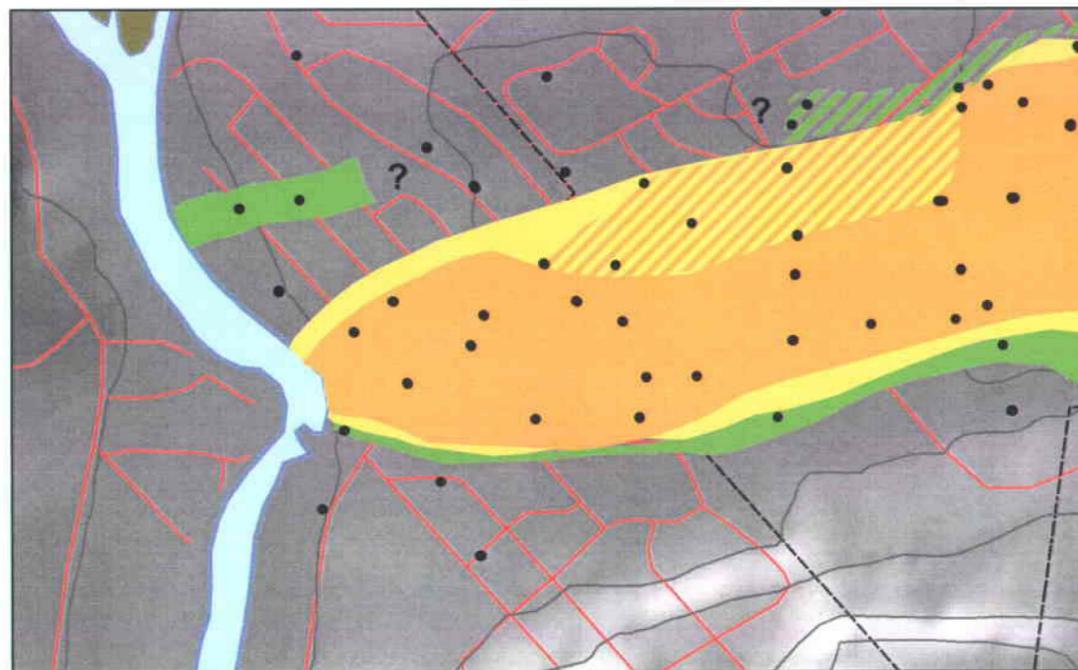
Modèle numérique de terrain utilisé comme fond de carte



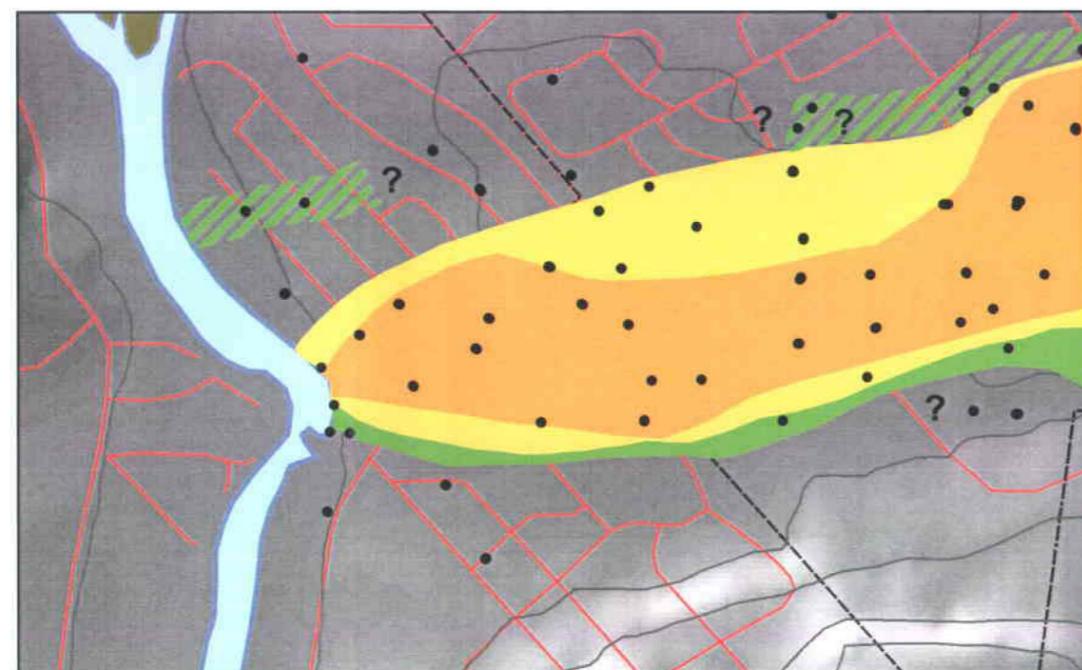
A) Zones des concentrations en TCE
interprétées en 2001



