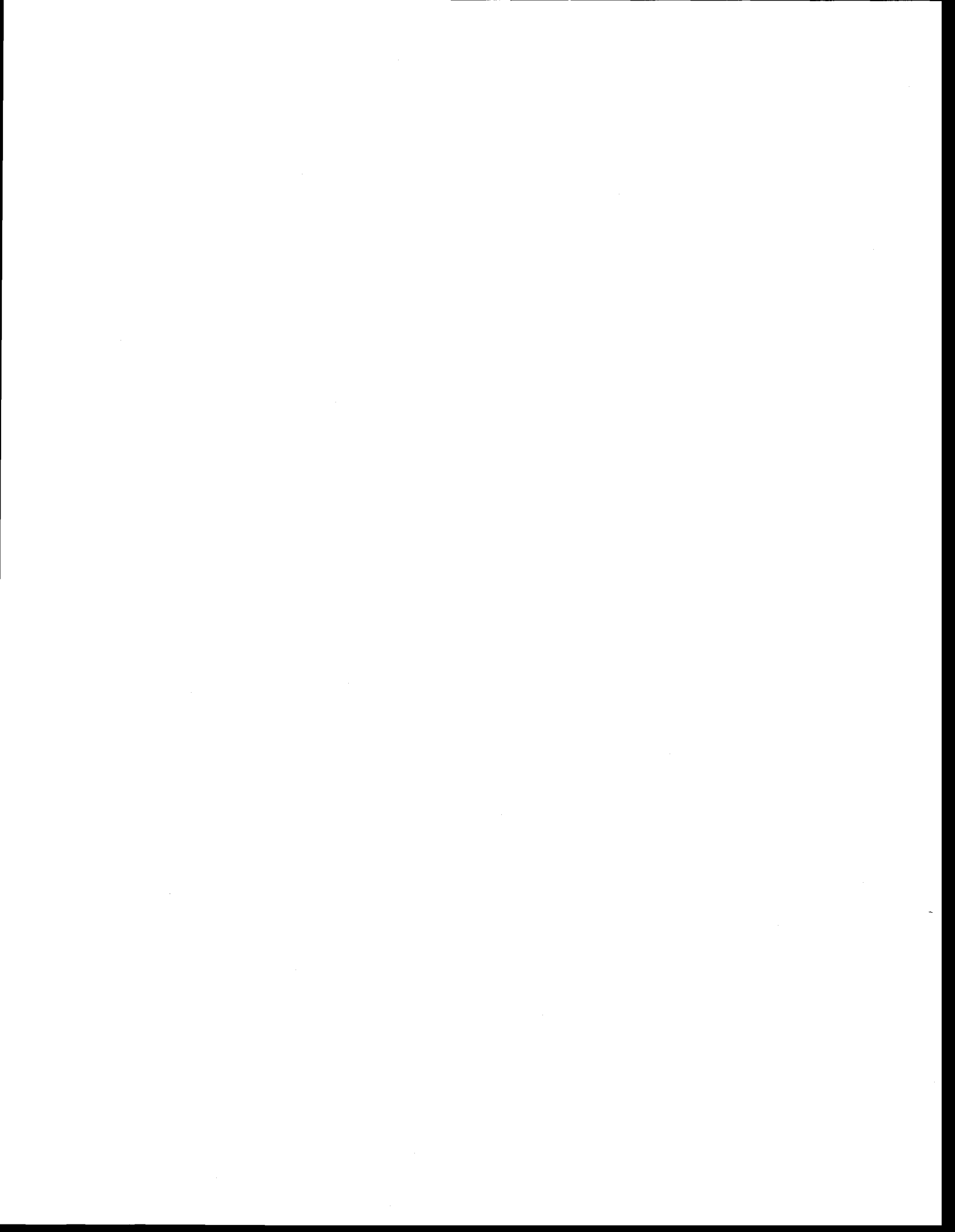


Expertise hydrogéologique sur  
le TCE dans l'eau souterraine  
à Shannon, Québec, Canada

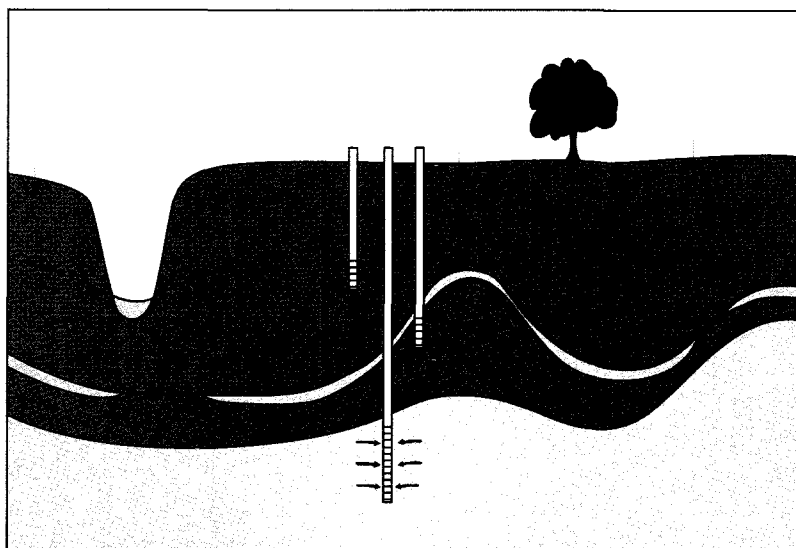


# INRS

RAPPORT FINAL RÉVISÉ

## Expertise hydrogéologique sur le TCE dans l'eau souterraine à Shannon, Québec, Canada

René Lefebvre



Institut national de la recherche scientifique  
Centre - Eau Terre Environnement  
Rapport de recherche R-1153

Juillet 2010



# INRS

RAPPORT FINAL RÉVISÉ

---

Expertise hydrogéologique sur le TCE  
dans l'eau souterraine à Shannon, Québec, Canada

René Lefebvre, Ph.D.  
Professeur titulaire à l'INRS

---

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-1153

Juillet 2010



## Résumé

La municipalité de Shannon est localisée à environ 30 km au nord-ouest du centre-ville de Québec. Shannon est située à l'ouest de la Garnison Valcartier, de RDDC Valcartier et d'un ancien site industriel qui est la propriété de la Société Immobilière Valcartier Inc. (SIVI). Cette région est appelée le « secteur Valcartier » dans le présent rapport. Sous ce secteur, jusqu'à 50 m de sédiments comblent une vallée enfouie où il y a deux aquifères, une nappe deltaïque régionale et une nappe dans les diamictons. La nappe deltaïque régionale est divisée par un aquitard silteux prodeltaïque présent à l'est du secteur Valcartier. La nappe deltaïque régionale est séparée de la nappe dans les diamictons par un aquitard silteux glaciomarin discontinu.

Du TCE dissous se retrouve principalement dans la nappe deltaïque régionale et migre surtout vers l'ouest et Shannon à partir des zones sources situées à RDDC Nord (Bâtiments B98 et B67 ainsi que l'ancien Lagon Bleu) et à la SIVI (Secteur 214 et Lagune C). Une nouvelle zone source présumée a récemment été identifiée à l'emplacement de l'ancien dépotoir situé à l'ouest de la propriété de SIVI, mais cette zone source pourrait aussi être reliée aux autres sites d'utilisation du TCE dans ces environs (Lagunes X et A). La convergence de l'écoulement de l'eau souterraine vers le centre de la vallée entraîne le TCE provenant des différentes zones sources suivant trois voies de migration dans le panache principal de TCE qui atteint Shannon.

Le mandat reçu pour cette expertise hydrogéologique comportait deux volets : 1) évaluer l'exposition au TCE par l'eau souterraine provenant des puits résidentiels dans la municipalité de Shannon et 2) évaluer le rapport d'expertise hydrogéologique produit par le Pr. Chapuis en 2009. L'expertise hydrogéologique documentée dans le présent rapport s'appuie sur des travaux scientifiques réalisés précédemment et qui doivent être lus conjointement avec notre rapport : 1) Ouellon et al. (2010), « Synthèse du contexte hydrogéologique et de la problématique du TCE dans le secteur Valcartier, Québec, Canada », 2) Murphy et al. (2010), « Tritium-helium dating and geochemical characterization of groundwater in the Valcartier deltaic aquifer system » et 3) Lefebvre et al. (2010), « Interprétation de la caractérisation du TCE dans l'eau souterraine à Shannon, Québec, Canada ».

### Exposition au TCE des puits résidentiels de Shannon

Conceptuellement, pour que les puits résidentiels de Shannon soient exposés au TCE, il faut que ces puits soient localisés à l'intérieur des limites du panache de TCE et que ces puits captent l'eau souterraine à partir d'une unité géologique dans laquelle se trouve du TCE. Santé Canada recommande une concentration maximale de 5 µg/L de TCE dans l'eau potable tandis que la norme québécoise du MDDEP est de 50 µg/L.

Les étendues du panache principal de TCE ainsi que d'un panache secondaire ont été délimitées sur la base des résultats de la caractérisation hydrogéologique réalisée à Shannon en 2004 par Sanexen-Amec pour le Ministère de la Défense Nationale (MDN) ainsi que des suivis annuels des puits d'observation à Shannon réalisés par le MDN entre 2005 et 2009. Les données du suivi du TCE réalisé par le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) entre 2001 et 2009 dans 443 puits résidentiels de Shannon permettent de vérifier les concentrations en TCE historiquement observées dans ces puits.

Des statistiques ont été calculées sur les concentrations moyennes du TCE détecté dans 295 puits résidentiels de Shannon localisés du côté est de la rivière Jacques-Cartier. Au niveau des localisations des puits résidentiels par rapport au panache de TCE, sur les 212 puits résidentiels localisés en dehors du panache principal, 141 (67%) n'ont pas eu de détections de TCE et aucun des 71 autres n'a eu des concentrations moyennes en TCE excédant 5 µg/L. Les 15 puits localisés à l'intérieur du panache secondaire ont tous montré la présence de TCE mais à des concentrations moyennes inférieures à 2 µg/L. Enfin, pour les 68 puits localisés à l'intérieur du panache principal, 16 (24%) n'ont pas eu de détections de TCE, tandis que les détections moyennes de TCE ont été les suivantes : inférieures à 5 µg/L pour 19 puits (28%), entre 5 et 50 µg/L pour 13 puits (19%) et excédant 50 µg/L pour 20 puits (29%).

Les unités géologiques dans lesquelles se fait le captage de l'eau des puits résidentiels ont pu être identifiées pour les puits pour lesquels la profondeur est connue (57 des 68 puits localisés à l'intérieur du panache). L'analyse des résultats de suivi du MDDEP pour ces puits localisés à l'intérieur du panache principal de TCE montre les relations suivantes entre la présence du TCE et l'unité géologique où se fait le captage:

- Sur 4 puits au total captant au roc, le TCE n'a pas été détecté dans 3 puits et il a détecté en trace (0.06 µg/L) dans un autre puits;
- Sur 13 puits au total captant dans les diamictons, le TCE n'a pas été détecté dans 2 puits, tandis que les détections ont été les suivantes : inférieures à 5 µg/L pour 7 puits, entre 5 et 50 µg/L pour 1 puits et excédant 50 µg/L pour 3 puits;
- Sur 40 puits au total captant dans la nappe deltaïque régionale, le TCE n'a pas été détecté dans 6 puits, tandis que les détections ont été les suivantes : inférieures à 5 µg/L pour 9 puits, entre 5 et 50 µg/L pour 10 puits et excédant 50 µg/L pour 15 puits.

Une estimation a été faite de l'arrivée du TCE à Shannon à partir de zones sources de TCE ainsi que de la durée d'exposition au TCE jusqu'à 2001 pour les puits résidentiels de Shannon localisés à l'intérieur du panache principal, donc potentiellement exposés au TCE. À partir de 2001, les puits résidentiels touchés par le TCE n'ont plus servi à l'approvisionnement en eau. L'estimation de la durée d'exposition nécessite d'abord d'évaluer la période probable d'arrivée du TCE à Shannon à partir des informations disponibles sur le début possible d'émission du TCE aux zones sources et sur le temps de migration du TCE entre ces zones sources et Shannon.

Un modèle numérique validé a permis d'estimer un temps moyen de migration du TCE de 32 ans ( $\pm 10$  ans) dans la nappe deltaïque régionale jusqu'à Shannon à partir de la zone source du Secteur 214 située sur les terrains de la SIVI ainsi que des zones sources situées à RDDC Nord sur le territoire du MDN. Un temps moyen de migration du TCE de 19 ans ( $\pm 5$  ans) a été estimé à partir de la zone source de la Lagune C localisée sur les terrains de la SIVI.

En considérant le temps de migration initial du TCE avant d'atteindre l'aquifère deltaïque et la période d'émission potentielle aux zones sources, les durées moyennes d'exposition potentielle des puits résidentiels de Shannon a été estimées comme suit pour chaque zone source :

- Pour les zones sources B98 et B67 localisées à RDDC Nord, le TCE émis par ces zones sources n'aurait pas atteint Shannon en 2001, tandis que le TCE émis par la zone source du Lagon Bleu aurait pu atteindre Shannon en 1992 (depuis 9 ans en 2001);

- Dans le cas du TCE émis par la zone source du Secteur 214 localisée sur les terrains de la SIVI, le TCE aurait pu atteindre Shannon en 1978 (depuis 23 ans en 2001);
- Pour la zone source de la Lagune C située sur les terrains de la SIVI, le TCE émis aurait pu atteindre Shannon en 1982 (depuis 19 ans en 2001);
- Du TCE aurait aussi pu atteindre Shannon à partir de zones sources potentielles situées à la limite ouest de la propriété de la SIVI et qui sont présumées être en relation avec l'émergence de TCE dans la nappe deltaïque régionale en amont de Shannon. La possibilité que ces sites soient des zones sources doit cependant à être vérifiée.

### Évaluation de l'expertise du Pr. Chapuis

L'expertise du Pr. Chapuis se concentre sur la critique du rapport de Lefebvre et al. (2003). Beaucoup de nouvelles données ont été acquises et un important travail d'analyse de ces données a été réalisé depuis la parution de ce rapport qui a porté sur la caractérisation hydrogéologique réalisée en 2001-2002 sur le territoire du MDN (Garnison et RDDC Valcartier). Certaines conclusions de Lefebvre et al. (2003) sont donc dépassées relativement aux connaissances actuelles sur l'hydrogéologie et la contamination en TCE de l'eau souterraine dans le secteur Valcartier et à Shannon. Ceci rend l'évaluation des travaux du Pr. Chapuis difficile, puisque son rapport d'expertise se concentre sur des travaux dépassés par des études plus récentes.

Les méthodes utilisées par le Pr. Chapuis pour refaire l'interprétation des essais de perméabilité sont reconnues et rigoureuses et elles se conforment aux normes d'interprétation les plus récentes. Les résultats obtenus par le Pr. Chapuis pour la conductivité hydraulique ( $K$ ) des puits d'observations où ont été réalisés les essais de perméabilité sont donc acceptés comme étant valides et ils ne sont pas remis en question. Les valeurs de  $K$  varient naturellement de plusieurs ordres de grandeur. Les valeurs interprétées par le Pr. Chapuis sont systématiquement plus élevées que les valeurs originales obtenues par l'INRS pour la caractérisation de la Garnison et de RDDC Valcartier en 2001-2002 et par Sanexen-Amec pour la caractérisation de Shannon en 2004. Cependant, sans être négligeable, cette différence ne représente qu'un écart de 7.7% entre les valeurs moyennes de  $\text{Log}K$  originale (-3.92) et celle obtenue par le Pr. Chapuis (-3.62).

Notre analyse montre aussi que la porosité et la recharge sont des paramètres qui ont beaucoup plus d'influence sur le temps de migration du TCE que la conductivité hydraulique dans les conditions de la nappe libre deltaïque du secteur Valcartier. Les changements dans l'estimation de  $K$  du Pr. Chapuis n'ont donc pas d'implications significatives sur la représentativité du modèle numérique d'écoulement développé par l'INRS ni sur les estimations qui ont été faites sur les temps de migration du TCE entre les zones sources et Shannon.

Dans son expertise, le Pr. Chapuis présente plusieurs situations conceptuelles et une géométrie du système qui ne sont pas représentatives du secteur Valcartier. L'utilisation d'un modèle simplifié à seulement deux dimensions ne peut pas reproduire le comportement du système complexe de Valcartier. L'estimation de la recharge (infiltration efficace) documentée dans l'expertise du Pr. Chapuis est peu réaliste, non validée avec des observations de terrain et basée sur une approche simpliste. Enfin, les périodes d'activité des zones sources ne sont pas considérées par le Pr. Chapuis pour identifier des périodes potentielles d'émissions de TCE.



## Table des matières

<b>1. INTRODUCTION ET MISE EN CONTEXTE</b>	<b>1</b>
1.1 LOCALISATION DU SITE À L'ÉTUDE	1
1.2 TRAVAUX ANTÉRIEURS	1
1.3 MANDAT ET CONTENU DU RAPPORT	2
<b>2. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE</b>	<b>3</b>
2.1 LA CARACTÉRISATION DES AQUIFÈRES	3
2.2 CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE	6
2.2.1 UNITÉS AQUIFÈRES ET AQUITARD	6
2.2.2 ÉTENDUE ET CONCENTRATIONS DU TCE	7
2.2.3 ZONES SOURCES ET VOIES DE MIGRATION DU TCE	10
<b>3. EXPOSITION AU TCE DANS L'EAU SOUTERRAINE</b>	<b>13</b>
3.1 CONDITIONS D'EXPOSITION DANS LES PUIITS RÉSIDENTIELS À SHANNON	13
3.1.1 MODÈLE CONCEPTUEL DE L'EXPOSITION AU TCE DANS LES PUIITS RÉSIDENTIELS	13
3.1.2 EXPOSITION DES PUIITS RÉSIDENTIELS PAR RAPPORT AU PANACHE DE TCE	16
3.1.3 EXPOSITION DES PUIITS RÉSIDENTIELS PAR RAPPORT À L'UNITÉ DE CAPTAGE	17
3.2 DURÉE DE L'EXPOSITION AU TCE À SHANNON	19
3.3 CONCENTRATIONS EN TCE À SHANNON DANS LE TEMPS ET L'ESPACE	23
3.4 CONCENTRATIONS EN PRODUITS DE DÉGRADATION DU TCE À SHANNON	24
<b>4. ÉVALUATION DE L'EXPERTISE HYDROGÉOLOGIQUE DU PR. CHAPUIS</b>	<b>26</b>
4.1 DÉVELOPPEMENT DES CONNAISSANCES HYDROGÉOLOGIQUE À SHANNON	26
4.2 CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES OBTENUES DES ESSAIS DE PERMÉABILITÉ	28
4.2.1 COMPILATION DES DONNÉES BRUTES	28
4.2.2 MÉTHODES D'INTERPRÉTATION	29
4.2.3 COMPARAISON DES VALEURS DE CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE	29
4.2.4 IMPLICATIONS DES DIFFÉRENCES DE LOGK	31
4.3 DÉFINITION DU CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE	34
<b>5. CONCLUSIONS</b>	<b>35</b>
5.1 EXPOSITION AU TCE DES PUIITS RÉSIDENTIELS À SHANNON	35
5.2 ÉVALUATION DE L'EXPERTISE HYDROGÉOLOGIQUE DU PR. CHAPUIS	37
<b>RÉFÉRENCES CITÉES OU UTILISÉES</b>	<b>39</b>

## Liste des tableaux et planches

### Tableaux

Tableau 2.1. Unités géologiques et nappes définissant les contextes d'écoulement.....	6
Tableau 3.1. Concentrations moyennes en TCE dans les puits résidentiels de Shannon selon leur localisation par rapport aux panaches de TCE.....	16
Tableau 3.2. Concentrations moyennes en TCE dans les puits résidentiels de Shannon dans le panache principal par rapport à l'unité de captage de l'eau souterraine.....	18
Tableau 3.3. Temps de migration du TCE et durée d'exposition probable au TCE des puits résidentiels à Shannon jusqu'à 2001.....	21
Tableau 3.4. Concentrations en TCE, DCE et CV dans l'eau souterraine à Shannon en 2004....	25
Tableau 4.1. Étude de sensibilité des paramètres pour l'écoulement en nappe libre.....	32

### Planches

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

Planche 1.1 : Localisation régionale et géologie des dépôts meubles
Planche 1.2 : Localisation des rues à Shannon
Planche 2.1 : Contextes hydrogéologiques
Planche 2.2 : Modèle géologique
Planche 2.3 : Écoulement et panache de TCE
Planche 2.4 : Concentrations en TCE vues en coupe
Planche 2.5 : Zones sources et voies de migration du TCE
Planche 3.1 : Modèle conceptuel de l'exposition au TCE par les puits résidentiels
Planche 3.2 : Suivi du TCE dans les puits résidentiels par le MDDEP
Planche 3.3 : TCE dans les puits résidentiels par rapport à l'unité du captage
Planche 3.4 : Profondeurs des puits résidentiels à Shannon dans leurs unités de captage
Planche 3.5 : Temps de migration du TCE
Planche 4.1 : Comparaison des interprétations des essais de perméabilité
Planche 4.2 : Sensibilité des paramètres hydrauliques pour les nappes libres
Planche 4.3 : Précision des résultats pour les nappes libres

## 1. Introduction et mise en contexte

### 1.1 Localisation du site à l'étude

La municipalité de Shannon est localisée à environ 30 km au nord-ouest du centre-ville de Québec. La Planche 1.1 présente une carte montrant le contexte régional de la zone 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) représentant un site industriel désaffecté ainsi que les terrains du centre de Recherche et Développement pour la Défense Canada Valcartier (RDDC Valcartier) qui sont scindés en deux parties : RDDC-Nord et RDDC-Sud de part et d'autre du Boulevard Jacques-Cartier. La topographie générale du secteur est assez plane mais le mont Rolland-Auger borde la partie sud de la zone d'étude. La rivière Jacques-Cartier s'écoule vers le sud dans la partie ouest de la zone d'étude adjacente à la partie urbanisée de Shannon. La rivière est encaissée dans les dépôts meubles et atteint le roc par endroits. Le territoire de la municipalité de Shannon s'étend de chaque côté de la rivière.

La Planche 1.2 montre la zone d'étude plus en détail avec les noms des rues dont certains seront cités dans ce rapport. La Garnison Valcartier borde le côté est de la zone d'étude. La zone 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 présent sur les terrains de la Garnison.

### 1.2 Travaux antérieurs

Suite à la découverte de trichloroéthène (TCE) dans le système d'alimentation en eau potable de la Garnison Valcartier et de RDDC Valcartier en 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 montré que cette contamination en TCE n'était potentiellement pas localisée uniquement sur les territoires du MDN et de SIVI. Depuis 1998, le Centre-Eau Terre Environnement de l'INRS (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. Les principaux travaux réalisés par l'INRS-ETE qui ont contribué à la compréhension du contexte hydrogéologique de la région d'étude et de la migration du TCE sont les suivants :

- 1. En 1999, la Commission Géologique du Canada, en collaboration avec l'INRS, a prolongé sur le territoire du MDN (Garnison et RDDC Valcartier) la cartographie hydrogéologique et des formations superficielle et réalisée entre 1995 et 1999 dans la région adjacente de Portneuf (Michaud et al., 1999);
- 2. En 2000, l'INRS a documenté une évaluation des contextes géologiques et hydrogéologique des secteurs administratifs de la Garnison et de RDDC Valcartier et a développé modèle numérique d'écoulement de l'eau souterraine (Martel et al., 2000);
- 3. En 2003, l'INRS a produit un rapport faisant l'analyse et l'interprétation des données de la caractérisation réalisée en 2001 et 2002 par le MDN sur son territoire dans le

secteur Valcartier (Garnison et RDDC Valcartier) (Lefebvre et al., 2003). Un nouveau modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine a aussi été produit pour soutenir l'interprétation des conditions d'écoulement et de migration du TCE;

- 4. En 2008, l'INRS a fait l'analyse et l'interprétation des données de la caractérisation hydrogéologique et environnementale réalisée par le MDN dans le secteur de Val-Bélair entre 2005 et 2007 (Ouillon et al., 2008). Un modèle numérique d'écoulement spécifique au secteur Val-Bélair a été développé lors de cette étude;
- 5. En 2010, l'INRS a documenté la caractérisation géochimique et la datation de l'eau souterraine dans l'aquifère deltaïque du secteur Valcartier (Murphy et al., 2010);
- 6. En 2010, l'INRS a produit un rapport sur l'analyse et l'interprétation des données de la caractérisation réalisée pour le MDN par Sanexen-Amec (2005) à Shannon en 2004-2005 (Lefebvre et al., 2010).
- 7. En 2010, l'INRS a produit une nouvelle synthèse du contexte hydrogéologique de l'ensemble du territoire touché par la problématique du TCE dans l'eau souterraine, incluant, de l'ouest vers l'est, Shannon, le secteur Valcartier et le secteur Val-Bélair (Ouillon et al., 2010). Ce rapport mets à jour celui produit en 2003 (Lefebvre et al., 2003) en considérant les données qui se sont ajoutées depuis 2001-2002. Ces nouvelles données comprennent celles des caractérisations réalisées à Shannon (Sanexen-Amec, 2005) et à Val-Bélair (Ouillon et al., 2008) ainsi que des données provenant de caractérisations plus locales. Ce rapport documente aussi un nouveau modèle numérique d'écoulement de l'eau souterraine.

L'expertise hydrogéologique documentée dans le présent rapport s'appuie spécifiquement sur les rapports scientifiques réalisés précédemment. Ainsi, le rapport d'expertise est accompagné des rapports 1) sur la caractérisation géochimique et la datation de l'eau souterraine (Murphy et al., 2010), 2) sur la caractérisation hydrogéologique réalisée à Shannon (Lefebvre et al., 2010) et 3) sur la synthèse hydrogéologique du secteur Valcartier (Ouillon et al., 2010). Les détails techniques et scientifiques de ces rapports ne sont ainsi pas repris dans le présent rapport d'expertise, mais les implications des résultats documentés dans ces rapports sont discutées dans le rapport d'expertise. Les études antérieures à celles accompagnant le rapport d'expertise représentent la compréhension du système aquifère qui avait été atteinte sur la base des données disponibles aux périodes où ces études ont été réalisées. Cette évolution de la compréhension découle de la nature itérative de la caractérisation hydrogéologique des sites contaminés, particulièrement pour les sites complexes et de grande envergure comme celui du système aquifère de Valcartier (Cohen et al., 1997; Lefebvre et al., 2006)

### **1.3 Mandat et contenu du rapport**

Le mandat reçu pour cette expertise hydrogéologique comporte deux volets : 1) évaluer l'exposition au TCE par l'eau souterraine provenant des puits résidentiels dans la municipalité de Shannon et 2) évaluer le rapport d'expertise hydrogéologique produit par le Pr. Chapuis en 2009. La section 2 de ce rapport fait un survol des éléments essentiels du contexte hydrogéologique de la région d'étude. La section 3 présente notre évaluation de l'exposition au TCE dans l'eau souterraine. La section 4 documente la contre-expertise et la section 5 donne nos conclusions.

## 2. Contexte hydrogéologique

Cette section décrit brièvement les caractéristiques du contexte hydrogéologique de la région d'étude qui sont essentielles à la compréhension de la problématique du TCE dans l'eau souterraine dans le secteur Valcartier. Des efforts sont faits pour que le texte de ce rapport soit compréhensible pour des non spécialistes; les rapports scientifiques accompagnant l'expertise donnent les détails requis pour documenter les travaux soutenant l'expertise. Pour faciliter l'accessibilité du texte, les termes techniques utilisés sont définis lors de leur première utilisation dans le rapport. Les termes définis sont indiqués par un caractère gras.

### 2.1 La caractérisation des aquifères

L'eau souterraine et les matériaux géologiques dans lesquels elle s'écoule ne sont pas accessibles pour l'observation directe. La caractérisation des conditions d'écoulement de l'eau souterraine et de la présence de contaminants dans l'eau souterraine repose donc sur des mesures faites à partir de la surface du sol. Ces mesures sont limitées pour des questions d'accessibilité et de coût, ce qui fait que ces mesures ne peuvent faire qu'une couverture partielle d'un système d'écoulement. Bien que partielles, ces mesures doivent tout de même assurer la définition d'une image représentative des conditions présentes dans le système d'écoulement. Cette image s'avère parfois partielle ou imprécise à cause des limites inhérentes à l'acquisition des mesures.

Les **aquifères** sont des formations géologiques perméables qui permettent un écoulement significatif d'eau souterraine et permettent généralement l'exploitation de l'eau souterraine. On peut définir deux types principaux d'aquifères, les **aquifères granulaires** et les **aquifères fracturés**. Dans les aquifères granulaires, comme les sables et graviers, l'écoulement de l'eau souterraine se fait dans les pores formés par les espaces présents entre les grains solides. Dans les aquifères fracturés, présents généralement dans le roc, l'écoulement se fait à travers un réseau de fractures ouvertes qui sont en contact les unes avec les autres. Un **aquitard** est une formation géologique peu perméable à travers laquelle l'écoulement de l'eau souterraine est plus limité. Les aquitards sont communément constitués de sédiments fins (argile et silt). La **conductivité hydraulique** est une propriété d'un matériel géologique reliée à sa perméabilité à l'eau, c'est-à-dire la facilité qu'aura l'eau à s'écouler à travers ce matériel. Les aquifères ont des conductivités hydrauliques élevées tandis que les aquitards ont des conductivités hydrauliques faibles.

L'eau souterraine se retrouve normalement à une certaine profondeur sous la surface du sol. On appelle **surface libre** la limite entre la **zone non saturée** sous la surface du sol et la **zone saturée** en profondeur dans laquelle l'eau souterraine occupe tous les pores ou fractures. Dans la zone non saturée, l'air occupe une partie des pores ou fractures qui contiennent aussi de l'eau. Une **nappe** représente la partie de l'aquifère saturée en eau souterraine. On utilise souvent de façon équivalente les termes « aquifère » et « nappe », mais l'aquifère réfère plutôt au contenant (le matériel géologique) alors que la nappe représente plutôt le contenu (l'eau souterraine). Une nappe ou un aquifère est dit **captif** lorsqu'il est complètement saturé en eau souterraine et qu'il est confiné entre deux **aquitards**. Une nappe ou un aquifère dit **libre** est partiellement saturé en eau souterraine et sa limite supérieure est définie par la **surface libre**.

À l'aide de forages, il est possible d'installer un **piézomètre** ou un **puits d'observation** qui sont des tubes dont la base est munie d'une **crépine**. La crépine est simplement un intervalle de tube perforé qui permet à l'eau souterraine de pénétrer dans le tube. Le piézomètre a généralement une crépine de longueur restreinte (1 mètre ou moins) tandis qu'un puits d'observation est équipé d'une crépine pouvant avoir plusieurs mètres de longueur. On appelle **charge hydraulique** l'élévation du niveau de l'eau souterraine dans le piézomètre ou le puits d'observation (cette élévation est généralement exprimée par rapport au niveau moyen de la mer). L'écoulement de l'eau souterraine dans les aquifères se fait des endroits où l'élévation de l'eau souterraine est plus importante (charge hydraulique élevée) vers les endroits où elle est plus faible (charge hydraulique faible). Comme une carte topographique montre l'élévation de la surface du sol, il est possible d'établir une **carte piézométrique** qui illustre la topographie de l'élévation du niveau de l'eau souterraine. Cette carte permet de définir les directions d'écoulement de l'eau souterraine.

D'après le NRC (2004), une « **zone source** » de contamination est une zone sous la surface du sol contenant des contaminants et qui agit en tant que réservoir soutenant un panache de contaminants dans l'eau souterraine, l'eau de surface ou l'air, ou qui agit en tant que source d'exposition directe. Un **panache** de contaminants dissous est constitué d'eau souterraine dans laquelle il y a présence de contaminants. Ce panache migre dans les aquifères à partir d'une zone source en suivant le cheminement de l'écoulement de l'eau souterraine. L'eau souterraine contient toujours des composés dissous d'origine naturelle ou provenant des activités humaines à la surface du sol. Ces composés peuvent être différents selon les conditions à leur origine, ce qui fait que la composition de l'eau souterraine peut donner des indications sur son origine et son cheminement, ou permettre de distinguer des eaux souterraines d'origines différentes.

La caractérisation des aquifères doit permettre de définir les conditions qui contrôlent l'écoulement de l'eau souterraine et la migration des contaminants : 1) la distribution des différents matériaux géologiques présents sous la surface du sol, 2) la nature aquifère ou aquitard des matériaux géologiques, 3) la conductivité hydraulique des matériaux géologiques, 4) les niveaux d'eau (charge hydraulique) qui indiquent la direction d'écoulement, et 5) les concentrations en contaminants qui permettent de définir l'étendue du panache de différents contaminants dans les aquifères et de relier ces panaches à la zone source qui est à leur origine.

La caractérisation hydrogéologique conventionnelle est basée en grande partie sur l'utilisation de forages qui est le moyen d'obtenir des données directes sur les aquifères. Lors des forages, les déblais de forage remontent à la surface et permettent d'identifier le matériel en cours de forage. Les **descriptions de forage** sont faites à partir d'échantillons de déblais de forage et elles indiquent les limites des différents matériaux rencontrés en cours de forage. En cours de forage, des échantillons de sols peuvent aussi être prélevés pour mieux définir la nature des matériaux que ne le permettent les déblais de forage. Des **analyses granulométriques** peuvent être faites sur les échantillons de sol pour déterminer la dimension des particules composant le sol. Les forages servent aussi à faire l'installation de puits d'observation servant 1) à mesurer les niveaux d'eau, 2) à échantillonner l'eau souterraine pour faire des analyses chimiques permettant de déterminer les concentrations des contaminants et des autres composés chimiques dissous dans l'eau, et 3) de faire des **essais de perméabilité** permettant d'estimer la conductivité hydraulique des matériaux en contact avec la crépine du puits d'observation.

Des échantillons d'eau souterraine peuvent aussi être prélevés à l'aide de **méthodes par enfouissement** (*direct push*) qui impliquent l'enfoncement dans le sol d'une tige métallique creuse à l'extrémité de laquelle il y a une crépine qui permet d'échantillonner l'eau tout au long de l'enfoncement de la crépine. Les méthodes par enfouissement sont aussi parfois utilisées pour prendre des mesures qui permettent aussi l'identification en continu des matériaux avec un **pénétrromètre** répondant aux propriétés mécaniques des matériaux.

L'intégration et l'interprétation des données obtenues des forages et des puits d'observation doivent être faites pour définir les conditions d'écoulement de l'eau souterraine et de migration du ou des contaminants dans le système aquifère; dans le cas de Shannon c'est le TCE et ses produits de dégradation. Des approches similaires ont été utilisées pour définir les conditions d'écoulement et de migration du TCE pour l'ensemble du secteur Valcartier (Ouillon et al., 2010) et pour la région plus restreinte de Shannon (Lefebvre et al., 2010). Les résultats de l'interprétation des données pour Shannon seront décrits dans les sections suivantes. Le processus d'interprétation suit généralement les étapes suivantes :

- La première étape de l'analyse des données consiste à définir le contexte géologique. À cette fin, les matériaux identifiés dans les forages sont regroupés en unités géologiques distinctes qui ont été mises en place par un processus de déposition similaire. Des cartes de l'épaisseur et de l'élévation des différentes unités sont produites à partir de la compilation de l'élévation des limites entre les unités géologiques identifiées en forage.
- La deuxième étape vise à définir le rôle des unités géologiques dans le système aquifère, c'est-à-dire soit à titre d'unité aquifère ou d'unité aquitard. Cette définition est basée sur les valeurs de conductivité hydraulique découlant de l'analyse des essais de perméabilité.
- La troisième étape a pour but de définir les directions d'écoulement de l'eau souterraine. À cette fin, des cartes de l'élévation des niveaux d'eau sont produites pour chaque unité aquifère. Les directions d'écoulement de l'eau souterraine vont des zones où l'eau souterraine est plus élevée vers les zones où elle est moins élevée.
- La quatrième étape consiste à définir l'étendue du panache de contamination en représentant sur des cartes les zones de concentration en TCE dans l'eau souterraine. Les endroits en amont de l'écoulement de l'eau souterraine où les concentrations en contaminant sont plus fortes peuvent représenter des zones sources de la contamination. La présence d'activité ayant pu être historiquement à l'origine d'émissions de contaminants peut aussi servir à confirmer la localisation des zones sources.
- Les étapes précédentes permettent de dresser un portrait des conditions présentes dans le système aquifère. À partir de cette description, il est possible de développer un **modèle conceptuel** du système aquifère qui décrit « qualitativement » les conclusions qui peuvent être tirées du portrait du système aquifère. Ces conclusions portent sur les rôles des unités aquifères, les conditions de recharge de l'aquifère par l'infiltration des précipitations, les directions d'écoulement de l'eau souterraine, les zones sources de contamination et enfin les voies de migration de la contamination qui doivent suivre les directions d'écoulement de l'eau souterraine.
- Pour obtenir une compréhension « quantitative » du système aquifère, un **modèle numérique d'écoulement** peut être développé. Un tel modèle représente la distribution de la conductivité hydraulique des matériaux, la recharge du système aquifère et les conditions rencontrées aux limites du système. Le logiciel servant à la modélisation

numérique (nommé simulateur numérique) représente numériquement la physique de l'écoulement de l'eau souterraine et permet de calculer les niveaux de l'eau souterraine et l'intensité et la direction de cet écoulement. Le modèle numérique peut aussi être utilisé pour tracer les voies de migration de la contamination à partir des zones sources.

## 2.2 Contexte hydrogéologique

### 2.2.1 Unités aquifères et aquitard

Le tableau 2.1 et la Planche 2.1 montrent le contexte hydrogéologique qui a été défini dans le secteur Valcartier et qui comprend deux unités aquifères ainsi que deux unités aquitard. Les deux aquifères sont constitués 1) de sable et gravier deltaïque et 2) de diamictons qui sont constitués de particules de taille très variable, allant de sable très fin jusqu'à des blocs. Les deux aquitards sont formées 1) de sédiments prodeltaïques présent à l'intérieur des sables et graviers deltaïques et 2) de silts glaciomarins qui séparent les deux aquifères deltaïques et des diamictons, mais qui sont discontinus localement. La disposition de ces aquifères et aquitards forme deux contextes d'écoulement différents : 1) dans le contexte A retrouvé à Shannon et dans la partie ouest du secteur Valcartier, il n'y a pas d'aquitard prodeltaïque, alors que 2) dans le contexte B présent dans la partie est du secteur Valcartier, cet aquitard est présent.

Tableau 2.1. Unités géologiques et nappes définissant les contextes d'écoulement. (D'après Ouellon et al., 2010. La Planche 2.1 montre les relations entre les unités et les nappes ainsi que la distribution spatiale des contextes d'écoulement)

Unités géologiques	Contextes d'écoulement et nappes	
	Contexte A (Shannon et centre du secteur Valcartier)	Contexte B (Est du secteur Valcartier)
Sables deltaïques supérieurs	2) Nappe régionale deltaïque (libre)	1) Nappe libre supérieure deltaïque
Silts prodeltaïques		Aquitard prodeltaïque
Sables deltaïques inférieurs		2) Nappe régionale deltaïque (semi-captive)
Silt glaciomarin	Aquitard glaciomarin (discontinu)	
Diamictons (Proglaciaire et till)	3) Nappe semi-captive des diamictons	
Socle rocheux		

La disposition des aquifères et aquitards forme trois nappes distinctes : 1) une nappe libre supérieure deltaïque se trouve au-dessus de l'aquitard prodeltaïque; 2) une nappe régionale deltaïque s'étend sur toute la zone d'étude (elle se trouve en conditions libres dans le contexte A retrouvé à Shannon et au centre du secteur Valcartier alors qu'elle est en conditions semi-captives dans le contexte B présent à l'est du secteur Valcartier); et 3) une nappe des diamictons est en conditions semi-captives parce que cet aquifère s'étend sur les flancs des monts Rolland-Auger et Brillant entourant la vallée, où elle est en conditions libres. Dans le centre de la vallée où l'aquitard glaciomarin est présent, cette nappe est en condition captive. Lorsque l'aquitard glaciomarin est discontinu, les nappes des diamictons et des sables deltaïques sont en contact.