B) Zones des concentrations en TCE
interprétées en 2004-2005



C) Zones des concentrations en TCE
interprétées en 2007-2008

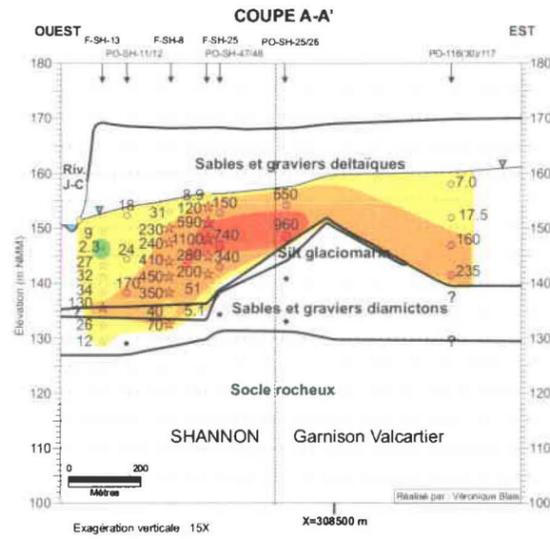


D) Zones des concentrations en TCE
interprétées en 2009

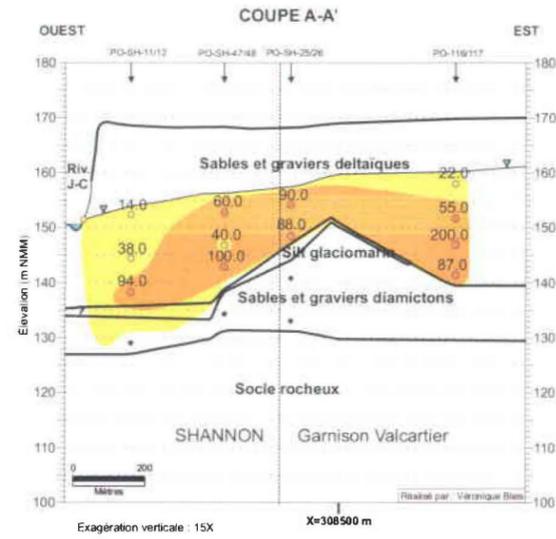
1- Les zones hachurées ont des concentrations couvrant les plages des deux couleurs utilisées

2- Les couleurs des points correspondent aux mêmes plages de concentrations que les couleurs des zones du panache

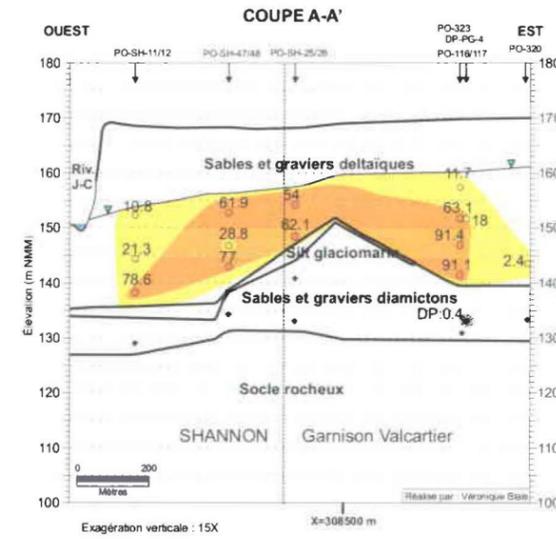
2004-2005



2007-2008



2009



Interprétation de la caractérisation du TCE dans l'eau souterraine à Shannon, Québec, Canada

René Lefebvre, Véronique Blais, Thomas Ouellon, Michel Parent, Jean-Marc Ballard et Cintia Racine