L'écoulement de l'eau souterraine dans la nappe régionale deltaïque et dans la nappe des diamictons est généralement semblable. L'écoulement se fait des flancs des monts des côtés sud et nord de la vallée vers le centre et surtout de l'est vers l'ouest pour émerger dans la rivière Jacques-Cartier. Une **limite de partage des eaux souterraines** est présente dans le contexte B et elle sépare l'eau souterraine qui se dirige vers l'ouest d'un côté de l'eau souterraine qui se dirige vers l'est de l'autre côté (localisation montrée sur la Planche 2.1).

L'eau souterraine est latéralement en communication dans l'unité deltaïque mais la présence de l'aquitard prodeltaïque limite l'écoulement vertical dans cette unité dans la partie est du secteur Valcartier (contexte B). Il y a tout de même un lent écoulement vers le bas à travers l'aquitard prodeltaïque. L'autre unité aquitard glaciomarine limite les échanges d'eau souterraine entre les aquifères deltaïque et des diamictons, mais cet aquitard est discontinu, ce qui fait qu'il y a des échanges locaux entre les deux aquifères.

La Planche 2.2 montre un modèle géologique représentant la distribution des unités rencontrées à Shannon. Ce modèle est montré d'un point de vue regardant du sud-est vers le nord-ouest. On voit qu'à Shannon les sédiments deltaïques sont plus épais au centre et deviennent plus minces en allant vers le nord mais surtout en allant vers le sud. Au sud, la topographie du roc remonte en direction du Mont Rolland-Auger et on ne retrouve plus de sédiments deltaïques au-delà d'une certaine élévation de la surface du roc. Les diamictons présentent des épaisseurs irrégulières mais montrent une accumulation importante au centre de la vallée. L'aquitard de silt glaciomarin est généralement présent entre les deux unités aquifères mais il est absent par endroits. L'élévation de la surface de la nappe diminue de l'est vers l'ouest et cela indique que l'écoulement se fait généralement vers l'ouest pour émerger dans la rivière Jacques-Cartier. La rivière a érodé les dépôts meubles et elle est en contact avec les sédiments deltaïques au centre puis en contact avec les diamictons au nord et au sud.

### 2.2.2 *Étendue et concentrations du TCE*

La délimitation du panache de TCE dissous dans l'eau souterraine dans la zone d'étude est basée sur des analyses chimiques d'échantillons d'eau souterraine. Dans la zone d'étude, l'échantillonnage de l'eau souterraine a été fait sur toute l'épaisseur saturée pour permettre de déterminer la distribution en profondeur du TCE. Depuis 2002, le MDN a aussi mis en place un suivi de l'eau souterraine dans les puits d'observation disponibles suite aux différentes caractérisations décrites à la section 1.2. Deux sources de données ont été utilisées pour définir 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 doubles 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*) de marque Geoprobe.

Des cartes du panache de TCE dans la nappe deltaïque régionale ont été produites pour les périodes 2001, 2004-2005 (même que la Planche 2.3), 2007-2008 et la fin 2009. Ces cartes sont présentées par Ouellon et al. (2010) pour l'ensemble du secteur Valcartier et par Lefebvre et al. (2010) pour la région de Shannon.

La Planche 2.3 montre l'étendue du panache de TCE présent dans la nappe deltaïque régionale dans la partie ouest de la Garnison Valcartier ainsi qu'à Shannon en 2004-2005 sur la base des échantillons d'eau souterraines prélevés dans la région d'étude durant cette période. Cette période correspond à la caractérisation hydrogéologique de Shannon réalisée par Sanexen-Amec (2005) en 2004 pour le MDN. Les informations sur les concentrations en TCE ne sont disponibles qu'aux points d'échantillonnage, donc une interprétation est nécessaire pour déterminer l'étendue des zones où le TCE est à l'intérieur d'une plage de concentration. La carte de la distribution en plan du panache de TCE dissous montrée à la Planche 2.3 a ainsi été dessinée manuellement sur la base de toutes les concentrations obtenues sur les échantillons d'eau souterraine prélevés à des puits d'observation ou à des sondages par enfoncement dans la zone d'étude à Shannon de même qu'à des puits d'observation situés à l'extrémité ouest à la Garnison Valcartier.

Sur la Planche 2.3, les zones de concentration en TCE utilisées sont 1) de la limite de détection 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 limite de détection pour les analyses de TCE considérées dans le présent rapport est généralement de 0.1 µg/L. Pour le TCE, la concentration maximale de 5 µg/L représente la recommandation de Santé Canada (2005) pour la qualité de l'eau potable. La valeur de 50 µg/L est la norme pour l'eau potable au Québec (MDDEP, 2001). Enfin, 590 µg/L représente la norme de protection de la vie aquatique (toxicité aiguë) (MDDEP, 2004). Sur la Planche 2.3, les concentrations en TCE observées aux points d'échantillonnages sont montrées par des symboles dont la taille et la couleur correspondent aux quatre plages de concentrations en TCE. Des symboles différents sont utilisés pour distinguer les échantillons provenant de puits et d'échantillons prélevés par enfoncement. Plusieurs symboles sont montrés à la même localisation parce que plusieurs échantillons ont été prélevés à des profondeurs différentes au même endroit. Lors des travaux de caractérisation à Shannon, généralement deux forages ont été faits côte-à-côte et deux installations de puits avec des crépines à différentes profondeur ont été faites dans chaque forage. Chaque site d'échantillonnage est donc généralement composé de 4 puits d'observations installés à des profondeurs différentes (Sanexen-Amec, 2005). À Shannon, pour chaque site d'échantillonnage, 2 à 3 puits ont généralement été installés dans la nappe deltaïque régionale et 1 à 2 puits dans les diamictons. La Planche 2.4 qui sera discutée plus loin montre des exemples de la distribution verticale des puits d'observation.

Sur la Planche 2.3, les zones de concentration en TCE définies pour le panache représentent les secteurs où les concentrations maximales observées à l'intérieur de l'épaisseur de l'aquifère sont

généralement dans la plage des concentrations d'une zone. Les concentrations en TCE déterminées à différentes années se sont révélées être variables. Ainsi, pour qu'une zone de concentration soit délimitée sur les cartes du panache de TCE, nous avons aussi vérifié que les concentrations observées étaient maintenues soit pour les périodes qui précèdent ou qui suivent la période de la carte. Si les concentrations ne sont pas maintenues pour au moins 2 périodes d'échantillonnage, ces concentrations sont montrées sur les cartes mais une zone de concentration n'est pas délimitée autour des puits montrant ces concentrations. Ce critère a servi surtout à la définition des zones de concentrations excédant 590 µg/L (pas présentes sur la Planche 2.3). Ailleurs qu'à proximité des zones sources, les endroits où les concentrations de plus de 590 µg/L ont été observées se sont révélés changer de localisation pour les différentes périodes d'échantillonnage. En suivant ce critère, les zones de concentration de plus de 590 µg/L n'ont été délimitées qu'à RDDC Nord et sur les terrains de la SIVI.

Les directions générales d'écoulement de l'eau souterraine basées sur la carte des niveaux d'eau montrée dans Lefebvre et al. (2010) sont indiquées par des lignes bleues sur la Planche 2.3. La migration du panache de TCE suit les directions d'écoulement. Il y a deux bandes de concentrations entre 5 et 50 µg/L (en jaune) de chaque côté (nord et sud) d'une bande avec des concentrations entre 50 et 590 µg/L (en orange). Un panache secondaire avec des concentrations inférieures à 5 µg/L (en vert) se trouve au nord du panache principal. Ce panache est montré en vert sur la Planche 2.3 et le point d'interrogation au-delà de sa limite à l'est indique que son extension vers l'est n'est pas connue. Sur la Planche 2.3, la cohérence générale entre la localisation des zones de concentrations en TCE et l'écoulement fait en sorte qu'il y a une continuité des zones de concentration en TCE de l'est vers l'ouest suivant la direction d'écoulement.

La Planche 2.4 montre des exemples de la distribution du TCE en profondeur ainsi que de l'évolution dans le temps des concentrations observées pour les périodes 2004-2005, 2007-2008 et la fin 2009. Les coupes verticales utilisent les mêmes couleurs pour les zones de concentrations en TCE que celles montrées en plan sur la Planche 2.3 et les symboles pour les concentrations observées aux puits distinguent les échantillons provenant de puits de ceux provenant de sondages par enfoncement Geoprobe. Les localisations des coupes sont montrées sur la Planche 2.3. La coupe A-A' est orientée dans le sens de l'écoulement de l'eau souterraine et de la migration du TCE, soit de l'est vers l'ouest, alors que les deux autres coupes sont orientées perpendiculairement à l'écoulement. La coupe D-D' est située en amont de l'écoulement, juste à la limite entre la Garnison Valcartier et Shannon, alors que la coupe F-F' est plus à proximité de la rivière Jacques-Cartier. Ces coupes montrent aussi l'interprétation de la continuité latérale des unités géologiques qui ont été identifiées à l'aide des forages.

On note sur les coupes de la Planche 2.4 que les concentrations en TCE ont diminué progressivement entre 2004-2005 et la fin 2009. Sur la coupe A-A' qui est le long de l'écoulement de l'eau souterraine et de la migration du TCE, on note qu'une zone de concentrations en TCE entre 50 à 590 µg/L est continue sur presque toute l'épaisseur entre l'amont (est) et l'aval (ouest) de la coupe, mais l'épaisseur de cette zone est plus réduite à proximité de la rivière Jacques-Cartier. En 2004 seulement, des concentrations en TCE excédant 590 µg/L ont été détectées dans deux puits à l'intérieur de la zone avec des concentrations entre 50 à 590 µg/L. Les concentrations obtenues à ces puits dans les périodes subséquentes de suivi

du TCE en 2007-2008 et 2009 ont toutes été inférieures à 590 µg/L, ce qui fait que cette zone n'a pas été représentée en plan sur la carte de la Planche 2.3. Des concentrations du même ordre de grandeur mais variables ont aussi été mesurées dans des puits situés en amont de Shannon à la Garnison Valcartier avant 2004 (voir Planche 23 dans Lefebvre et al., 2010), ce qui fait que des concentrations de cet ordre ont pu migrer vers Shannon et être à l'origine des valeurs excédant 590 µg/L observées en 2004-2005 sur la coupe A-A'. Cependant, les concentrations observées en amont de Shannon ainsi que dans la coupe A-A' ont diminué significativement en 2007-2008 et en 2009. Sur les coupes transversales D-D' et F-F', une diminution des concentrations dans le temps est aussi observée. Le panache secondaire avec des concentrations inférieures à 5 µg/L qui était présent au nord des coupes (à gauche) n'est plus observé à partir de 2007-2008 et de 2009, respectivement pour les coupes D-D' et F-F'. Au niveau des diamictons, des concentrations sporadiques généralement inférieures à 5 µg/L sont observées à différentes périodes alors que les concentrations entre 5 et 50 µg/L ont été observées juste à l'est de la rivière Jacques-Cartier.

Les données disponibles sur les concentrations de TCE dans l'eau souterraine ont permises de définir l'évolution des zones de concentration dans le panache de TCE entre 2001 et 2009 (Ouellon et al., 2010). Ces données montrent que dans l'ensemble du panache les concentrations maximales en TCE se sont maintenues généralement entre 5 et 590 µg/L. Bien qu'il y ait eu des détections sporadiques de TCE à des concentrations excédant 590 µg/L à quelques endroits dans le panache, les zones de concentrations continues dans le temps et excédant 590 µg/L ont été limitées aux environs des zones sources sur les terrains de RDDC Nord et de la SIVI. Depuis 2001, les concentrations en TCE ont diminué de façon générale dans le panache de TCE. En 2009 une seule zone avec des concentrations excédant 590 µg/L était encore présente dans le panache à proximité de la zone source du Secteur 214 sur les terrains de la SIVI (Ouellon et al., 2010). Toutes les autres zones avec des concentrations excédant 590 µg/L se sont dissipées entre 2001 et 2009.

### 2.2.3 Zones sources et voies de migration du TCE

Dans le rapport de Lefebvre et al. (2003), trois principales zones sources de TCE avaient été identifiées. Sur la base des travaux réalisés depuis la caractérisation du MDN en 2001-2002, ces mêmes zones sources sont encore considérées comme les principales sources de TCE dans la nappe deltaïque régionale. Des activités ayant fait l'usage de TCE ont cependant été répertoriées à plusieurs localisations à proximité de ces zones sources. Il faudrait donc considérer ces zones sources non pas comme des endroits ponctuels d'émission du TCE mais plutôt comme des secteurs où des émissions de TCE ont pu contribuer à la contamination de l'eau souterraine sous-jacente ou même à l'apport additionnel de TCE dans le cheminement des panaches prenant origine aux zones sources. Ces panaches migrent surtout vers l'ouest en direction de la rivière Jacques-Cartier en traversant d'abord la Garnison Valcartier et Shannon avant d'atteindre la rivière. En dehors des terrains de RDDC Nord et de la SIVI, il n'y a pas eu d'endroit à l'intérieur de la Garnison Valcartier ou de Shannon où des zones sources auraient pu faire des émissions significatives dans le panache en migration (Ouellon et al., 2010; Lefebvre et al., 2010). Par contre, les travaux récents de Murphy et al. (2010) ont indiqué la présence d'une quatrième zone source qui pourrait être l'ancien dépotoir situé à l'ouest des terrains de la SIVI. Les quatre zones sources identifiées seront brièvement décrites.

RDDC Nord contient en fait plusieurs zones sources présumées, dont les principales sont associées aux Bâtiments 98 (B98) et 67 (B67) ainsi qu'à l'ancien Lagon Bleu. La présence de zones sources potentielles à RDDC Nord a d'abord été présumée sur la base des activités qui ont historiquement utilisées du TCE à l'intérieur de RDDC Nord (Lefebvre et al., 2003; Ouellon et al., 2010). Lefebvre et al. (2003) ont ensuite identifié les zones sources comme étant reliées à B98, B67 et au Lagon Bleu à partir d'une étude détaillée de la distribution des concentrations en TCE dans l'eau souterraine sous RDDC Nord. Cette étude a permis de subdiviser le panache de TCE en différentes parties sous RDDC Nord et d'identifier l'origine présumée de ces panaches aux zones sources de B98, B67 et du Lagon Bleu. À part les zones sources ainsi identifiées, d'autres sites ou bâtiments ont aussi fait l'usage de TCE à RDDC Nord et pourraient avoir contribué moindrement aux émissions de TCE associées aux trois zones sources identifiées.

L'émission de TCE à RDDC Nord à B98 a été faite au-dessus de l'aquitard silteux prodeltaïque qui s'étend vers l'ouest sous une partie de RDDC Nord. L'émission de TCE reliée à B98 a donc d'abord affecté la nappe libre deltaïque supérieure qui se trouve au-dessus de l'aquitard prodeltaïque. Le panache présentement retrouvé dans cette nappe est relativement mineur et apparemment stagnant à cause de sa localisation près d'une ligne de partage des eaux souterraines et dans une dépression de la surface supérieure de l'aquitard. Toutefois, ces émissions ont aussi entraîné la migration du TCE vers le bas à travers l'aquitard prodeltaïque suivant l'écoulement de l'eau souterraine qui se fait du haut vers le bas à travers l'aquitard. Finalement, après avoir émergé sous l'aquitard, le TCE a poursuivi sa migration vers l'ouest suivant le sens de l'écoulement de l'eau souterraine dans la nappe deltaïque régionale. Les zones sources B67 et du Lagon Bleu sont juste au-delà de l'extension ouest de l'aquitard prodeltaïque. Une partie du TCE émis par ces zones sources aurait donc pu suivre le même cheminement que pour B98. Cependant, comme ces zones sources sont localisées au-delà de l'aquitard, une partie du TCE aurait pu être émis par B67 et le Lagon Bleu directement dans la nappe deltaïque régionale, sans transiter à travers l'aquitard silteux, ce qui a une incidence importante sur le temps de migration du TCE entre ces zones sources et Shannon.

Sur les terrains de la SIVI, deux zones sources situées à des endroits différents étaient déjà connues au moment de la rédaction du rapport de Lefebvre et al. (2003) : ce sont les zones sources du Secteur 214 et de l'ancienne Lagune C. Le Secteur 214 semble émettre dans des conditions semblables à celles rencontrées à B67 et au Lagon Bleu à RDDC Nord, soit juste au-delà de l'extension de l'aquitard prodeltaïque. Une partie de la migration du TCE émis par la zone source du Secteur 214 aurait donc pu atteindre directement la nappe deltaïque régionale. De plus, les émissions de TCE aux environs de cette zone source atteignent la nappe deltaïque régionale près de la limite de partage des eaux souterraines, ce qui aurait pu permettre une migration de panaches de TCE dissous à la fois vers l'ouest, et la Garnison Valcartier, ainsi que vers l'est, et la Ville de Québec. Un système de pompage et traitement saisonnier est en opération depuis plusieurs années à cette zone source, ce qui devrait limiter les nouveaux apports de TCE dans la nappe régionale deltaïque à partir de cette zone source. Sur les terrains de la SIVI, une zone source est aussi associée à l'ancienne Lagune C. Les émissions de TCE à partir de la zone source de la Lagune C se font à la fois dans la nappe deltaïque régionale et la nappe semi-captive des diamictons (Ouellon et al., 2010). Enfin, une zone source potentielle a été reliée par Murphy et al. (2010) à l'ancien dépotoir qui était présent à la limite ouest des terrains de la SIVI. La présence d'une nouvelle zone source a été présumée sur la base de l'apport de TCE

dans la nappe libre à partir du diamicton à un endroit où il y a absence de l'aquitard glaciomarin qui sépare normalement ces aquifères. L'origine de ce TCE à partir d'une zone source distinctes de celles déjà identifiées a été supposée sur la base de la géochimie très particulière et l'âge important de l'eau souterraine associée à l'émergence de TCE à partir du diamicton. L'ancien dépotoir a été présumé être cette zone source parce que sa localisation est cohérente avec la direction d'écoulement de l'eau souterraine dans les diamictons. D'autres sites d'utilisation du TCE localisés sur les terrains de la SIVI entre la zone d'émergence du TCE et l'ancien dépotoir (Lagunes X et A) pourraient aussi contribuer au TCE associé à cette zone source ou être la zone source responsable des émissions plutôt que l'ancien dépotoir.

La Planche 2.5 montre les voies de migration présumées du TCE vers l'ouest à partir des 4 zones sources identifiées dans le secteur Valcartier. Ces voies de migration ont été définies par Murphy et al. (2010) à partir des signatures géochimiques distinctes de l'eau souterraine associée au TCE provenant des 4 zones sources. Ces voies de migration sont aussi cohérentes avec les proportions des produits de dégradation du TCE associées aux zones sources (Ouillon et al., 2010; Lefebvre et al., 2010). La Planche 2.5 indique que la voie de migration 1 associée au panache secondaire retrouvé à Shannon avec des concentrations en TCE inférieures à 5 µg/L n'est pas définie en amont de Shannon. La voie de migration 2 résulte de la convergence du TCE émis à RDDC Nord ainsi qu'au Secteur 214 sur les terrains de la SIVI. Le TCE provenant de ces zones sources est associé à de l'eau souterraine qui a la même signature géochimique. Cependant, l'eau souterraine provenant de RDDC Nord contient des concentrations significatives en perchlorate, qui est considéré ici comme un traceur, qui la distingue des autres zones sources. Contrairement à la conclusion émise dans le rapport de Lefebvre et al. (2003), Murphy et al. (2010) ont établi que le TCE émis par les zones sources à RDDC Nord et au Secteur 214 a atteint Shannon. Cette conclusion se fonde sur la géochimie de l'eau souterraine typique de ces zones sources dans une partie du TCE présent à Shannon ainsi que la présence de fortes concentrations en perchlorate associées à RDDC Nord qui sont observées jusqu'à Shannon. La voie de migration 3 est associée à la zone source potentielle qui est présumée être l'ancien dépotoir à l'ouest des terrains de la SIVI. Le peu d'information que nous avons sur ce site rendent cette hypothèse incertaine. D'autres sites d'utilisation du TCE présents sur les terrains de la SIVI dans les environs de la voie de migration 3 pourraient aussi avoir contribué au TCE relié à cette voie de migration ou être les zones sources réellement à l'origine du TCE associé à cette voie, plutôt que l'ancien dépotoir. À partir de cette zone source, la migration initiale du TCE se produirait dans les diamictons pour ensuite émerger dans la nappe deltaïque régionale à un endroit où l'aquitard glaciomarin est absent. Finalement, la voie de migration 4 est associée à la zone source de l'ancienne Lagune C à partir de laquelle la migration initiale du TCE a pu se faire directement dans la nappe deltaïque régionale ou dans les diamictons pour émerger plus loin dans la nappe deltaïque régionale.

### **3. Exposition au TCE dans l'eau souterraine**

Ce chapitre présente une discussion des conditions requises pour qu'il y ait exposition au TCE présent dans l'eau souterraine à partir de puits résidentiels servant à l'alimentation en eau potable à Shannon. La section 3.1 discute des conditions d'exposition potentielle au TCE des puits résidentiels et identifie les types de puits et les endroits à Shannon qui peuvent avoir permis une exposition au TCE. Les hypothèses concernant ces conditions d'exposition au TCE sont vérifiées en analysant les résultats du suivi du TCE dans les puits résidentiels de Shannon qui a été réalisé par le MDDEP entre 2000 et 2009. La section 3.2 présente une estimation de la durée de l'exposition potentielle au TCE à Shannon sur la base des périodes d'émission du TCE aux zones sources et du temps requis pour la migration du TCE à partir des zones sources jusqu'à Shannon. La section 3.3 décrit l'évolution des concentrations en TCE dans le temps à Shannon de façon à déterminer l'intensité de l'exposition potentielle. La section 3.4 documente les concentrations en produits de dégradation du TCE qui ont été observées à Shannon.

#### **3.1 Conditions d'exposition dans les puits résidentiels à Shannon**

Bien que du TCE soit présent à certains endroits dans l'eau souterraine à Shannon, ce ne sont pas tous les puits résidentiels de la municipalité qui ont pu capter du TCE. Cette section vise à définir les conditions d'exposition au TCE à partir de l'eau souterraine pompée par les puits résidentiels à Shannon. La première partie de cette discussion (section 3.1.1) porte sur la définition conceptuelle des conditions qui peuvent entraîner le captage de TCE dans les puits résidentiels à Shannon sur la base du contexte hydrogéologique ainsi que des types d'aménagements des puits résidentiels. La section 3.1.2 analyse ensuite les résultats du suivi des puits résidentiels par le MDDEP effectué entre 2000 et 2009 pour déterminer si la présence de TCE dans certains de ces puits peut être reliée à leur localisation à l'intérieur ou à l'extérieur du panache de TCE montré à la Planche 2.3. Finalement, la section 3.1.3 utilise aussi les résultats du suivi du MDDEP pour les puits pour lesquels la profondeur a pu être déterminée afin d'identifier l'incidence de l'unité géologique dans laquelle se fait le pompage du puits sur le potentiel d'exposition au TCE.

##### **3.1.1 Modèle conceptuel de l'exposition au TCE dans les puits résidentiels**

Conceptuellement, il ne devrait y avoir une exposition potentielle des puits résidentiels au captage d'eau souterraine contenant du TCE que 1) si ces puits sont localisés à l'intérieur du panache de TCE illustré à la Planche 2.3 et que 2) ces puits captent l'eau souterraine à partir d'une unité géologique dans laquelle on retrouve du TCE. La Planche 3.1 présente un modèle conceptuel du contexte hydrogéologique et de la migration du TCE qui a pour but d'expliquer comment le TCE a pu être capté ou non par les puits résidentiels de Shannon. Les figures de la Planche 3.1 sont conceptuelles mais elles sont représentatives des conditions observées sur les voies d'écoulement et de migration du TCE à l'intérieur du panache. Ce modèle conceptuel peut être comparé à la coupe A-A' de la Planche 2.4 ainsi qu'aux sections est-ouest du modèle géologique de la Planche 2.2 pour en évaluer la représentativité. D'autres représentations du contexte hydrogéologique de Shannon sont aussi présentées par Lefebvre et al. (2010) ainsi que Murphy et al. (2010).

La figure du haut de la Planche 3.1 montre comment l'eau souterraine s'écoule à travers les unités géologiques retrouvées à Shannon. Les deux unités aquifères sont les sables deltaïques et les diamictons qui sont séparés par l'aquitard glaciomarin peu perméable qui est discontinu par endroits, permettant des échanges locaux d'eau souterraine entre les deux aquifères. L'eau souterraine qui s'écoule dans la portion de Shannon située à l'est de la rivière Jacques-Cartier provient de la Garnison Valcartier et plus en amont de RDDC Nord et de la SIVI avant d'atteindre la rivière, soit un écoulement de l'est vers l'ouest dans ce secteur. L'écoulement provient aussi de la recharge provenant de l'infiltration des précipitations à partir de la surface du sol. L'eau souterraine s'écoule indépendamment dans les deux aquifères lorsqu'ils sont séparés par l'aquitard glaciomarin mais il y a émergence d'eau souterraine vers le haut à partir des diamictons vers l'aquifère deltaïque lorsque l'aquitard est absent. L'eau souterraine émerge dans la rivière Jacques-Cartier à partir des aquifères deltaïques et des diamictons. La rivière est un point de convergence de l'eau souterraine et elle draine aussi l'eau souterraine provenant des aquifères deltaïques et des diamictons qui sont aussi présents du côté ouest de la rivière.

Les informations fournies par la base de données du Système d'information hydrogéologique (SIH) du MDDEP (2010) compile les fiches d'installations des puits fournies par les puisatiers (ou foreurs d'eau). Les données du SIH et la consultation de puisatiers locaux qui ont installé des puits à Shannon a permis de répertorier les types d'installations réalisées à Shannon. La Planche 3.1 montre ainsi conceptuellement trois types de puits résidentiels qui se retrouvent à Shannon et qui captent l'eau souterraine à partir d'unités géologiques différentes : 1) puits au roc, 2) puits dans les diamictons et 3) puits dans les sables deltaïques.

Au Québec, le mode le plus commun d'installation des puits résidentiels consiste en forages réalisés jusqu'au roc avec des foreuses de type marteau fond de trou. Ces foreuses permettent de pénétrer à travers les dépôts meubles tout en avançant un tubage métallique pour empêcher ces dépôts de se refermer sur le forage. Ce tubage est avancé avec le forage jusqu'à ce que le roc soit atteint. À partir de la surface du roc, le forage est poursuivi dans le roc sans avancer le tubage. Le forage se poursuit généralement dans le roc jusqu'à ce qu'il y ait des venues d'eau significatives qui assurent que le puits aura une capacité de captage suffisante. Ce type de puits est commun à Shannon.

Nous avons appris de firmes de forage ayant travaillé à Shannon, qu'il arrive parfois que lors de forages qui ont pour but d'atteindre le roc le tubage ne puisse plus être avancé à travers l'unité de diamictons à cause de la présence de gros blocs rocheux. Dans ces cas, le forage est arrêté dans les diamictons et le tubage est laissé ouvert dans cette unité. Finalement, certains puits sont simplement forés jusqu'aux sables deltaïques ou installés dans cette unité avec des pointes filtrantes. Les forages qui se terminent dans les sables deltaïques ne sont généralement pas munis de crépines mais simplement ouverts à leur base dans cette unité, ce qui peut permettre la remontée de sable dans le tubage sans trop entraver l'alimentation en eau de ces puits.

Les puits résidentiels ont une aire d'alimentation de dimension très restreinte, c'est-à-dire qu'ils ne pompent que l'eau souterraine qui circule à proximité du puits. Les tubages des puits résidentiels ne sont pas scellés au contact des dépôts meubles ou du roc, ce qui peut permettre une certaine circulation d'eau souterraine le long du tubage entre des unités perméables adjacentes au tubage.

La figure inférieure de la Planche 3.1 montre conceptuellement comment le TCE migre dans les aquifères rencontrés à Shannon. À la fois dans la nappe deltaïque régionale et la nappe des diamictons, le TCE provient de zones sources localisées en amont (à l'est) de Shannon et ce TCE a migré jusqu'à Shannon grâce à l'écoulement de l'eau souterraine dans laquelle le TCE est dissous. En amont de Shannon, du TCE migrant dans l'aquifère des diamictons émerge dans l'aquifère deltaïque sus-jacent à des endroits où l'aquitard glaciomarin est absent entre les deux aquifères. Cette émergence a été mise en évidence par la signature géochimique et l'âge de l'eau souterraine contenant le TCE (Murphy et al., 2010).

Ce phénomène d'émergence pourrait expliquer pourquoi le panache de TCE dans les diamictons ne présente pratiquement plus de concentrations en TCE excédant 5 µg/L à Shannon (Ouellon et al., 2010). À Shannon, il y a eu des détections sporadiques de TCE dans les diamictons généralement à des concentrations inférieures à 5 µg/L. Par contre, dans l'aquifère deltaïque, le panache de TCE est continu à des concentrations qui sont généralement entre 5 et 590 µg/L (Planches 2.3 et 2.4).

En tenant compte du contexte hydrogéologique, des conditions d'écoulement, de l'étendue du panache de TCE et des types d'installations de puits rencontrés à Shannon, les conclusions suivantes peuvent être tirées sur le potentiel d'exposition au TCE par l'eau souterraine captée par les puits résidentiels présents dans le panache de TCE qui sont installés dans les différentes unités géologiques :

- Les puits au roc ne pompent pas d'eau contenant du TCE et leur intervalle de captage dans le roc est relativement éloigné des unités où se retrouve du TCE. Donc, les puits au roc ne devraient donc pas être exposés au TCE;
- Les puits dans les diamictons captent de l'eau souterraine qui peut contenir des concentrations généralement inférieures à 5 µg/L mais qui excèdent cette valeur par endroit. De plus, il y a un potentiel pour que le captage de ces puits entraîne de l'eau souterraine provenant de l'aquifère deltaïque sus-jacent. Donc, il y a un certain potentiel pour que ces puits captent du TCE, généralement à des concentrations inférieures à 5 µg/L, mais localement les concentrations captées pourraient excéder 5 µg/L;
- Dans les cas des puits qui pompent dans les sables deltaïques à l'intérieur du panache, l'eau captée pourrait avoir des concentrations excédant 50 µg/L, sauf pour les puits en bordure du panache où les concentrations sont entre 5 et 50 µg/L.

Dans les deux sections suivantes, une vérification sera faite de la représentativité du modèle conceptuel de l'exposition au TCE dans les puits résidentiels de Shannon présenté à la Planche 3.1. Cette vérification sera faite en comparant les conditions d'exposition avec les concentrations en TCE observées lors du suivi réalisé par le MDDEP entre 2000 et 2009 dans les puits résidentiels de Shannon. La section suivante discute d'abord des résultats obtenus pour l'ensemble des puits par rapport à leur localisation à l'intérieur ou à l'extérieur du panache. La section 3.1.3 traitera par la suite des puits pour lesquels la profondeur est connue pour vérifier l'incidence de l'unité géologique dans laquelle se fait le pompage des puits résidentiels sur l'exposition au TCE.

### 3.1.2 Exposition des puits résidentiels par rapport au panache de TCE

Le MDDEP a réalisé un suivi des concentrations en TCE dans l'eau souterraine captée par 443 puits résidentiels dans la municipalité de Shannon en plusieurs phases s'échelonnant de 2000 à 2009. La Planche 3.2 montre les concentrations maximales en TCE détectées lors de toute la période de ce suivi, soit de 2000 à 2009. La carte 1 montre l'étendu du suivi du MDDEP qui a couvert des puits résidentiels dans la partie urbanisée de Shannon (à l'est de la rivière Jacques-Cartier) de même que sur la rive ouest de la rivière Jacques-Cartier ainsi qu'aux limites nord et sud de la municipalité. Les résultats de ce suivi permettent d'évaluer la présence du TCE dans les puits résidentiels en relation avec la localisation de ces puits par rapport aux panaches de TCE montrés à la Planche 2.3.

La carte 2 de la Planche 3.2 montre les puits localisés dans la partie urbanisée (à l'est de la rivière Jacques-Cartier) de Shannon où les panaches de TCE ont été délimités. Le tableau 3.1 compile les statistiques sur les concentrations moyennes en TCE pour les puits montrés sur la Planche 3.2 selon leur localisation par rapport aux panaches de TCE. Le panache principal représente le prolongement du panache provenant de la Garnison Valcartier dans lequel les zones de concentrations en TCE excèdent 5 µg/L. Le panache secondaire représente une étendue définie uniquement à Shannon où la zone de concentration de TCE est inférieure à 5 µg/L. Enfin, les endroits qui ne sont pas couverts par le panache principal ou le panache secondaire sont désignés dans ce rapport comme étant « hors panache ».

Tableau 3.1. Concentrations moyennes en TCE dans les puits résidentiels de Shannon selon leur localisation par rapport aux panaches de TCE  
(Statistiques sur les 295 puits de la carte 2 du côté est de la rivière Jacques-Cartier, Planche 3.2)  
(Données du suivi du MDDEP dans les puits résidentiels entre 2000 et 2009)

	Panache principal		Panache secondaire		Hors panache	
<i>Statistiques sur les concentrations en TCE</i>						
TCE Minimum	Non détecté		0.05 µg/L		Non détecté	
TCE Maximum	949 µg/L		1.87 µg/L		3.44 µg/L	
TCE Moyen	78.4 µg/L		0.74 µg/L		0.16 µg/L	
TCE Médian	3.4 µg/L		0.62 µg/L		Non détecté	
<i>Nombre de puits selon les intervalles de concentration en TCE</i>						
Concentrations	Nombre	%	Nombre	%	Nombre	%
Non détecté (n.d.)	16	23.5%	0	0.0%	141	66.5%
n.d. < TCE <=5	19	27.9%	15	100.0%	71	33.5%
5 < TCE <=50	13	19.1%	0	0.0%	0	0.0%
50 < TCE <=590	19	27.9%	0	0.0%	0	0.0%
TCE > 590	1	1.5%	0	0.0%	0	0.0%
<i>Nombre total</i>	68	100.0%	15	100.0%	212	100.0%

Plusieurs des 443 puits ont été échantillonnés à plusieurs reprises et les concentrations moyennes détectées donnent une idée du niveau de TCE représentatif de ces détections. Des statistiques ont été calculées sur les concentrations moyennes du TCE détecté dans 295 puits résidentiels de Shannon localisés du côté est de la rivière Jacques-Cartier et présentés sur la carte 2 de la Planche 3.2. Au niveau des localisations des puits résidentiels par rapport au panache de TCE, sur les 212 puits résidentiels localisés en dehors du panache principal, 141 (67%) n'ont pas eu de détections de TCE et aucun des 71 autres n'a eu des concentrations moyennes en TCE excédant 5 µg/L. Les 15 puits localisés à l'intérieur du panache secondaire ont tous montré la présence de TCE mais à des concentrations moyennes inférieures à 2 µg/L. Enfin, pour les 68 puits localisés à l'intérieur du panache principal, 16 (24%) n'ont pas eu de détections de TCE, tandis que les détections moyennes de TCE ont été les suivantes : inférieures à 5 µg/L pour 19 puits (28%), entre 5 et 50 µg/L pour 13 puits (19%) et excédant 50 µg/L pour 20 puits (29%).

Le tableau 3.1 montre qu'il est nécessaire qu'un puits soit situé à l'intérieur du panache principal pour que les concentrations y excèdent 5 ou 50 µg/L. Par contre, plus de la moitié des puits localisés à l'intérieur des limites du panache ont des concentrations non détectées ou inférieures à 5 µg/L, ce qui montre que la localisation d'un puits à l'intérieur du panache n'implique pas nécessairement que la concentration en TCE va être élevée dans un puits. La prochaine section va évaluer l'incidence sur les détections en TCE de l'unité dans laquelle se fait le captage.

### 3.1.3 Exposition des puits résidentiels par rapport à l'unité de captage

Les cartes 1 et 2 de la Planche 3.3 montrent respectivement les concentrations maximales et moyennes qui ont été détectées lors du suivi du MDDEP dans les puits résidentiels de Shannon pour lesquels les profondeurs des puits ont pu être obtenues. Il n'y a que 57 des 68 puits suivis par le MDDEP et localisés à l'intérieur du panache (tableau 3.1) pour lesquels la profondeur du puits est connue.

À partir des cartes de l'élévation des limites des unités géologiques à Shannon, l'élévation de la profondeur des puits a pu être comparée à celle des unités géologiques, de sorte que l'unité à partir de laquelle les puits captent l'eau souterraine a pu être identifiée. Le tableau 3.2 présente les statistiques sur les concentrations en TCE dans les puits localisés à l'intérieur du panache principal par rapport à l'unité de captage du puits.

Seulement 4 puits au roc ont pu être identifiés à l'intérieur du panache et tous ces puits n'ont pas eu de détection de TCE ou encore des détections près de la limite de détection analytique. On peut noter sur la Planche 3.2 que quelques autres puits à l'intérieur de la zone à plus forte concentration en TCE du panache n'ont pas de détections ou encore des détections sous 5 µg/L. On peut présumer qu'au moins une partie de ces puits dont on ne connaît pas la profondeur est constituée de puits qui captent l'eau souterraine au niveau du roc.

Pour les 13 puits captant dans les diamictons, 2 puits (15%) n'ont pas eu de détections et 7 puits (54%) ont eu des détections inférieures à 5 µg/L. Par contre 3 des puits (23%) dans les diamictons ont des concentrations entre 50 et 590 µg/L.

Tableau 3.2. Concentrations moyennes en TCE dans les puits résidentiels de Shannon dans le panache principal par rapport à l'unité de captage de l'eau souterraine  
 (Les statistiques portent sur les puits montrés sur la carte 2 de la Planche 3.3 localisés à l'intérieur du panache principal et pour lesquels les profondeurs des puits sont connues.)  
 (Données du suivi du MDDEP dans les puits résidentiels entre 2000 et 2009 pour lesquels la profondeur du puits est disponible. Il n'y a que 57 des 68 puits suivis par le MDDEP et localisés à l'intérieur du panache pour lesquels la profondeur est connue.)

	Deltaïque		Diamictons		Roc	
<i>Statistiques sur les concentrations en TCE</i>						
TCE Minimum	Non détecté		Non détecté		Non détecté	
TCE Maximum	949 µg/L		289 µg/L		0.06 µg/L	
TCE Moyen	111 µg/L		37 µg/L		0.01 µg/L	
TCE Médian	13 µg/L		0.04 µg/L		Non détecté	
<i>Nombre de puits selon les intervalles de concentration en TCE</i>						
Concentrations	Nombre	%	Nombre	%	Nombre	%
Non détecté (n.d.)	6	15.0%	2	15.4%	3	75.0%
n.d. < TCE <=5	9	22.5%	7	53.8%	1	25.0%
5 < TCE <=50	10	25.0%	1	7.7%	0	0.0%
50 < TCE <=590	14	35.0%	3	23.1%	0	0.0%
TCE > 590	1	2.5%	0	0.0%	0	0.0%
<i>Nombre total</i>	<i>40</i>	<i>100.0%</i>	<i>13</i>	<i>100.0%</i>	<i>4</i>	<i>100.0%</i>

Enfin, la majorité des puits captant dans l'aquifère deltaïque ont des concentrations en TCE excédant 5 µg/L. Par contre, même dans l'unité deltaïque 6 puits (15%) n'ont pas eu de détections et 9 puits (23%) ont eu des détections à des concentrations inférieures à 5 µg/L, tandis que 10 puits (25%) ont eu des détections entre 5 et 50 µg/L et 15 puits (38%) ont eu des détections excédant 50 µg/L. Sur les Planche 3.2 et 3.3, on peut noter que plusieurs des puits avec des concentrations inférieures à 5 µg/L sont localisés à la périphérie du panache.

La Planche 3.4 montre la profondeur des puits dans les unités géologiques dans lesquelles se fait le captage de l'eau souterraine par le puits. Dans l'unité deltaïque, des concentrations en TCE excédant 5 µg/L se retrouvent à différentes profondeurs dans cette unité. La profondeur des puits dans les diamictons est relativement faible, ce qui pourrait expliquer une partie des détections de TCE excédant 5 µg/L par l'intrusion du TCE dans les diamictons le long du puits à partir de l'aquifère deltaïque. La profondeur des puits dans le roc n'a pas d'incidence sur la détection du TCE qui n'est pas présent dans cette unité à des concentrations significatives.