INRS, Centre - Eau Terre Environnement
RAPPORT FINAL
Juillet 2010

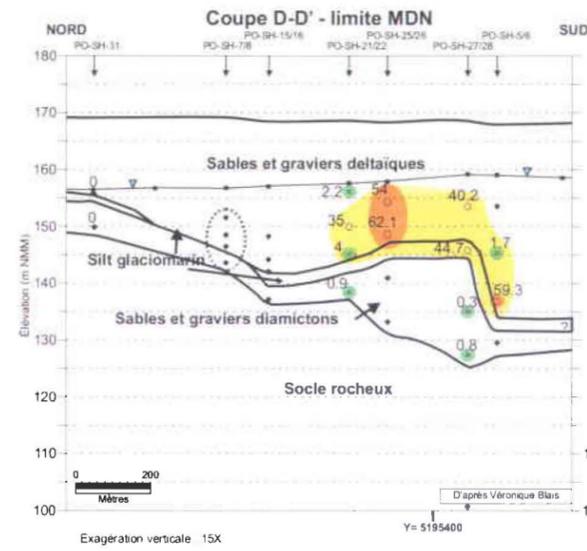
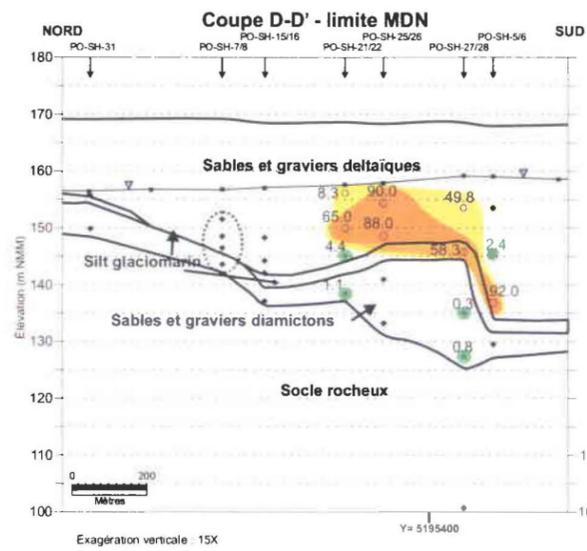
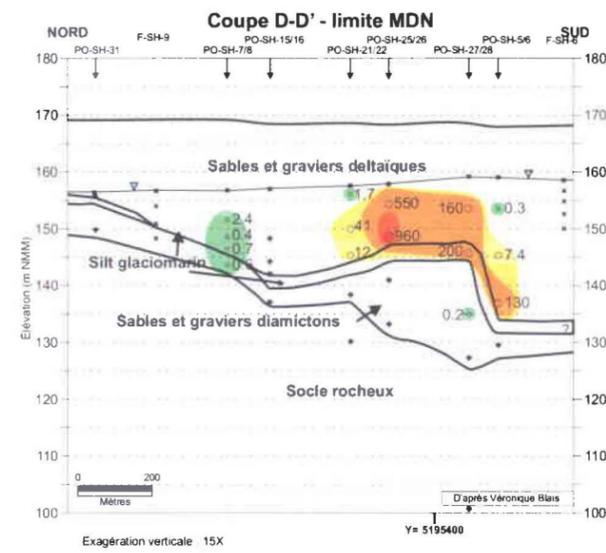


Planche 22

Évolution dans le temps des concentrations en TCE: vues en coupe

Échantillons Geoprobe :

- ✕ non détecté
- ★ détecté à 5 ug/L
- ☆ 5 à 50 ug/L
- ★ 50 à 590 ug/L
- ★ > 590 ug/L

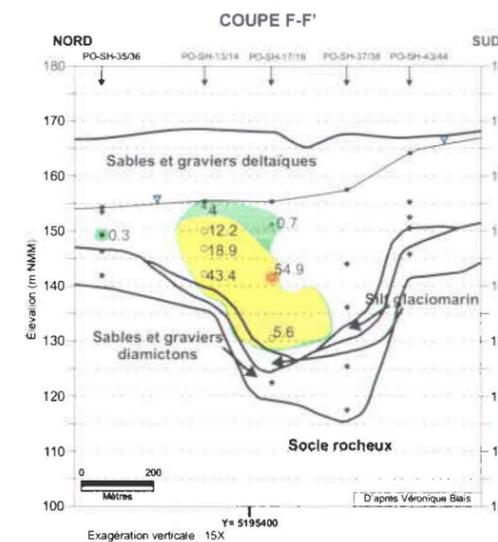
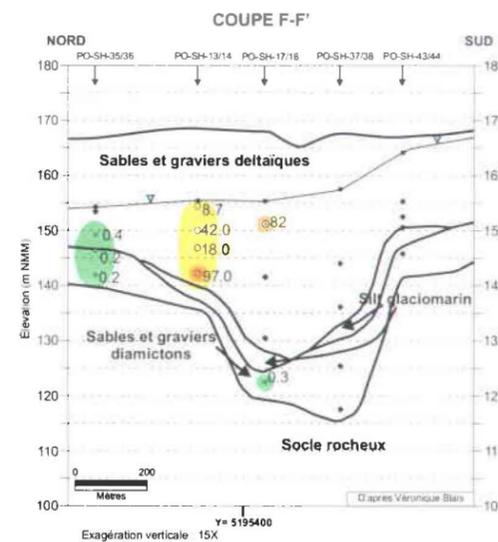
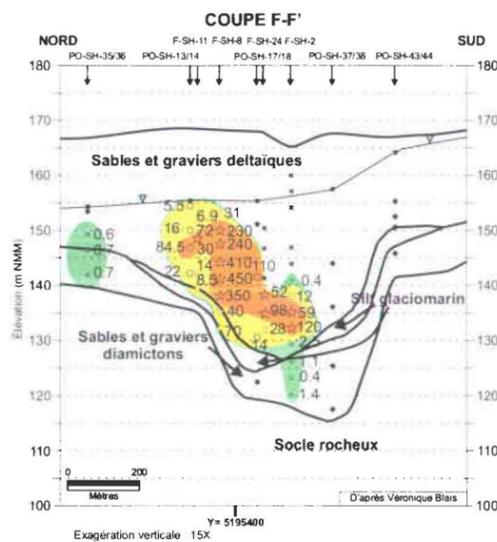
Échantillons de puits :

- + non détecté
- détecté à 5 ug/L
- 5 à 50 ug/L
- 50 à 590 ug/L
- > 590 ug/L

Zones de concentrations :

- détecté à 5 ug/L
- 5 à 50 ug/L
- 50 à 590 ug/L
- > 590 ug/L

▽ Surface libre



Échelle de concentrations linéaire

Échelle de concentrations logarithmique

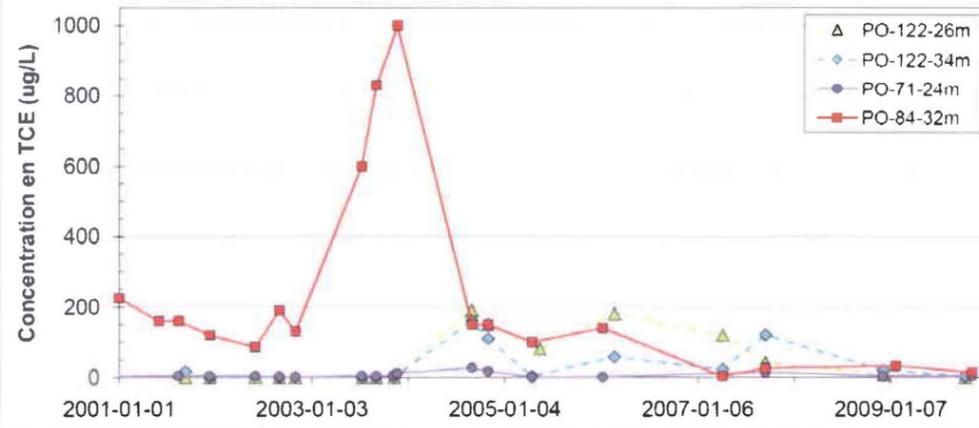
Interprétation de la caractérisation
du TCE dans l'eau souterraine
à Shannon, Québec, Canada

René Lefebvre, Véronique Blais,
Thomas Ouellon, Michel Parent
Jean-Marc Ballard et Cintia Racine

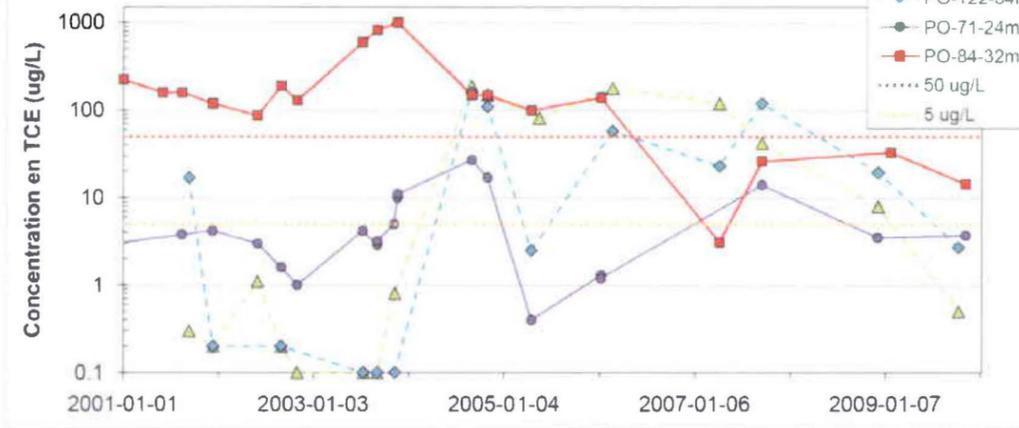
INRS, Centre - Eau Terre Environnement
RAPPORT FINAL
Juillet 2010