La section précédente avait permis de conclure qu'un puits devait être situé à l'intérieur du panache principal de TCE pour être exposés à des concentrations moyennes excédant 5 µg/L. Le tableau 3.2 permet quant à lui de conclure qu'à l'intérieur du panache principal de TCE les puits au roc ne sont pas exposés au TCE, tandis qu'il y a un risque d'exposition au TCE dans les

diamictons. Enfin, les puits captant dans l'aquifère deltaïque peuvent être exposés à des concentrations en TCE excédant 5 ou 50 µg/L dans le panache principal de TCE, alors qu'une proportion significative de ces puits (38%) n'a pas de détection de TCE ou des détections inférieures à 5 µg/L.

### **3.2 Durée de l'exposition au TCE à Shannon**

Le TCE a été détecté initialement dans des puits résidentiels de Shannon à la fin de 2000. Le programme de suivi du TCE dans les puits résidentiels réalisé par le MDDEP a ensuite montré que le TCE pouvait être présent à partir de la limite entre Shannon et la Garnison Valcartier et jusqu'à la rivière Jacques-Cartier. La caractérisation réalisée par Sanexen-Amec (2005) à Shannon en 2004 pour le MDN a aussi défini une étendue du panache principal de TCE allant de la Garnison jusqu'à la rivière Jacques-Cartier (Planche 2.3; Lefebvre et al., 2010). Puisque le début de l'arrivée du TCE à Shannon n'a pas été déterminé directement à partir de puits d'observation en amont (à l'est) de Shannon sur le territoire de la Garnison Valcartier, il est nécessaire d'estimer la période probable d'arrivée du TCE à Shannon indirectement à partir des informations disponibles sur les zones sources de TCE et sur le temps de migration du TCE entre ces zones sources et Shannon.

L'estimation de la période d'arrivée du TCE à Shannon permet ensuite d'évaluer la durée d'exposition probable au TCE dans les puits résidentiels jusqu'à 2001, année durant laquelle l'approvisionnement en eau par les puits résidentiels présentant une concentration en TCE excédant 5 µg/L a cessé. Considérant les conclusions des deux sections précédentes, cette durée d'exposition peut s'appliquer aux puits résidentiels localisés à l'intérieur du panache principal de TCE qui captent de l'eau souterraine à partir de l'unité deltaïque. Le tableau 3.2 montre qu'une partie de ces puits a capté du TCE à des concentrations excédant 5 ou 50 µg/L. Les informations disponibles ne permettent pas d'estimer directement le temps d'exposition pour les puits qui captent l'eau souterraine à partir des diamictons.

Il n'y a pas de mesures de terrain qui permettraient de connaître directement la durée de la migration du TCE entre les zones sources où le TCE est émis dans l'eau souterraine et Shannon. Cette évaluation de la durée de la migration du TCE doit donc être réalisée à l'aide d'un modèle numérique qui représente les conditions d'écoulement de l'eau souterraine dans le secteur Valcartier. Un tel modèle a été développé par Ouellon et al. (2010) et calé par la comparaison des niveaux d'eau observés dans les puits avec les niveaux prédits par le modèle. Le modèle a aussi été validé en comparant les directions d'écoulement prédites par le modèle avec les directions observées ainsi qu'avec la distribution du panache de TCE. Enfin, les temps de résidence de l'eau souterraine obtenus par le modèle sont comparables aux âges de l'eau souterraine mesurés sur des échantillons d'eau souterraine par la méthode utilisant le rapport entre les concentrations de tritium et d'hélium (Murphy et al., 2010). La validation rigoureuse du modèle assure la représentativité des propriétés hydrauliques (conductivité hydraulique et porosité) et de la recharge de l'eau souterraine utilisées dans le modèle. Cette validation assure aussi la représentativité des temps de migration du TCE estimés avec le modèle. Cependant, il y a une marge d'erreur dans cette estimation du temps de migration qui sera discutée plus loin (Planche 4.3 et section 4.2.4).

La validation du modèle numérique par rapport à la datation de l'eau souterraine a été faite à l'aide du traçage de particules le long de deux voies d'écoulement dans la nappe deltaïque régionale dont l'origine se trouve aux zones sources de TCE : 1) la voie d'écoulement nord représente la migration du TCE à partir des zones sources à RDDC Nord et au Secteur 214 sur la propriété de la SIVI et 2) la voie d'écoulement sud représente la migration du TCE à partir de la zone source de la Lagune C. Par la méthode du traçage de particules, le modèle prédit le cheminement de ces « particules » virtuelles dans le système d'écoulement et calcule le temps de résidence de la particule du point de départ jusqu'à sa sortie du modèle. Ce traçage peut être fait en deux modes : 1) avec le traçage vers l'aval, dans le sens de l'écoulement de l'eau souterraine, la particule part de son point d'origine pour sortir à une limite du modèle, tel qu'à un cours d'eau; tandis que 2) avec le traçage vers l'amont, dans le sens contraire à l'écoulement, la particule va émerger à l'endroit où l'eau souterraine a rechargé la nappe.

La Planche 3.5 montre les résultats d'un nouveau traçage de particules qui a été fait pour obtenir des temps de migration plus spécifiquement reliés à la migration à partir des zones sources que ce qui avait été fait par Murphy et al. (2010). À l'aide du modèle validé, ce traçage de particules a été fait vers l'amont à partir approximativement de la limite entre Shannon et la Garnison Valcartier où 13 particules ont été émises sur toute la largeur du panache et un peu au-delà. Ces 13 particules ont été émises dans la couche 15 (« slice » du simulateur Feflow) qui se trouve dans la partie inférieure du modèle où se trouve le panache de TCE dans l'aquifère deltaïque (Ouillon et al., 2010). Ces particules ont remonté vers l'amont jusqu'à leur émergence à la surface de la nappe ou à la limite du modèle (figure du haut de la Planche 3.5). Parmi les 13 traces de particules, nous avons fait la sélection des deux traces qui arrivent à proximité des zones sources sur la voie d'écoulement nord (Trace 2 reliée au Secteur 214) et la voie d'écoulement sud (Trace 10 associée à la Lagune C). La migration à partir du Secteur 214 représente aussi celle provenant de RDDC Nord, tandis que la migration à partir de la zone source potentielle de l'ancien dépotoir émerge dans la voie d'écoulement sud dont la dernière portion représente donc la migration dans l'aquifère deltaïque du TCE provenant de cette zone source potentielle.

Les deux graphiques sur la Planche 3.5 montrent respectivement les temps de migration pour les traces des particules 2 et 10 ainsi que la vitesse de l'eau souterraine le long de ces traces. À l'extrémité ouest de ces traces de particules située à la limite entre Shannon et la Garnison, on obtient le temps de migration du TCE depuis la zone source : le temps est de 32 ans pour la trace 2 et de 18.6 ans pour la trace 10. De l'émergence du TCE à partir des diamictons vers aquifère deltaïque régional provenant de la migration présumée provenir de l'ancien dépotoir, le temps de migration est d'environ 5 ans jusqu'à limite Shannon-Garnison. Ces temps sont reportés dans le tableau 3.3 où est documenté le calcul de la durée d'exposition au TCE des puits résidentiels de Shannon. À part l'ancien dépotoir de la SIVI, d'autres zones sources potentielles localisées à des endroits plausibles pour expliquer le TCE qui émerge à partir des diamictons ont été considérées. Ce sont les anciennes lagunes X et A localisées sur la propriété de la SIVI. Le tableau 3.3 résume les principales informations considérées pour faire l'estimation de la durée probable d'exposition au TCE des puits résidentiels à Shannon jusqu'à 2001.

Tableau 3.3. Temps de migration du TCE et durée d'exposition probable au TCE des puits résidentiels à Shannon jusqu'à 2001

Voie de migration <sup>a</sup>	Zone Source <sup>b</sup>	Propriété	Période d'utilisation du TCE <sup>c</sup>	Temps de migration (années)			Durée d'exposition jusqu'à 2001 <sup>d</sup> (années)			Année d'arrivée (moyenne)
				Avant le deltaïque	Dans le deltaïque	Incertitude	Minimum	Moyenne <sup>e</sup>	Maximum	
2	B98	RDDC Nord	1958-1965	19	32	±10	-18	-8	2	2009
2	B67	RDDC Nord	1971-1990	0	32	±10	-12	-2	8	2003
2	Lagon bleu	RDDC Nord	1960-1988	0	32	±10	-1	9	19	1992
2	Secteur 214	SIVI	1946-1991	0	32	±10	13	23	33	1978
3	Dépotoir SIVI	SIVI	1972-1994	30	5	±5	-11	-6	-1	2007
3	Lagune X	SIVI	1960-2002	30	5	±5	1	6	11	1995
3	Lagune A	SIVI	1963-1984	30	5	±5	-2	3	8	1998
4	Lagune C	SIVI	1963-1970	0	18.6	±5	14.4	19.4	24.4	1982

a : Pour la voie de migration 2, le TCE émis par les zones sources a pu être intercepté en partie par les puits d'approvisionnement en eau potable de la Garnison (P5) et de l'ancien complexe industriel sur les terrains de la SIVI.

b : Pour la voie de migration 3, la zone source potentielle présumée par Murphy et al. (2010) est le dépotoir à l'est des terrains de la SIVI. Les anciennes lagunes X et A sont deux autres zones sources potentielles localisées sur cette voie de migration du TCE.

c : Les périodes d'utilisation du TCE ne correspondent pas nécessairement aux périodes d'émissions du TCE aux zones sources.

d : Les valeurs négatives impliquent qu'en 2001 le TCE ne serait pas encore arrivé à Shannon.

e : La durée d'exposition a été estimée par rapport à la limite entre Shannon et la Garnison Valcartier. Cette durée pourrait être moindre de 5 ans pour les puits résidentiels localisés à la limite ouest de Shannon (en bordure de la rivière Jacques-Cartier).

Le TCE présent dans le panache principal à Shannon provient de trois voies de migration distinctes (Murphy et al., 2010). Une autre voie de migration reliée au panache secondaire n'est pas considérée ici parce que son origine n'est pas connue et que les concentrations en TCE qu'on y retrouve sont inférieures à 5 µg/L. On retrouve à l'origine de ces voies de migration plusieurs zones sources. Pour évaluer la durée potentielle d'exposition au TCE des puits résidentiels à Shannon, la procédure suivante a été utilisée et elle comporte des hypothèses simplificatrices dont les implications seront brièvement expliquées :

- Pour chaque zone source, le tableau 3.3 présente la « période d'utilisation du TCE » qui est en fait la période durant laquelle il y a eu des activités à la zone source (communication personnelle de S. Jean citée dans Ouellon et al., 2010). L'hypothèse conservatrice qui est faite est de présumer que la période d'émission du TCE à partir de la zone source s'est étendue sur toute la durée de la période d'utilisation. Il est en fait probable que seulement certaines activités spécifiques aient mené à des émissions de TCE sur des périodes de temps plus restreintes que la période d'utilisation citée au tableau 3.3. De plus, les périodes d'utilisation citées au tableau 3.3 sont basées sur l'assemblage d'information provenant de sources diverses et il est possible que ces périodes aient à être éventuellement révisées sur la base d'information plus précises sur les périodes d'utilisation ou sur les périodes probables d'émission du TCE. Une autre hypothèse conservatrice a été faite de considérer l'année du début de la période d'utilisation du TCE comme étant l'année du début des émissions de TCE. Cette année de début des émissions présumées est donc considéré être le temps « zéro » de la migration du TCE de la zone source vers Shannon. Les hypothèses conservatrices à la base des calculs de la période d'exposition impliquent que la période d'exposition ainsi calculée représente probablement une valeur maximale.
- Le tableau 3.3 présente aussi des informations concernant le temps de migration du TCE entre chacune des zones source et Shannon. Ces temps de migration sont basés sur la modélisation numérique décrite précédemment et illustrée à la Planche 3.5. Cette modélisation n'a fait qu'évaluer le temps de migration du TCE dans l'aquifère deltaïque régional. Le tableau 3.3 montre que pour certaines zones sources un temps de migration est indiqué avant la migration dans l'aquifère deltaïque. Dans le cas de la zone source B98 à RDDC Nord, ce temps de migration représente le temps requis pour que le TCE migre verticalement vers le bas à travers l'aquitard prodeltaïque qui se trouve en dessous de cette zone source. Ce temps de 19 ans a été estimé sur la base de la datation de l'eau souterraine au-dessus et en-dessous de l'aquitard (Murphy et al., 2010) en considérant le facteur de retard du transport du TCE par rapport à l'écoulement de l'eau souterraine dans l'aquitard (1.7 d'après Lefebvre et al., 2003). Dans le cas des zones sources potentielles à l'origine de la voie de migration 3 (Anciens dépotoir et lagunes X et A), le TCE émerge dans l'aquifère deltaïque à partir des diamictons. Il faut donc considérer le temps de migration initial dans les diamictons qui a été basé sur la mesure de l'âge de l'eau souterraine d'environ 30 ans à un puits d'observation près de l'émergence du TCE (Murphy et al., 2010). Enfin, l'incertitude sur le temps de migration est basée sur la discussion faite au chapitre 4 par rapport aux résultats présentés à la Planche 4.3. L'incertitude est plus importante si la zone source est localisée à une plus grande distance de Shannon et que la migration prend plus de temps. L'incertitude indiquée au tableau 3.3 est associée à des temps de migration de l'ordre de 30 ans et 20 ans, respectivement, pour les voies de migration 2 et 3.

- La durée d'exposition est finalement calculée à partir des informations précédentes. D'abord, dans une étape intermédiaire, des temps total de migration minimum, moyen et maximum sont calculés comme suit (un exemple est donné pour la zone source B98) :
  - Temps de migration minimum = Temps avant le deltaïque + Temps dans le deltaïque – Incertitude
    - B98 : Temps de migration minimum =  $19 + 32 - 10 = 41$  ans
  - Temps de migration moyen = Temps avant le deltaïque + Temps dans le deltaïque
    - B98 : Temps de migration moyen =  $19 + 32 = 51$  ans
  - Temps de migration maximum = Temps avant le deltaïque + Temps dans le deltaïque + Incertitude
    - B98 : Temps de migration maximum =  $19 + 32 + 10 = 61$  ans
- Ensuite, dans une autre étape intermédiaire, le temps écoulé depuis de début présumé des émissions est calculé comme suit :
  - Temps depuis de début des émissions = 2001 – Année de début des émissions
    - B98 : Temps depuis de début des émissions =  $2001 - 1958 = 43$  ans
- Enfin la durée d'exposition est calculée en soustrayant le temps de migration (minimum, moyen et maximum) du temps depuis le début des émissions. Par exemple, la durée moyenne d'exposition est calculée comme suit :
  - Durée d'exposition moyenne = Temps depuis de début des émissions - Temps de migration moyen
    - B98 : Durée d'exposition moyenne =  $43 - 51 = -8$
- Une valeur négative comme celle de l'exemple ci-dessus pour B98 implique que le calcul indique que le TCE provenant de cette zone source ne serait pas encore arrivé à Shannon en 2001. Dans le cas de B98, l'année d'arrivée moyenne est estimée à 2009.

Le tableau 3.3 montre que la durée moyenne d'exposition probable au TCE jusqu'à 2001 pour les puits situés dans le panache principal et captant à partir de l'aquifère deltaïque aurait été en entre 3 et 23 ans pour le TCE déjà arrivé en provenance de zones sources en 2001. L'incertitude importante sur l'estimation de la durée d'exposition fait en sorte que les valeurs minimales indiquent que le TCE n'aurait pas atteint Shannon en 2001, sauf pour le TCE provenant du Seceur 214 et la Lagune C. Considérant les nombreuses hypothèses conservatrices utilisées dans l'estimation de la durée d'exposition, les durées maximales calculées sont probablement exagérées par rapport à la réalité.

### **3.3 Concentrations en TCE à Shannon dans le temps et l'espace**

Le suivi des concentrations en TCE dans les puits d'observation installés à Shannon par le MDN en 2004 ainsi que celui du MDDEP dans les puits résidentiels de Shannon entre 2001 et 2009 montrent que les concentrations en TCE sont variables dans le temps. Le plus long historique de suivi du TCE dans les puits d'observation de la Garnison Valcartier donne un meilleur aperçu de cette évolution puisque ce suivi a débuté en 2001 par rapport à 2004 à Shannon. La Planche 23 dans Lefebvre et al. (2010) donne des exemples de puits situés à la Garnison en amont (à l'est) de Shannon et montre que les concentrations en TCE ont été variables dans le temps à cet endroit. Les concentrations mesurées dans les puits à Shannon et sur le territoire de la Garnison ont décliné de 2001 à 2009.

Quant au niveau des concentrations, d'abord pour les puits résidentiels à Shannon, le tableau 3.1 présenté précédemment montre que même dans le panache principal de TCE, plus de 50% des puits résidentiels à Shannon montrent concentrations inférieures à 5 µg/L, tandis qu'environ 30% sont supérieures à 50 µg/L. Les concentrations moyenne et médiane de TCE dans le panache principal étaient respectivement de 78.4 et 3.4 µg/L. Le tableau 3.4 qui sera discuté dans la section suivante, compile les statistiques sur les concentrations en TCE observées dans les puits d'observation situés à Shannon en 2004. Ces puits d'observation ont permis de faire l'échantillonnage systématique de l'eau souterraine dans et autour du panache principal de TCE. Le tableau 3.4 montre des proportions de concentrations en TCE excédant 5 µg/L d'environ 30% alors que 14% excèdent 50 µg/L. Les concentrations moyenne et médiane de TCE ont été respectivement de 86.3 et 16.5 µg/L.

Même si le panache principal de TCE à Shannon n'a pu être délimité qu'à partir des données disponibles en 2004, il est possible de conclure que l'étendue de ce panache a dû être stable dans le temps après l'arrivée du TCE à Shannon provenant des différentes zones sources. Cette conclusion est basée sur le fait que l'écoulement de l'eau souterraine et la migration du TCE à Shannon sont contraints de rester à l'endroit où le panache a été délimité sur la Planche 2.3. En effet, la plus forte épaisseur de l'unité deltaïque sous le panache et la convergence de l'écoulement provenant du Mont Rolland-Auger, ainsi que de la partie nord de Shannon contribuent à garder le panache à l'endroit où il est présentement délimité. De plus, le contact entre l'unité deltaïque et la rivière ne se fait pas sur toute l'étendue de la rivière mais juste à l'endroit où le panache émerge dans la rivière (voir le modèle géologique de la Planche 2.2 qui montre l'unité intersectée par la rivière). Enfin, à la limite ouest de la Garnison Valcartier ainsi qu'à Shannon, le panache de TCE est resté à une position stable entre 2001 et la fin 2009 sur la base des données disponibles sur les suivis du TCE dans le secteur (Ouillon et al., 2010).

### **3.4 Concentrations en produits de dégradation du TCE à Shannon**

Le tableau 3.4 tirée de Lefebvre et al. (2010) donne des statistiques sur les concentrations en TCE et ses produits de dégradation, le dichloroéthène (DCE) et le chlorure de vinyle (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). Ouillon et al. (2010) montrent la distribution de ces produits de dégradation dans l'ensemble du secteur Valcartier à d'autres périodes. Les concentrations 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 qui sont montrées au tableau 3.4.

Les concentrations de référence indiquées sous chacun des trois composés chimiques correspondent au règlement sur la qualité de l'eau potable du MDDEP (2008). 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. La concentration en TCE a dépassé la valeur de référence pour 14.4% des échantillons et la valeur de 5 µg/L pour 30.6% des cas. Les dépassements des valeurs de référence représentent 4.7% et 3.0% 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 (Lefebvre

et al., 2003). 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 zone d'investigation, puisque la grande majorité des échantillons a été prélevée dans cet aquifère. Le tableau 3.4 montre qu'environ 3 à 5% des analyses ont détecté des concentrations de produits de dégradation du TCE qui dépassent les normes de potabilité, ce qui est beaucoup moins fréquent que les dépassements de normes observés pour le TCE.