Planche 23
Évolution dans le temps
des concentrations en TCE:
exemples de puits

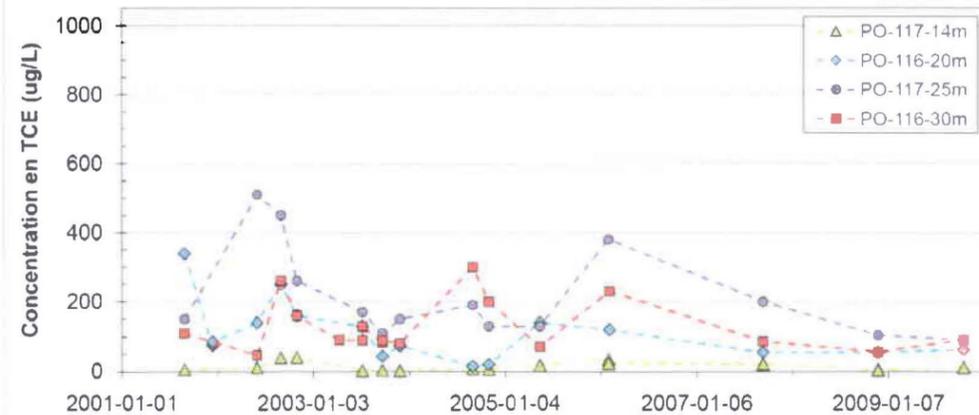
A) Puits d'observation dans la partie nord du panache



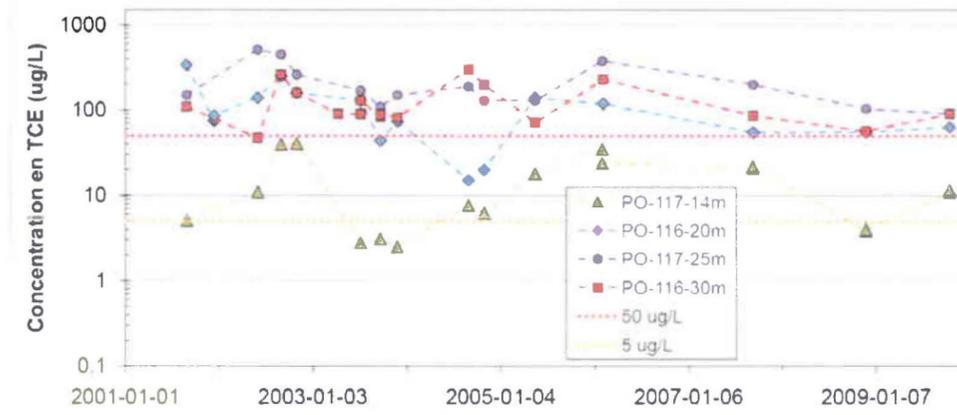
A) Puits d'observation dans la partie nord du panache



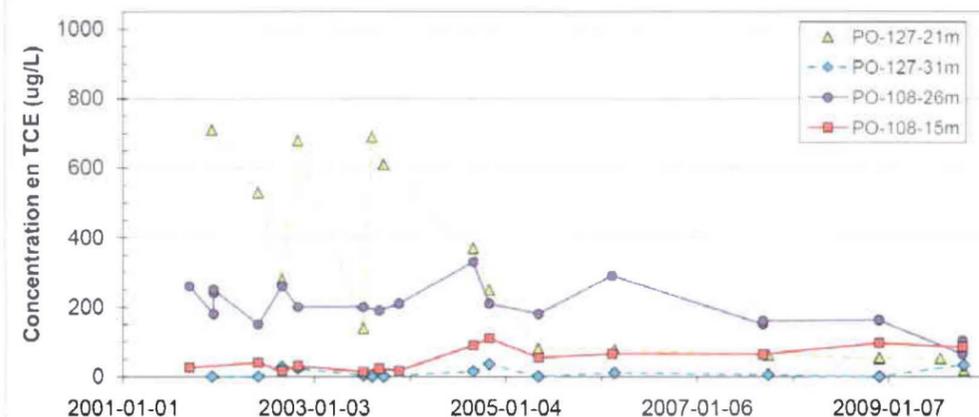
B) Puits d'observation dans la partie centrale du panache



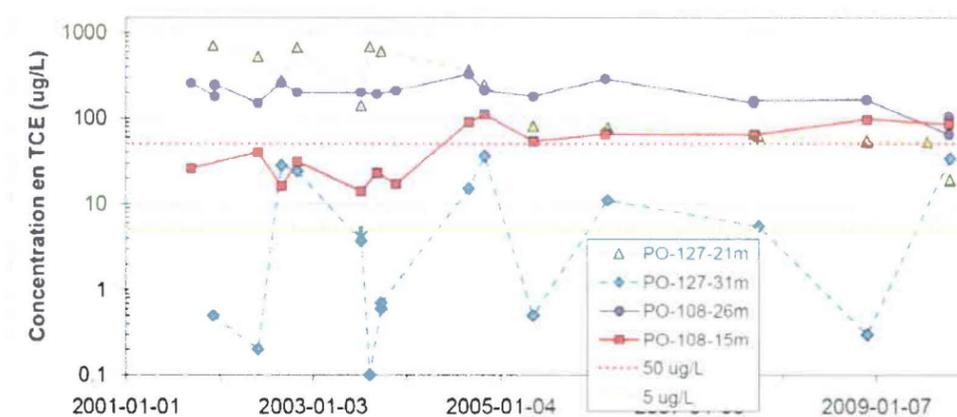
B) Puits d'observation dans la partie centrale du panache