Tableau 3.4. Concentrations en TCE, DCE et CV dans l'eau souterraine à Shannon en 2004  
(Tableau tiré de Lefebvre et al., 2010)

(Données tirées de Sanexen-Amec, 2005 – Excluant les blancs et les duplicatas)

(Les statistiques s'appliquent uniquement aux échantillons avec des détections, i.e. minimum, moyenne, maximum et médiane)

Paramètres	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%)
Minimum (µg/L)	0.2	0.2	1.5
Maximum (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%		

## 4. Évaluation de l'expertise hydrogéologique du Pr. Chapuis

### 4.1 Développement des connaissances hydrogéologique à Shannon

L'expertise hydrogéologique présentée dans le présent rapport est basée sur les autres études scientifiques soumises en soutien de cette expertise, soient les rapports 1) sur la caractérisation géochimique et la datation de l'eau souterraine (Murphy et al., 2010), 2) sur la caractérisation hydrogéologique réalisée à Shannon (Lefebvre et al., 2010) et 3) sur la synthèse hydrogéologique du secteur Valcartier (Ouillon et al., 2010). Tel que brièvement décrit à la section 1.2, beaucoup de nouvelles données ont été acquises et un important travail d'analyse de ces données a été réalisé depuis le rapport de l'INRS (Lefebvre et al., 2003) sur la caractérisation hydrogéologique réalisée en 2001-2002 sur le territoire du MDN (Garnison et de RDDC Valcartier). Certaines conclusions de Lefebvre et al. (2003) sont donc dépassées relativement aux connaissances actuelles sur l'hydrogéologie et la contamination en TCE de l'eau souterraine dans le secteur Valcartier et à Shannon. Puisque le rapport d'expertise du Pr. Chapuis se concentre sur la critique du rapport de Lefebvre et al. (2003), ceci rend difficile l'évaluation du rapport d'expertise du Pr. Chapuis.

Les travaux réalisés par l'INRS depuis le rapport de Lefebvre et al. (2003) ont permis des avancées importantes sur la connaissance et la compréhension de l'écoulement dans le système aquifère ainsi que sur la migration de la contamination en TCE de l'eau souterraine dans le secteur Valcartier et à Shannon. Ces avancées répondent en partie aux critiques formulées sur le rapport de Lefebvre et al. (2003) dans l'expertise du Pr. Chapuis. Ces avancées portent sur l'ensemble des conditions du système aquifère :

- Beaucoup de travaux ont permis de préciser le contexte hydrogéologique et les relations spatiales entre les aquifères (Planche 2.1). D'abord, la cartographie des dépôts meubles a été mise à jour et intégrée dans le rapport de la caractérisation du secteur Val-Bélair (Ouillon et al., 2008a). De plus, sur la base de nouveaux forages et de sondages au pénétromètre, des coupes géologiques détaillées et des cartes plus précises de la distribution des épaisseurs des unités géologiques ont été développées (Ouillon et al., 2010; Lefebvre et al., 2010). Ces cartes ont permis de développer des modèles géologiques en trois dimensions (3D) couvrant tout le territoire de Shannon à Val-Bélair (Ouillon et al., 2010) ainsi que Shannon de façon plus détaillée (Planche 2.2; Lefebvre et al., 2010). Une bonne définition et compréhension du contexte géologique sont nécessaires à la définition des conditions d'écoulement de l'eau souterraine.
- Les propriétés hydrauliques influencent l'écoulement de l'eau souterraine et ces propriétés doivent être intégrées dans les modèles numériques d'écoulement. Nous avons développé une approche novatrice qui a permis de définir la conductivité hydraulique non seulement sur la base des essais de perméabilité mais aussi en utilisant les descriptions de forages. Ces travaux ont permis de définir la distribution de la conductivité hydraulique dans l'ensemble de l'aquifère deltaïque et d'intégrer cette distribution dans le modèle numérique. Ceci permet de mieux définir le cheminement de l'eau souterraine dans le système aquifère. Ces travaux novateurs ont été publiés dans une revue scientifique de grande qualité (Ouillon et al., 2008b).
- La recharge de la nappe par l'infiltration des précipitations est un processus important qui influence la vitesse de l'écoulement de l'eau souterraine dans les nappes libres. La

recharge de l'aquifère deltaïque relié à la rivière Jacques-Cartier dans la région adjacente de Portneuf a été évaluée en intégrant les niveaux d'eau mesurés dans les puits du réseau de suivi du MDDEP avec un bilan hydrologique quotidien réalisé en adaptant l'approche de Baalousha (2005) aux conditions climatiques locales (Maltais, 2007; Lefebvre et al., 2009). Tel qu'expliqué par Ouellon et al. (2010), la région de Portneuf est adjacente au secteur Valcartier et on y retrouve une extension de l'aquifère deltaïque associé à la rivière Jacques-Cartier ainsi que les mêmes conditions climatiques. Les résultats obtenus dans Portneuf ont été comparés aux niveaux d'eau mesurés dans des puits d'observation de Valcartier, ce qui a permis de déterminer que le niveau de recharge était similaire (Ouellon et al., 2010). Ce taux de recharge est aussi cohérent avec la datation de l'eau souterraine (Murphy et al., 2010). La recharge ainsi déterminée et validée de 300 mm/an a été utilisée dans le modèle numérique du secteur Valcartier (Ouellon et al., 2010).

- Les diamictons sont à la base de la séquence de dépôts meubles dans le secteur de Valcartier et ils sont séparés de l'aquifère deltaïque régional par l'aquitard glaciomarin (Planche 2.1). Suite à la caractérisation du secteur de Val-Bélair, les conditions d'écoulement dans les diamictons a été précisée, notamment l'importance de la recharge de cet aquifère sur les flancs des montagnes bordant les vallées de Valcartier et de Val-Bélair (Ouellon et al., 2008a). La caractérisation géochimique et la datation de l'eau souterraine du secteur de Valcartier a montré que l'eau souterraine ainsi que le TCE dans les diamictons pouvaient émerger dans l'aquifère deltaïque où l'aquitard glaciomarin est absent (Murphy et al., 2010).
- L'étendue de TCE et ses concentrations ont été précisées dans toutes les unités hydrogéologiques. L'intégration des données de suivi du TCE de 2001 à 2009 a aussi permis de définir l'évolution dans le temps des concentrations qui sont en baisse générale. Enfin, une avancée importante a été réalisée grâce à la caractérisation géochimique et la datation de l'eau souterraine (Murphy et al. 2010). Ces travaux ont permis de faire un lien entre le TCE présent dans différentes parties du panache et les zones sources à l'origine de ce TCE. Ces travaux ont montré qu'à Shannon on retrouve du TCE provenant des zones sources déjà connues (RDDC Nord et Secteur 214 ainsi que Lagune C sur les terrains de la SIVI), mais aussi de reconnaître la contribution d'une autre zone source de TCE qui est présumée être l'ancien dépotoir à l'ouest de la SIVI. Cette conclusion est différente de celle tirée par Lefebvre et al. (2003) qui avaient conclu que le TCE provenant de RDDC Nord et possiblement le Secteur 214 n'avaient pas atteint Shannon. Ces travaux ont permis ainsi de préciser les voies de migration du TCE, telles que montrées à la Planche 2.5.
- L'analyse des données de suivi du TCE a aussi permis de définir des cartes de la distribution des produits de dégradation du TCE (le 1,2-dichloroéthène, DCE, ainsi que le chlorure de vinyle, CV). Cette analyse montre que la présence du CV est restreinte à la zone source du Secteur 214 et que les proportions de TCE et DCE sont typiques pour le TCE issus des différentes zones sources. Ces observations impliquent que l'exposition des puits résidentiels au CV dans l'eau souterraine à Shannon est limitée (section 3.4 et tableau 3.4). L'autre implication est que les proportions de TCE et DCE dans l'eau souterraine permettent de distinguer la provenance du TCE à partir des différentes zones sources (Lefebvre et al., 2010). Ces indications sont cohérentes avec celles obtenues de la caractérisation géochimique (Murphy et al., 2010).

- Enfin, un nouveau modèle numérique a permis d'intégrer toutes les informations disponibles et d'arriver à une compréhension quantitative du système aquifère. Le modèle décrit par Ouellon et al. (2010) représente la 4<sup>e</sup> génération de modèles numériques développées par l'INRS sur ce système (Martel et al., 2000; Lefebvre et al., 2003; Ouellon, 2006; Ouellon et al., 2010). Chaque génération de modèle est basée sur plus d'information et est plus représentatif du système aquifère. Le dernier modèle numérique a été appliqué à la résolution de différentes questions (Ouellon et al., 2010), notamment l'estimation du temps de migration du TCE à partir des zones sources jusqu'à Shannon.

Les sections suivantes ne vont pas reprendre point par point l'argumentation de l'expertise du Pr. Chapuis (2009), mais vont plutôt traiter des questions importantes par rapport à la problématique du TCE dans l'eau souterraine à Shannon par catégories de sujets. La section 4.2 va traiter de l'analyse réalisée par le Pr. Chapuis (2009) sur les essais de perméabilité et surtout des implications des différences entre ces résultats et ceux obtenus précédemment. La section 4.3 va discuter de la définition des conditions géologiques, mais sans reprendre en détail les commentaires du Pr. Chapuis (2009) qui portent sur des travaux antérieurs (Lefebvre et al., 2003). Aussi, la section 4.3 va traiter de la modélisation numérique de l'écoulement réalisée par le Pr. Chapuis (2009) ainsi que de son estimation du temps de migration du TCE et de la durée de l'exposition au TCE des puits résidentiels de Shannon.

## **4.2 Conductivités hydrauliques obtenues des essais de perméabilité**

### *4.2.1 Compilation des données brutes*

Lors de la caractérisation réalisée par le MDN sur ses propriétés (Garnison et RDDC Valcartier) en 2001-2001, du personnel de l'INRS a réalisé la plupart des essais de perméabilité. Les données brutes des essais de perméabilité qui étaient très volumineuses n'ont pas été annexées au rapport de Lefebvre et al. (2003). Ces données ont été conservées dans des fichiers électroniques. Pour accéder aux données brutes provenant des travaux antérieurs à 2001, il faut consulter les rapports originaux sur ces travaux de caractérisation. Dans le cas des autres informations concernant les travaux de caractérisation comme les descriptions de forages et d'installations de puits, les analyses granulométriques et les analyses chimiques, les données brutes sont toutes compilées dans les rapports des firmes d'experts en hydrogéologie supervisant les travaux de caractérisation. Le rapport de Lefebvre et al. (2003) n'a fait que reprendre ces données pour les analyser et seulement la compilation des résultats est documentée dans le rapport de l'INRS.

Pour les autres caractérisations réalisées pour le MDN après 2002, les firmes d'experts en hydrogéologie supervisant les travaux ont réalisés les essais de perméabilité dont les données ont été documentées dans les rapports de caractérisation. Il en va de même pour les autres informations reliées aux travaux de caractérisation. Les rapports de l'INRS qui intègrent les résultats de ces caractérisations ne font que compiler les résultats (Ouellon et al., 2010).

À la demande du Pr. Chapuis, les données brutes des essais de perméabilité réalisés par l'INRS utilisées pour le rapport de Lefebvre et al. (2003) ainsi que les données brutes des essais réalisés par Sanexen-Amec (2005) à Shannon en 2004-2005 lui ont été transmises.

#### 4.2.2 Méthodes d'interprétation

Les essais de perméabilité consistent en l'application d'un changement brusque du niveau d'eau, à la hausse ou à la baisse, dans un puits d'observation et la mesure du niveau d'eau dans le temps après ce changement. Ces changements de niveau d'eau peuvent être induits de différentes façons, mais l'approche privilégiée dans le secteur Valcartier a été d'utiliser un changement de pression d'air dans le tubage (Levy et Pannell, 1991). Plusieurs méthodes d'interprétation des données des essais de perméabilité ont été développées pour en tirer un estimé de la conductivité hydraulique (représentée par le symbole  $K$ ). Le comportement de la remontée du niveau d'eau détermine le choix de la méthode d'interprétation des essais de perméabilité, parmi différentes méthodes qui présentent des avantages et inconvénients. Les types de réponses des essais de perméabilité sont la réponse oscillatoire (*underdamped*), la réponse log-linéaire (*overdamped*) et la réponse semi-oscillatoire (*critically damped*). Les méthodes utilisées par l'INRS dans le rapport de Lefebvre et al. (2003) ainsi que par Sanexen-Amec (2005) pour interpréter les essais de perméabilité sont tirées de publications scientifiques, sont reconnues et sont largement utilisées et recommandées dans les manuels de référence les plus utilisés par les spécialistes en hydrogéologie (Kruseman et de Ridder, 1994; Butler, 1997). Les méthodes suivantes ont ainsi été utilisées :

- Méthode de Bouwer et Rice (1976) pour les réponses log-linéaires;
- Méthode d'Uffink (1984) pour les réponses oscillatoires;
- Méthode de Butler et Garnett (2000) pour les réponses semi-oscillatoires.

L'interprétation des essais de perméabilité évolue, comme tous les domaines techniques et scientifiques, et d'autres méthodes et normes d'interprétation sont apparus au cours des 10 dernières années. Cependant, par souci d'uniformiser l'approche utilisée pour interpréter les essais de perméabilité avec celles utilisées dans le secteur Valcartier (Lefebvre et al., 2003), les mêmes méthodes ont été appliquées pour les caractérisations réalisées dans l'ensemble de la région, notamment à Shannon (Sanexen-Amec, 2005) et Val-Bélair (Ouillon et al., 2008a).

Les méthodes d'interprétation utilisées par le Pr. Chapuis (2009) pour refaire l'interprétation des essais de perméabilité sont reconnues et rigoureuses et elles se conforment aux normes d'interprétation les plus récentes. Les résultats obtenus par le Pr. Chapuis (2009) pour la conductivité hydraulique représentative des puits d'observations où ont été réalisés les essais de perméabilité sont donc acceptés comme valides et ils ne sont pas remis en question. Cependant, les sections suivantes vont présenter une comparaison entre les résultats obtenus par le Pr. Chapuis (2009) et les résultats originaux et une discussion sera faite de l'implication des différences entre ces résultats. À ce niveau, nous ne partageons pas l'avis du Pr. Chapuis (2009) quant à l'ampleur du changement de conductivité hydraulique et encore moins concernant les implications de ces changements.

#### 4.2.3 Comparaison des valeurs de conductivité hydraulique

La Planche 4.1 montre les valeurs de conductivité hydraulique ( $K$ ) obtenues par l'interprétation des essais de perméabilité réalisée par le Pr. Chapuis (2009) comparées au résultat original documenté dans les rapports de Lefebvre et al. (2003) et de Sanexen-Amec (2005). Les essais réalisés après 2005 n'ont pas été considérés, mais les essais réalisés après 2005 ont surtout été

faits à Val-Bélaire (Ouillon et al., 2008a) et ils n'ont donc pas d'incidence sur l'écoulement et le transport de TCE vers l'ouest et Shannon. Les valeurs de  $K$  varient naturellement sur plusieurs ordres de grandeur et elles sont montrées généralement sur une échelle logarithmique, tout comme la figure 18 du rapport du Pr. Chapuis (2009).

Les figures du haut de la Planche 4.1 reproduisent ces résultats à partir des données transmises gracieusement par le Pr. Chapuis. À la Planche 4.1, les valeurs de  $K$  ont été exprimées sous forme du logarithme de  $K$  ( $\text{Log}K$ ). Ce sont les valeurs du  $\text{Log}K$  qui doivent être comparées entre l'interprétation originale des essais de perméabilité et celle réalisée par le Pr. Chapuis (2009). Sur la figure en haut à gauche de la Planche 4.1, une droite de régression représente la relation entre les valeurs de  $\text{Log}K$  obtenues par les deux interprétations. Cette régression représente adéquatement la relation statistique entre les deux interprétations, alors que le rapport moyen entre les valeurs absolues de  $K$  montré à la figure 18 du Pr. Chapuis (2009) exagère la différence entre les deux interprétations sur presque toute l'étendue des mesures, sauf pour les plus fortes valeurs. Ceci est relié à l'effet disproportionné des valeurs de  $K$  élevées dans l'évaluation du rapport entre les valeurs absolues de  $K$ .

Les valeurs interprétées par le Pr. Chapuis (2009) sont systématiquement plus élevées que les valeurs originales, mais cette différence, sans être négligeable, ne représente qu'une différence de 7.7% entre les valeurs moyennes de  $\text{Log}K$  originale (-3.92) et celle obtenue par le Pr. Chapuis (2009) (-3.62). De plus, cet écart de 7.7% entre les valeurs moyennes de  $\text{Log}K$  est bien en-deçà de la précision normalement attendue dans l'estimation de la conductivité hydraulique à l'échelle d'un système aquifère, dont l'imprécision sur la valeur moyenne peut être d'un ordre de grandeur ( $\text{Log}K$  de 1). Enfin, cet écart est relativement faible par rapport à la variance des valeurs de  $\text{Log}K$  qui ont un écart-type de 17% ou 21%, selon qu'on considère les résultats originaux ou ceux obtenus par le Pr. Chapuis (2009). Il est donc beaucoup plus important de dédier des efforts à la reconnaissance des conditions qui contrôlent la variance des valeurs de  $\text{Log}K$  pour être en mesure d'établir la distribution des classes de valeurs de  $\text{Log}K$  dans le système aquifère de Valcartier, particulièrement dans la nappe deltaïque régionale qui constitue la principale voie de migration du TCE.

La figure en haut à droite sur la Planche 4.1 montre les valeurs de  $\text{Log}K$  obtenues pour différents types de matériaux retrouvés dans le système aquifère de Valcartier. Ces types de matériaux sont nommés « hydrofaciès » (HF), et ils ont des valeurs de  $\text{Log}K$  distinctes (Ouillon et al., 2008b). Les hydrofaciès ont des dimensions de particules différentes qui contrôlent les valeurs de  $\text{Log}K$ . Dans les sédiments deltaïques, le matériel le plus fin est l'hydrofaciès HF1 tandis que le matériel le plus grossier est représenté par l'hydrofaciès HF4. L'hydrofaciès HF5 représente l'unité distincte des diamictons qui forme un aquifère généralement séparé de l'aquifère deltaïque par un aquitard silteux glaciomarin.

Les figures du bas de la Planche 4.1 montre les valeurs de  $\text{Log}K$  originales et celles obtenues par le Pr. Chapuis (2009) pour chacun des hydrofaciès. Les valeurs sont relativement semblables pour les hydrofaciès fins (HF1 et HF2) mais les valeurs pour les hydrofaciès plus grossiers montrent plus de différences entre les deux séries de valeurs. Cependant, à nouveau, la différence entre les valeurs moyennes ou médianes est relativement faible par rapport à la variance des valeurs à l'intérieur d'un même hydrofaciès.

L'interprétation rigoureuse des essais de perméabilité réalisée par le Pr. Chapuis (2009) tend donc à confirmer la validité générale des résultats originaux plutôt qu'à les remettre en cause. Pour arriver à représenter adéquatement la conductivité hydraulique du système aquifère, les efforts doivent plutôt porter sur l'assignation de valeurs représentatives de  $\text{Log}K$  dans l'ensemble du système aquifère afin d'arriver à faire une modélisation numérique représentative de l'écoulement de l'eau souterraine dans le système aquifère. Nous avons montré que l'aquifère deltaïque est constitué de matériaux diversifiés aux conductivités hydrauliques distinctes. Des efforts ont été dédiés afin de définir la distribution de ces matériaux dans l'aquifère deltaïque afin de guider l'assignation des valeurs de  $\text{Log}K$  représentatives. Nos travaux ont ainsi mené à des développements scientifiques originaux pour arriver à représenter  $K$  dans l'ensemble de l'aquifère sur la base de la distribution des matériaux (hydrofaciès) (Ouillon et al., 2008b). Ces valeurs de  $\text{Log}K$  ont été intégrées dans le modèle numérique d'écoulement du système aquifère du secteur Valcartier (Ouillon et al., 2010).