C) Puits d'observation dans la partie sud du panache



C) Puits d'observation dans la partie sud du panache

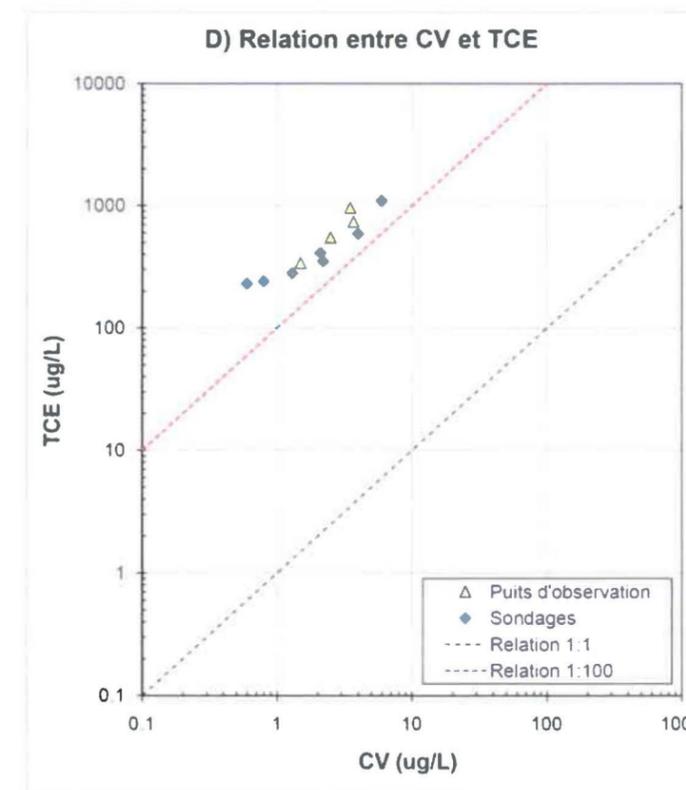
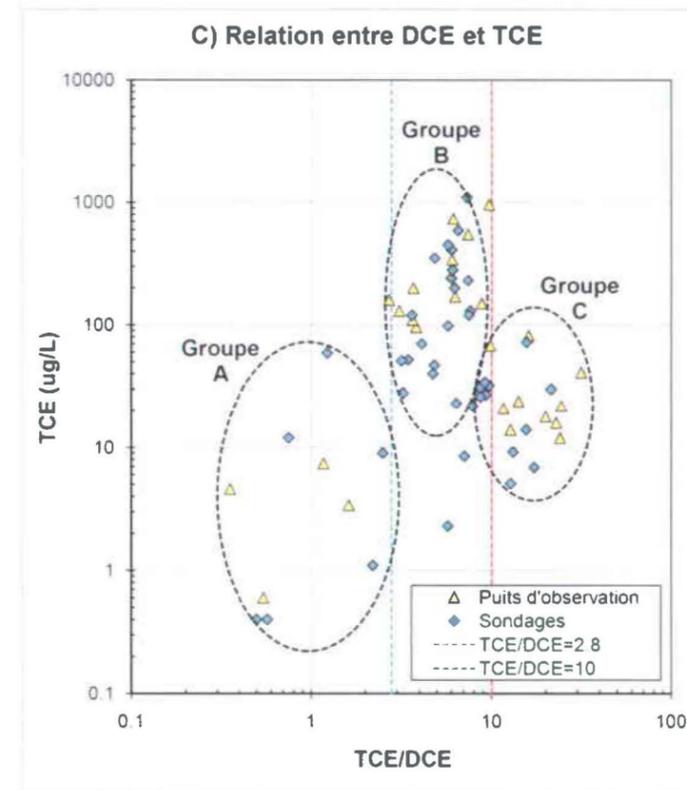
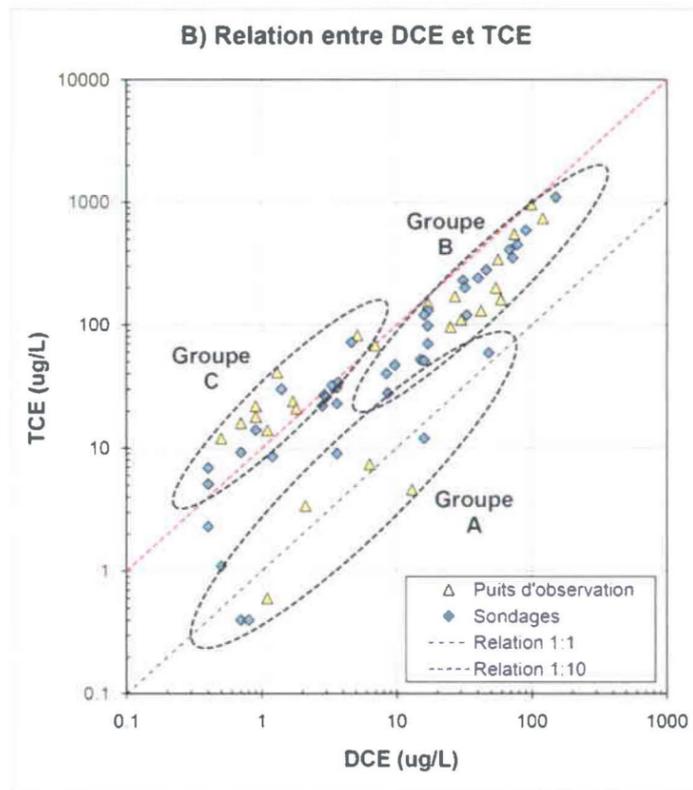
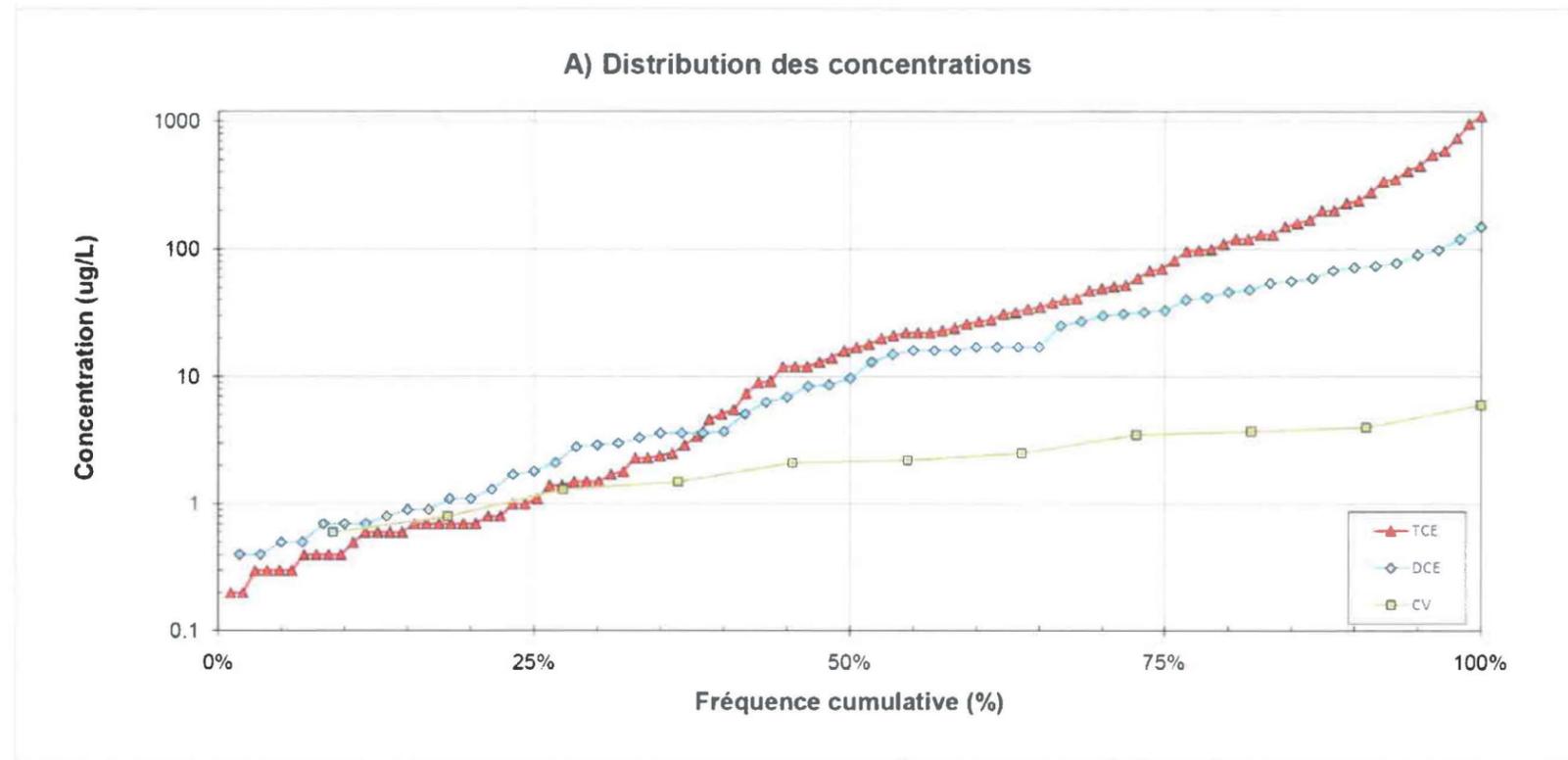