#### 4.2.4 Implications des différences de $\text{Log}K$

Afin de montrer les implications des différences de  $\text{Log}K$  estimées par le Pr. Chapuis (2009) par rapport aux valeurs originales, cette section utilise une approche très simplifiée pour représenter le système aquifère. Cet exercice conceptuel permet toutefois d'identifier les paramètres hydrogéologiques clés dans le cadre de la présente problématique de contamination de l'eau souterraine par du TCE. Dans les circonstances, la durée de l'exposition des puits résidentiels au TCE est une considération importante. Cette durée dépend à la fois de la date à laquelle les émissions de TCE ont débuté ainsi que du temps requis pour que le TCE migre des zones sources jusqu'à Shannon. Le temps requis pour la migration dépend quant à lui des conditions d'écoulement dans le système aquifère et des propriétés hydrogéologiques du système aquifère. L'approche simplifiée utilisée dans la présente section permet d'évaluer la sensibilité du temps de migration par rapport à trois propriétés du système aquifère : la porosité, la recharge et la conductivité hydraulique.

Le comportement de la nappe régionale deltaïque, qui est en condition libre dans une grande partie du secteur Valcartier, peut être représenté de façon simplifiée par une solution analytique. Une solution analytique est une formule mathématique qui représente un phénomène physique, dans ce cas-ci c'est l'écoulement de l'eau souterraine. Le Pr. Chapuis est coauteur d'un article scientifique (Chesnaux et al., 2005) portant sur le développement d'une approche très intéressante permettant d'estimer les conditions d'écoulement dans une nappe libre à l'aide d'une solution analytique. Cette approche permet de dériver, notamment, la charge hydraulique, le temps de résidence et la vitesse de l'eau souterraine dans la nappe libre. Cette solution analytique a comme aspect novateur de permettre de considérer l'effet de la conductivité hydraulique sur le temps de résidence de l'eau souterraine dans une nappe libre, alors que les solutions simplifiées disponibles jusque là ne considéraient pas la conductivité hydraulique.

À l'aide de la solution analytique de Chesnaux et al. (2005) nous avons d'abord utilisé la plage de variation possible des paramètres pour évaluer leur effet sur les résultats, donc pour voir si les résultats sont « sensibles » ou non relativement aux paramètres de la solution analytique. Le tableau 4.1 résume les paramètres utilisés et la Planche 4.2 montre les résultats des calculs.

Tableau 4.1. Étude de sensibilité des paramètres pour l'écoulement en nappe libre  
 (Solution analytique de Chesnaux et al., 2005 – Résultats montrés graphiquement à la Planche 4.2)  
 (Paramètres représentatifs de l'écoulement vers l'ouest dans le Secteur Valcartier)

Paramètre	Symbole	Valeur	Unités	Sensibilité aux paramètres					
				Sensibilité à la porosité		Sensibilité à la recharge		Sensibilité à K	
Élévation moyenne de la base de l'aquifère		140	m						
Élévation de la surface libre à l'origine (ligne de partage)		168	m						
Élévation de la surface libre à la fin de l'écoulement		159.5	m						
Coordonnée UTM de l'origine de l'écoulement		311469	m						
Coordonnée UTM de la fin de l'écoulement		308469	m						
Porosité de drainage (Specific Yield)	nd	0.25							
Porosité effective (supposée égale à n total)	ne	0.35	-	0.25	0.45	0.35	0.35	0.35	0.35
Conductivité hydraulique K*	K	2.10E-04	m/s	2.10E-04	2.10E-04	2.10E-04	2.10E-04	1.00E-04	1.26E-03
Log de la conductivité hydraulique	logK			-3.68	-3.68	-3.68	-3.68	-4.00	-2.90
Différence de LogK par rapport au cas de base			%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	-8.8%	-21.1%
Recharge	W	300	mm/y			200	400		
Recharge	W	9.51E-09	m/s	9.51E-09	9.51E-09	6.34E-09	1.27E-08	9.51E-09	9.51E-09
Longueur totale du système	L'	3000	m	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Charge maximale à la limite à flux nul (ligne de partage)	hmax	28	m						
Charge à la limite d'émergence (fin du système)	hL'	19.5	m	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5
Épaisseur saturée moyenne	hmean	23.75	m						
Alpha (paramètre calculé)	a	1.74E+07	-	1.74E+07	1.74E+07	2.16E+07	1.53E+07	1.30E+07	5.94E+07

\*: la valeur de K est intermédiaire entre celles des hydrofaciès Valcartier 3 (logK=-4.0) et 4 (logK=-2.9) qui dominent le long de la voie d'écoulement

La valeur de K intermédiaire permet de reproduire les charges observées avec la valeur de recharge moyenne estimée (300 mm/an)

Les valeurs limites pour l'étude de sensibilité sont celles des hydrofaciès 3 (K minimal) et 4 (K maximal)

Un « cas de base » a d'abord été défini en utilisant des valeurs de porosité et de recharge correspondant à celles utilisées dans le modèle numérique représentant l'écoulement dans le système aquifère de Valcartier (Ouillon et al., 2010). La valeur de conductivité hydraulique du cas de base dans le tableau 4.1 a été définie pour reproduire assez fidèlement les charges hydrauliques observées à Valcartier dans la nappe deltaïque régionale en conditions libres, de la ligne de partage des eaux souterraines jusqu'à la rivières Jacques-Cartier (figure du haut de la Planche 4.2). La valeur de  $K$  de  $2.1 \times 10^{-4}$  m/s correspond aux valeurs observées dans l'hydrofaciès HF3 qui est un matériel intermédiaire entre les matériaux les plus perméables (HF4) et les moins perméables (HF2 et HF1 surtout retrouvés dans l'aquitard prodeltaïque).

Succinctement, les résultats de la Planche 4.2 montrent que pour les conditions représentatives de la nappe libre deltaïque du secteur Valcartier, la porosité et la recharge sont des paramètres qui ont beaucoup plus d'influence sur le temps de résidence (et donc de migration du TCE) et sur la vitesse de l'eau souterraine que la conductivité hydraulique.  $K$  a peu d'influence sur ces conditions du système parce que l'aquifère est tellement épais et perméable que c'est l'apport d'eau par la recharge qui va déterminer la quantité d'eau qui s'écoule alors que la porosité va fortement influencer la vitesse et le temps de résidence. La conductivité hydraulique a cependant un effet important sur la charge hydraulique.

Les résultats montrés à la Planche 4.2 indiquent que pour arriver à déterminer des valeurs de temps de migration réalistes pour les conditions rencontrées dans l'aquifère deltaïque de Valcartier, des efforts importants doivent être dédiés à l'évaluation de la recharge et de la porosité. Ces paramètres ont beaucoup plus d'effet sur le temps de migration que la conductivité hydraulique. Nos travaux ont mis beaucoup d'attention à l'estimation de la recharge et de la porosité (Maltais et al., 2007; Ouillon et al., 2010; Murphy et al., 2010).

La Planche 4.3 complète les résultats précédents et portent sur l'évaluation de la précision qui peut être atteinte dans l'évaluation du temps de résidence de l'eau souterraine ou de migration du TCE entre les zones sources et Shannon. Pour produire les résultats de la Planche 4.3, les paramètres ont été variés dans des plages de valeurs restreintes qui représentent les limites de précision présumées dans l'estimation de la porosité ( $0.35 \pm 0.05$ ) et de la recharge ( $300 \pm 50$  mm/an). Le tableau 3.3 montre que le traçage de particule a montré que le temps de migration du TCE jusqu'à Shannon le long des voies d'écoulement nord et sud étaient respectivement de l'ordre de 30 ans (32) et de 20 ans (18.6). Pour ces ordres de grandeur de temps de résidence, la précision dans l'estimation du temps serait respectivement de l'ordre de  $\pm 10$  ans et de  $\pm 5$  ans, respectivement, pour les voies de migration nord et sud. Cette précision tient compte de l'effet combiné de la précision sur les estimations de la porosité et de la recharge.

L'effet combiné de la précision de ces paramètres change la charge hydraulique dans le même ordre de grandeur que les variations observées dans le calage du modèle numérique (Ouillon et al., 2010). Ceci montre qu'on ne pourrait probablement pas déceler des erreurs de cet ordre à partir de la comparaison des conditions hydrauliques simulées par rapport aux conditions observées. Notons que lors du développement de ce modèle, des estimations indépendantes de la recharge et du champ de conductivité hydraulique dans le modèle ont été faites. Lorsque ces paramètres ont été combinés dans le modèle, celui-ci a été calé sans avoir à modifier la conductivité hydraulique ou la recharge. Seulement des ajustements mineurs aux conditions

limites ont été nécessaires pour compléter le calage du modèle et pour le valider par rapport aux observations sur les directions d'écoulement et l'étendue du panache de TCE.

### **4.3 Définition du contexte hydrogéologique**

L'expertise du Pr. Chapuis (2009) présente plusieurs situations conceptuelles qui ne sont pas représentatives du secteur Valcartier, ce qui montre un manque de connaissance et de compréhension des particularités du système aquifère. Le « schéma général d'une vallée comme celle de Shannon » présenté à la figure 6 de l'expertise du Pr. Chapuis (2009) ne représente pas les conditions observées sur le terrain et documentées par Ouellon et al. (2010) pour l'ensemble du secteur ainsi que par Lefebvre et al. (2010) plus spécifiquement pour Shannon (Planches 2.1 et 2.2). Ce schéma pourrait être représentatif d'un environnement sédimentaire fluvial, mais on retrouve à Valcartier un environnement fluvio-glaciaire à la base et un environnement deltaïque dans la partie supérieure de la séquence. De plus, les cas modélisés dans l'expertise du Pr. Chapuis (2009) ne présentent pas les conditions d'hétérogénéité réaliste, contrairement au modèle numérique développé sur la base des travaux de Ouellon et al. (2008b) qui produisent une distribution représentative des matériaux et des propriétés hydrauliques dans l'aquifère deltaïque. La géométrie du système utilisée dans les cas simulés dans l'expertise du Pr. Chapuis (2009) n'est pas non plus représentative des observations et l'utilisation d'un modèle simplifié à seulement deux dimensions ne peut pas reproduire le comportement d'un système complexe où l'écoulement se fait en trois dimensions.

L'estimation de la recharge (infiltration efficace) documentée dans l'expertise du Pr. Chapuis (2009) est peu réaliste et basée sur une approche simpliste. De plus, les résultats obtenus ne sont pas validés en comparant ces résultats à des observations de terrain. Au contraire, l'évaluation de la recharge qui a été faite par Maltais (2007) dans Portneuf est basée sur la reproduction des mesures de niveaux d'eau sur une période de 10 ans. Ces niveaux d'eau varient de façon très similaire à ceux observés dans le secteur Valcartier pour la période de 2 ans pour laquelle un suivi de niveaux d'eau est disponible.

La non représentativité de la géométrie, de la distribution des matériaux et de la recharge pour les simulations réalisées dans l'expertise du Pr. Chapuis (2009) ne permettent pas d'obtenir des résultats représentatifs concernant les temps de migration du TCE. De plus, la position des zones sources dans le système d'écoulement n'est pas considérée adéquatement. Enfin, la supposition implicite semble être faite que la présence de TCE dans le secteur Valcartier a été faite à une période très reculée (il y a 60 ans) et que dès que du TCE a été présent dans le secteur cela aurait mené à des émissions de TCE dans l'eau souterraine. Cette supposition implicite est en contradiction avec les connaissances disponibles sur les zones sources et les périodes auxquelles les activités potentiellement polluantes se sont déroulées à ces zones sources. Les informations disponibles sur l'existence même des zones sources potentielles montrent que les activités qui ont pu utiliser du TCE se sont déroulées sur diverses périodes (Lefebvre et al., 2003; Ouellon et al., 2010). Il n'est donc pas plausible de présumer que des émissions de TCE se soient produites alors que les zones sources elles-mêmes (bâtiments ou lagunes) n'existaient même pas.

## 5. Conclusions

Le mandat reçu pour cette expertise hydrogéologique comportait deux volets : 1) évaluer l'exposition au TCE dans l'eau souterraine des puits résidentiels dans la municipalité de Shannon et 2) évaluer le rapport d'expertise hydrogéologique du Pr. Chapuis (2009). L'expertise hydrogéologique documentée dans le présent rapport s'appuie sur des travaux scientifiques réalisés précédemment. Les rapports suivants ont servis de fondement à la compréhension de l'hydrogéologie du secteur Valcartier et à la préparation du présent rapport d'expertise qui doit être lu conjointement avec les rapports suivants : 1) Ouellon et al. (2010), « Synthèse du contexte hydrogéologique et de la problématique du TCE dans le secteur Valcartier, Québec, Canada », 2) Murphy et al. (2010), « Tritium-helium dating and geochemical characterization of groundwater in the Valcartier deltaic aquifer system » et 3) Lefebvre et al. (2010), « Interprétation de la caractérisation du TCE dans l'eau souterraine à Shannon, Québec, Canada ».

La municipalité de Shannon est située à l'ouest de la Garnison Valcartier, de RDDC Valcartier et d'un ancien site industriel qui est la propriété de la Société Immobilière Valcartier Inc. (SIVI). Cette région est appelée le « secteur Valcartier » dans le présent rapport. Sous ce secteur, jusqu'à 50 m de sédiments comblent une vallée enfouie où il y a deux aquifères, une nappe deltaïque régionale et une nappe dans les diamictons. La nappe deltaïque régionale est divisée par un aquitard silteux prodeltaïque présent à l'est du secteur Valcartier. La nappe deltaïque régionale est séparée de la nappe dans les diamictons par un aquitard silteux glaciomarin discontinu.

Du TCE dissous se retrouve principalement dans la nappe deltaïque régionale et migre surtout vers l'ouest et Shannon à partir des zones sources situées à RDDC Nord (B98, B67 et Lagon Bleu) et à la SIVI (Secteur 214 et Lagune C). Une nouvelle zone source présumée a été identifiée à l'emplacement de l'ancien dépotoir situé à l'ouest de la propriété de SIVI, mais cette zone source pourrait aussi être reliée aux autres sites d'utilisation du TCE dans ces environs (Lagunes X et A). La convergence de l'écoulement de l'eau souterraine vers le centre de la vallée entraîne le TCE provenant des différentes zones sources suivant trois voies de migration dans le panache principal de TCE qui atteint Shannon.

### 5.1 Exposition au TCE des puits résidentiels à Shannon

Conceptuellement, pour que les puits résidentiels de Shannon soient exposés au TCE, il faut que ces puits soient localisés à l'intérieur des limites du panache principal de TCE et que ces puits captent l'eau souterraine à partir d'une unité à l'intérieur de laquelle se trouve du TCE. Santé Canada recommande une concentration maximale de 5 µg/L de TCE dans l'eau potable tandis que la norme québécoise du MDDEP est de 50 µg/L.

Des statistiques ont été calculées sur les concentrations moyennes du TCE détecté dans 295 puits résidentiels de Shannon localisés du côté est de la rivière Jacques-Cartier. Au niveau des localisations des puits résidentiels par rapport au panache de TCE, sur les 212 puits résidentiels localisés en dehors du panache principal, 141 (67%) n'ont pas eu de détections de TCE et aucun des 71 autres n'a eu des concentrations moyennes en TCE excédant 5 µg/L. Les 15 puits localisés à l'intérieur du panache secondaire ont tous montré la présence de TCE mais à des

concentrations moyennes inférieures à 2 µg/L. Enfin, pour les 68 puits localisés à l'intérieur du panache principal, 16 (24%) n'ont pas eu de détections de TCE, tandis que les détections moyennes de TCE ont été les suivantes : inférieures à 5 µg/L pour 19 puits (28%), entre 5 et 50 µg/L pour 13 puits (19%) et excédant 50 µg/L pour 20 puits (29%).

Les unités géologiques dans lesquelles se fait le captage de l'eau des puits résidentiels ont pu être déterminées pour les puits pour lesquels la profondeur est connue. L'analyse des résultats de suivi du MDDEP pour ces puits localisés à l'intérieur du panache principal de TCE montre les relations suivantes entre la présence du TCE et l'unité géologique où se fait le captage:

- Sur 4 puits au total captant au roc, le TCE n'a pas été détecté dans 3 puits et il a été détecté en trace (0.06 µg/L) dans un autre puits;
- Sur 13 puits au total captant dans les diamictons, le TCE n'a pas été détecté dans 2 puits, tandis que les détections ont été les suivantes : inférieures à 5 µg/L pour 7 puits, entre 5 et 50 µg/L pour 1 puits et excédant 50 µg/L pour 3 puits;
- Sur 40 puits au total captant dans la nappe deltaïque régionale, le TCE n'a pas été détecté dans 6 puits, tandis que les détections ont été les suivantes : inférieures à 5 µg/L pour 9 puits, entre 5 et 50 µg/L pour 10 puits et excédant 50 µg/L pour 15 puits.

Une estimation a été faite de l'arrivée du TCE à Shannon à partir de zones sources de TCE ainsi que de la durée d'exposition au TCE jusqu'à 2001 pour les puits résidentiels de Shannon localisés à l'intérieur du panache principal, donc potentiellement exposés au TCE. À partir de 2001, les puits résidentiels touchés par le TCE n'ont plus servi à l'approvisionnement en eau. L'estimation de la durée d'exposition nécessite d'abord d'évaluer la période probable d'arrivée du TCE à Shannon à partir des informations disponibles sur le début possible d'émission du TCE aux zones sources et sur le temps de migration du TCE entre ces zones sources et Shannon.

Un modèle numérique validé a permis d'estimer un temps moyen de migration du TCE de 32 ans dans la nappe deltaïque régionale jusqu'à Shannon à partir de la zone source du Secteur 214 située à la SIVI ainsi que des zones sources situées à RDDC Nord. Un temps moyen de migration du TCE de 19 ans a été estimé à partir de la zone source de la Lagune C localisée à la SIVI. Une marge d'erreur de l'ordre de ±10 ans et de ±5 ans est estimée pour les temps moyens de migration de 32 et 19 ans, respectivement. Certaines zones sources ont aussi un temps de migration précédent la migration dans l'aquifère deltaïque : dans le cas de la zone source B98 à RDDC Nord, il y a migration initiale à travers l'aquitard prodeltaïque, alors que pour la zone source potentielle de l'ancien dépotoir à l'ouest de la SIVI, la migration initiale se fait dans les diamictons. En considérant l'incertitude sur l'estimation du temps de migration, le temps de migration initial hors de l'aquifère deltaïque, et la période d'émission potentielle aux zones sources, la durée d'exposition possible des puits résidentiels de Shannon peut être estimée :

- Pour les zones sources B98 et B67 localisées à RDDC Nord, le TCE émis par ces zones sources n'aurait pas atteint Shannon en 2001, tandis que le TCE émis par la zone source du Lagon Bleu aurait pu atteindre Shannon en 1992 (depuis 9 ans en 2001);
- Dans le cas du TCE émis par la zone source du Secteur 214 localisée sur les terrains de la SIVI, le TCE aurait pu atteindre Shannon en 1978 (depuis 23 ans en 2001);
- Pour la zone source de la Lagune C située sur les terrains de la SIVI, le TCE émis aurait pu atteindre Shannon en 1982 (depuis 19 ans en 2001);

- Du TCE aurait aussi pu atteindre Shannon à partir de zones sources potentielles situées à la limite ouest de la propriété de la SIVI et qui sont présumées être en relation avec l'émergence de TCE dans la nappe deltaïque régionale en amont de Shannon. La possibilité que ces sites soient des zones sources doit cependant à être vérifiée.

Quant au niveau des concentrations pour les puits résidentiels à Shannon situés à l'intérieur du panache de TCE, 50% des concentrations dans les puits se situent sous 5 µg/L, tandis que 30% sont supérieures à 50 µg/L. Les concentrations moyenne et médiane de TCE dans le panache principal défini à l'aide de puits d'observation étaient respectivement de 77.25 et 3.05 µg/L. Les concentrations de TCE dans les puits résidentiels sont semblables à celles observées dans les puits d'observation installés à Shannon. Le TCE se dégrade et forme des produits de dégradation qui sont le dichloroéthène (DCE) et le chlorure de vinyle (CV). Les concentrations de ces produits de dégradation sont disponibles pour les puits d'observation ainsi que les échantillons obtenus par enfoncement lors de la caractérisation de 2004-2005. Environ 3 à 5% des analyses ont détecté des concentrations de produits de dégradation du TCE qui dépassent les normes de potabilité, ce qui est beaucoup moins fréquent que les dépassements de normes pour le TCE.