Interprétation de la caractérisation
du TCE dans l'eau souterraine
à Shannon, Québec, Canada

René Lefebvre, Véronique Blais,
Thomas Ouellon, Michel Parent
Jean-Marc Ballard et Cintia Racine

INRS, Centre - Eau Terre Environnement
RAPPORT FINAL
Juillet 2010

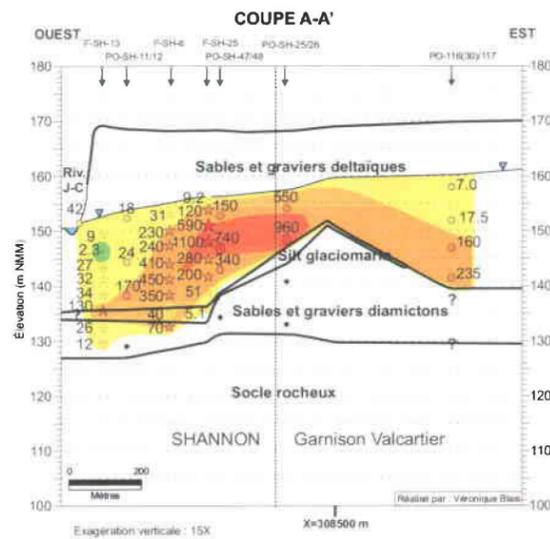
Planche 24
Relations entre le TCE et
ses produits de dégradation
(Données 2004)



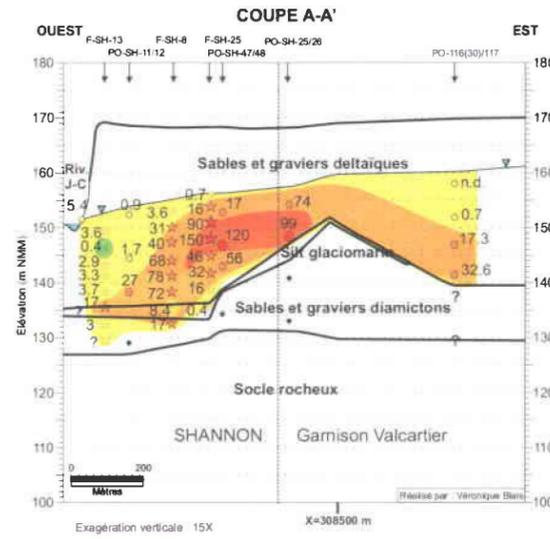
Le graphique A représente les concentrations en TCE, DCE et CV pour les échantillons obtenus par sondages Geoprobe (*direct push*).

Les graphiques B, C et D distinguent les concentrations pour les échantillons obtenus de puits d'observation et par des sondages Geoprobe (*direct push*).

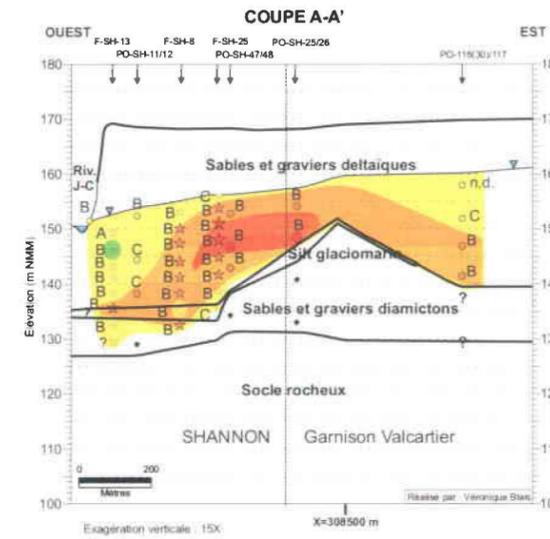
TCE



DCE



TCE/DCE



Interprétation de la caractérisation du TCE dans l'eau souterraine à Shannon, Québec, Canada

René Lefebvre, Véronique Blais, Thomas Ouellon, Michel Parent Jean-Marc Ballard et Cintia Racine

INRS, Centre - Eau Terre Environnement RAPPORT FINAL Juillet 2010

Planche 25 Concentrations en TCE et en DCE vues en coupe (Données 2004)

TCE dans les échantillons Geoprobe :

- ✕ non détecté
- ★ détecté à 5 ug/L
- ☆ 5 à 50 ug/L
- ★ 50 à 590 ug/L
- ★ > 590 ug/L

TCE dans les échantillons de puits :

- + non détecté
- détecté à 5 ug/L
- 5 à 50 ug/L
- 50 à 590 ug/L
- > 590 ug/L

Zones de concentrations de TCE :

- détecté à 5 ug/L
- 5 à 50 ug/L
- 50 à 590 ug/L
- > 590 ug/L

▽ Surface libre