Même si le panache principal de TCE à Shannon ne peut être délimité qu'à partir des données disponibles en 2004 et 2005, il est possible de conclure que l'étendue de ce panache a dû être constante dans le temps. Cette conclusion est basée sur le fait que l'écoulement de l'eau souterraine et la migration du TCE à Shannon sont contraints de rester à l'endroit où le panache a été délimité à cause des conditions hydrogéologiques.

## **5.2 Évaluation de l'expertise hydrogéologique du Pr. Chapuis**

Beaucoup de nouvelles données ont été acquises et un important travail d'analyse de ces données a été réalisé depuis le rapport de l'INRS (Lefebvre et al., 2003) qui a porté sur la caractérisation hydrogéologique réalisée en 2001-2002 sur le territoire du MDN (Garnison et de RDDC Valcartier). Certaines conclusions de Lefebvre et al. (2003) sont donc dépassées relativement aux connaissances actuelles sur l'hydrogéologie et la contamination en TCE de l'eau souterraine dans le secteur Valcartier et à Shannon. Ceci rend l'évaluation des travaux du Pr. Chapuis difficile, puisque son rapport d'expertise se concentre sur des travaux dépassés par des études plus récentes.

Les méthodes d'interprétation utilisées par le Pr. Chapuis pour refaire l'interprétation des essais de perméabilité sont reconnues et rigoureuses et elles se conforment aux normes d'interprétation les plus récentes. Les résultats obtenus par le Pr. Chapuis pour la conductivité hydraulique représentative des puits d'observations où ont été réalisés les essais de perméabilité sont donc acceptés comme valides et ils ne sont pas remis en question. Les valeurs de  $K$  varient naturellement sur plusieurs ordres de grandeur et elles sont montrées généralement sur une échelle logarithmique. Les valeurs interprétées par le Pr. Chapuis sont systématiquement plus élevées que les valeurs originales, mais cette différence, sans être négligeable, ne représente qu'une différence de 7.7% entre les valeurs moyennes de  $\text{Log}K$  originale (-3.92) et celle obtenue par le Pr. Chapuis (2009) (-3.62). L'interprétation rigoureuse des essais de perméabilité réalisée par le Pr. Chapuis (2009) tend donc à confirmer la validité générale des résultats originaux plutôt qu'à les remettre en cause.

Pour arriver à représenter adéquatement la conductivité hydraulique du système aquifère, les efforts doivent plutôt porter sur l'assignation de valeurs représentatives de  $\text{Log}K$  dans l'ensemble du système aquifère afin d'arriver à faire une modélisation numérique représentative de l'écoulement de l'eau souterraine dans le système aquifère. Les changements dans l'estimation de  $K$  du Pr. Chapuis n'ont donc pas d'implications significatives sur la représentativité du modèle numérique d'écoulement développé par l'INRS ni sur les estimations qui ont été faites sur les temps de migration du TCE entre les zones sources et Shannon.

La solution analytique de Chesnaux et al. (2005) a été utilisée avec des paramètres typiques de la nappe libre deltaïque de Valcartier pour évaluer la sensibilité du temps de migration du TCE par rapport à trois propriétés du système aquifère : la porosité, la recharge et la conductivité hydraulique. Les résultats ont montré que la porosité et la recharge sont des paramètres qui ont beaucoup plus d'influence sur le temps de résidence (et donc de migration du TCE) et sur la vitesse de l'eau souterraine que la conductivité hydraulique. Pour arriver à déterminer des valeurs de temps de migration réalistes pour les conditions rencontrées dans l'aquifère deltaïque de Valcartier, des efforts importants doivent être dédiés à l'évaluation de la recharge et de la porosité qui ont beaucoup plus d'effet le temps de migration que la conductivité hydraulique. Nos travaux ont mis beaucoup d'attention à l'estimation de la recharge et de la porosité.

Dans son expertise, le Pr. Chapuis présente plusieurs situations conceptuelles qui ne sont pas représentatives du secteur Valcartier et de Shannon, ce qui montre un manque de connaissance et de compréhension des particularités du système aquifère. De plus, la géométrie du système utilisée dans les cas simulés dans l'expertise du Pr. Chapuis n'est pas non plus représentative des observations et l'utilisation d'un modèle simplifié à seulement deux dimensions ne peut pas reproduire le comportement d'un système complexe où l'écoulement se fait en trois dimensions. L'estimation de la recharge (infiltration efficace) documentée dans l'expertise du Pr. Chapuis (2009) est peu réaliste et basée sur une approche simpliste. De plus, les résultats obtenus ne sont pas validés sur la base d'une comparaison à des observations de terrain. Enfin, les périodes d'activité des zones sources ne sont pas considérées pour identifier des périodes potentielles d'émissions de TCE.

## 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.
- Baalousha, H.**, 2005. Using CRD method for quantification of groundwater recharge in the Gaza Strip, Palestine. *Environmental Geology*, 48,889–900.
- Bouwer, H., et Rice, R.C.**, 1976. A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resour. Res.*, 12 (3), 423-428.
- Butler, J.J. et Garnett, E.J.**, 2000. Simple procedure for analysis of slug test in formations of high hydraulic conductivity using spreadsheet and scientific graphic software. Kansas Geological Survey Open File Report 2000-40, ([www.kgs.ukans.edu/hydro/publications/ofr00\\_40/](http://www.kgs.ukans.edu/hydro/publications/ofr00_40/)).
- Butler, J.J.**, 1997. The design, performance, and analysis of slug tests. Lewis Publishers, USA, 252 p.
- Chesnaux, R., Molson, J.W., et Chapuis, R.P.**, 2005. An analytical solution for ground water transit time through unconfined aquifers. *Ground Water*, 43 (4), 511-517.
- Chapuis, R.**, 2009. Recours collectif – Résidents de Shannon – Expertise sur les conditions hydrogéologiques. Rapport préliminaire préparé pour Me Charles A. Veilleux, Montréal, juin 2009, 3 volumes.
- Cohen, R.M., Mercer, J.W., Greenwald, R.M., et Beljin, M.S.**, 1997. Design guidelines for conventional pump-and-treat systems. EPA Ground Water Issue, EPA/540/S-97/504, September 1997, 38 p.
- Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME)**, 2002. Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement. Tableau Sommaire, mis à jour en 2002, ([http://www.ccme.ca/assets/pdf/fl\\_061.pdf](http://www.ccme.ca/assets/pdf/fl_061.pdf)).
- Conseil du bassin versant de la rivière Jacques-Cartier (CRJC)**, 2004. <http://www.crjc.qc.ca/>.
- Diersch H.-J.G.**, 2004a. FEFLOW – Reference Manual. WASI – Institute of Water Resources Planning and System Research Ltd., Berlin, Germany.
- Diersch H.-J.G.**, 2004b. FEFLOW – Users Manual. WASI – Institute of Water Resources Planning and System Research Ltd., Berlin, Germany.
- Earth Decision Sciences**, 2001. gOcad 2.0.8.
- Freeze, R.A., et Cherry, J.A.**, 1979. Groundwater. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.

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

**Lefebvre, R., Blais, V., Ouellon, T., Parent, M., Ballard, J.-M., et Racine, C., 2010.** Interprétation de la caractérisation du TCE dans l'eau souterraine à Shannon, Québec, Canada. INRS, Centre - Eau Terre Environnement, Rapport de recherche R-812r, soumis en mai 2010 au Ministère de la Défense Nationale et à Justice Canada.

**Lefebvre, R., Maltais, I., Paradis, D., et Michaud, Y., 2009.** Recharge assessment using daily soil moisture balance and well hydrographs in deltaic unconfined aquifers. Paper 1147, Paper IA34A-04, Session IA34A *Groundwater Recharge and Discharge: Measurement, Theory and Modelling*, AGU 2009 Joint Assembly, 24-27 May, 2009, Toronto, Ontario, Canada.

**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.

**Lefebvre, R., 2006.** Écoulement multiphase en milieux poreux. Notes de cours, 6<sup>e</sup> éd., GEO-9602/GLG-65146, programme conjoint Université Laval / INRS, INRS-Eau, Terre et Environnement, 371 p. et annexes.

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

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

**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.

**Maltais, I., 2007.** Estimation de la recharge par le bilan hydrologique quotidien dans la région de Portneuf. Rapport de stage, Département de géologie et de génie géologique, Université Laval.

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

**Ministère 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](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), 1994.** Échantillonnage des eaux souterraines. Dans le Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales. Le griffon d'argile, Québec, 102 p.

**Ministère du Développement Durable de l'Environnement et des Parcs du Québec (MDDEP), 2008.** Règlement sur la qualité de l'eau potable. Site Internet consulté en juin 2008. <http://www.menv.gouv.qc.ca/eau/potable/brochure/annexe.htm>

**Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs du Québec (MDDEP), 2010.** Système d'information hydrogéologique (SIH). <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/souterraines/sih/index.htm>

**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.

**National Research Council (NRC), 2004.** Contaminants in the subsurface: Source zone assessment and remediation. National Research Council, Committee on Source Removal of Contaminants in the Subsurface, The National Academies Press, Washington, ISBN: 0-309-54664-8, 370 p.

**Ouellon, T., Lefebvre, R., Blais, V., Racine, C., et 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, soumis en mai 2010 à Construction de Défense Canada, ISBN 978-2-89146-560-1.

**Ouellon, T., Blais, V., Lefebvre, R., et 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 final révisé, 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., et 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.

**Ouellon, T., 2006.** Distribution spatiale de la conductivité hydraulique dans le système aquifère de Valcartier et influence de l'hétérogénéité sur la modélisation de l'écoulement. Mémoire de maîtrise, INRS-Eau, Terre et Environnement, Institut National de la Recherche Scientifique, Université du Québec, Québec, Canada, Mai 2006, 78 pp.

**Parent, M., Girard, F., Fagnan, N., Michaud, Y., Boisvert, É. et Fortier, R., 2008.** Chapitre 5 - Caractérisation géologique de la subsurface. Dans *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 et Environnement), le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, la MRC de Portneuf et l'université Laval. Dépôt légal - Bibliothèque est Archives nationales du Québec, ISBN 978-2-550-51189-2 (pdf), 71-86.

**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.

**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.  
[http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/sum\\_guide-res\\_recom/index-fra.php](http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/sum_guide-res_recom/index-fra.php)

**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.

## Planches

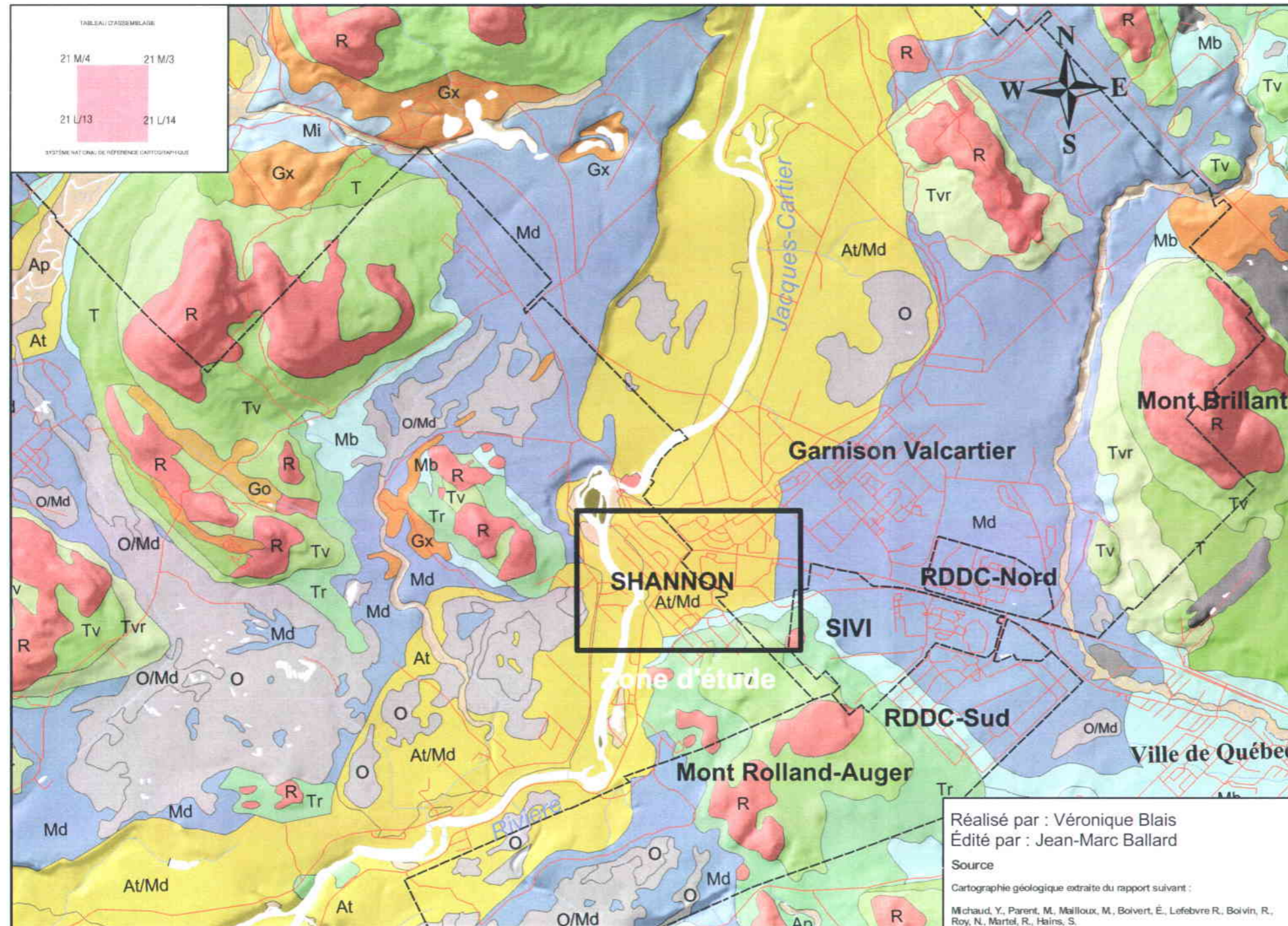


Expertise hydrogéologique sur le TCE  
dans l'eau souterraine à Shannon,  
Québec, Canada

René Lefebvre

INRS, Centre – Eau Terre Environnement  
Rapport de recherche R-1153  
Mai 2010

**Planche 1.1**  
Localisation régionale  
et géologie des dépôts meubles



0 500 1 000  
Mètres

Carte régionale de localisation et géologie des dépôts meubles

Réalisé par : Véronique Blais  
Édité par : Jean-Marc Ballard  
Source  
Cartographie géologique extraite du rapport suivant :  
Michaud, Y., Parent, M., Mailloux, M., Boivert, É., Lefebvre R., Boivin, R.,  
Roy, N., Martel, R., Hains, S.  
Échelle 1 : 50 000

**LÉGENDE**

**Formations superficielles**

- Dépôts organiques
- Ap Sédiments alluviaux : actuels
- At Sédiments alluviaux : terrasses fluviales
- Md Sédiments marins : deltaïques
- Mi Sédiments marins : intertidaux
- Mb Sédiments marins : littoraux, pré-littoraux et d'exondation
- Go Sédiments fluvioglaciaires : épandage subaérien
- Gs Sédiments fluvioglaciaires : épandage subaquatique
- Gx Sédiments fluvioglaciaires : juxtaglaciaires
- Tr Sédiments glaciaires : Till remanié
- Tvr Sédiments glaciaires : Till remanié sur roc
- T Sédiments glaciaires : Till en couverture généralement continue
- Tv Sédiments glaciaires : Till en couverture généralement discontinue
- R Roche métamorphiques et magmatiques précambriennes
- Routes
- - - Limite de propriété

Expertise hydrogéologique sur le TCE  
dans l'eau souterraine à Shannon,  
Québec, Canada

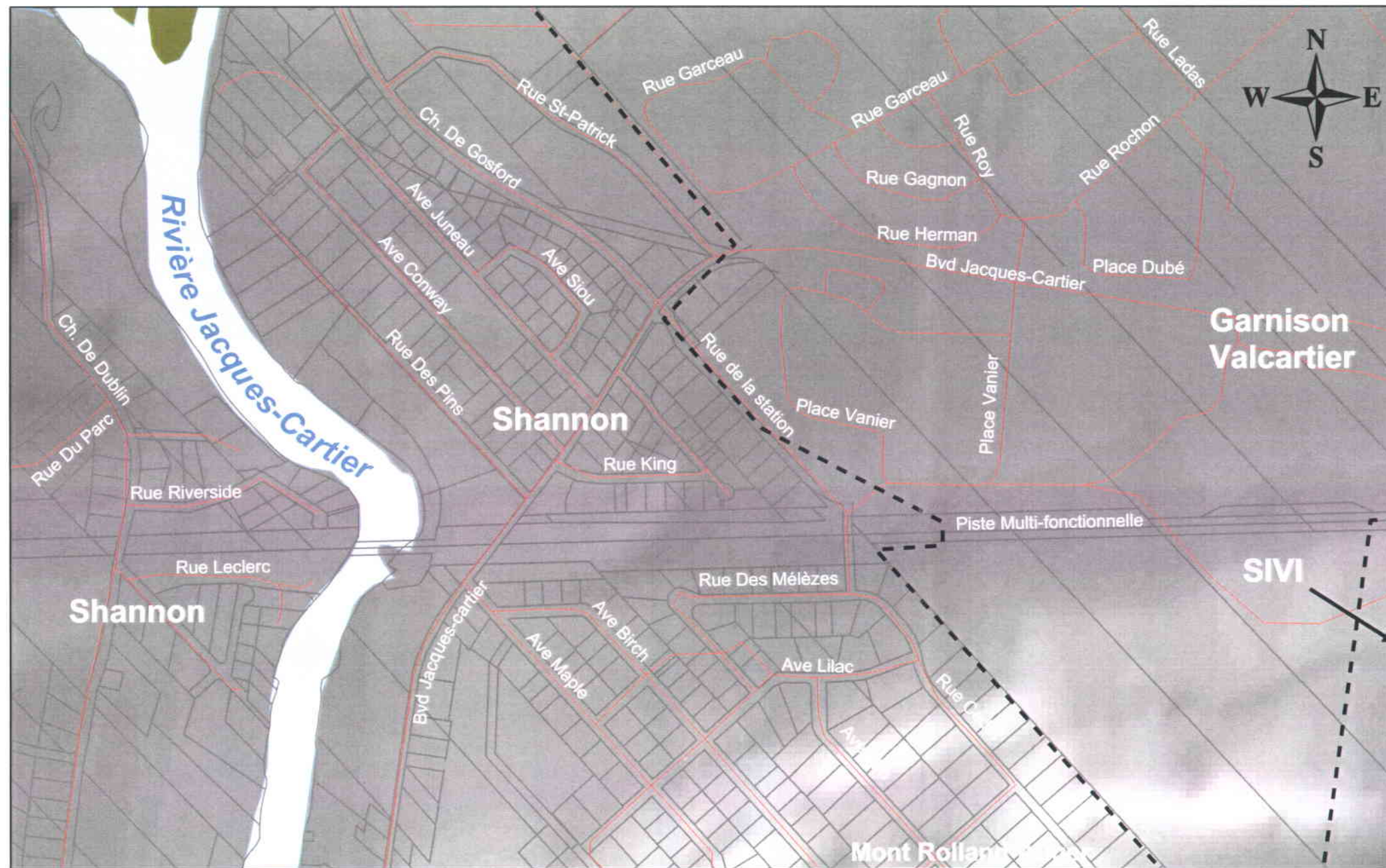
René Lefebvre

INRS, Centre – Eau Terre Environnement  
Rapport de recherche R-1153  
Mai 2010

**Planche 1.2**  
Localisation des rues  
à Shannon

- - - Limite de propriété
- Routes
- lots

Échelle 1 : 8 000



Réalisé par : Véronique Blais  
Édité par : Jean-Marc Ballard

Source

Cartographie géologique extraite du rapport suivant :

Michaud, Y., Parent, M., Mailloux, M., Boivert, E., Lefebvre R., Boivin, R.,  
Roy, N., Martel, R., Hains, S.

**Planche 2.1**

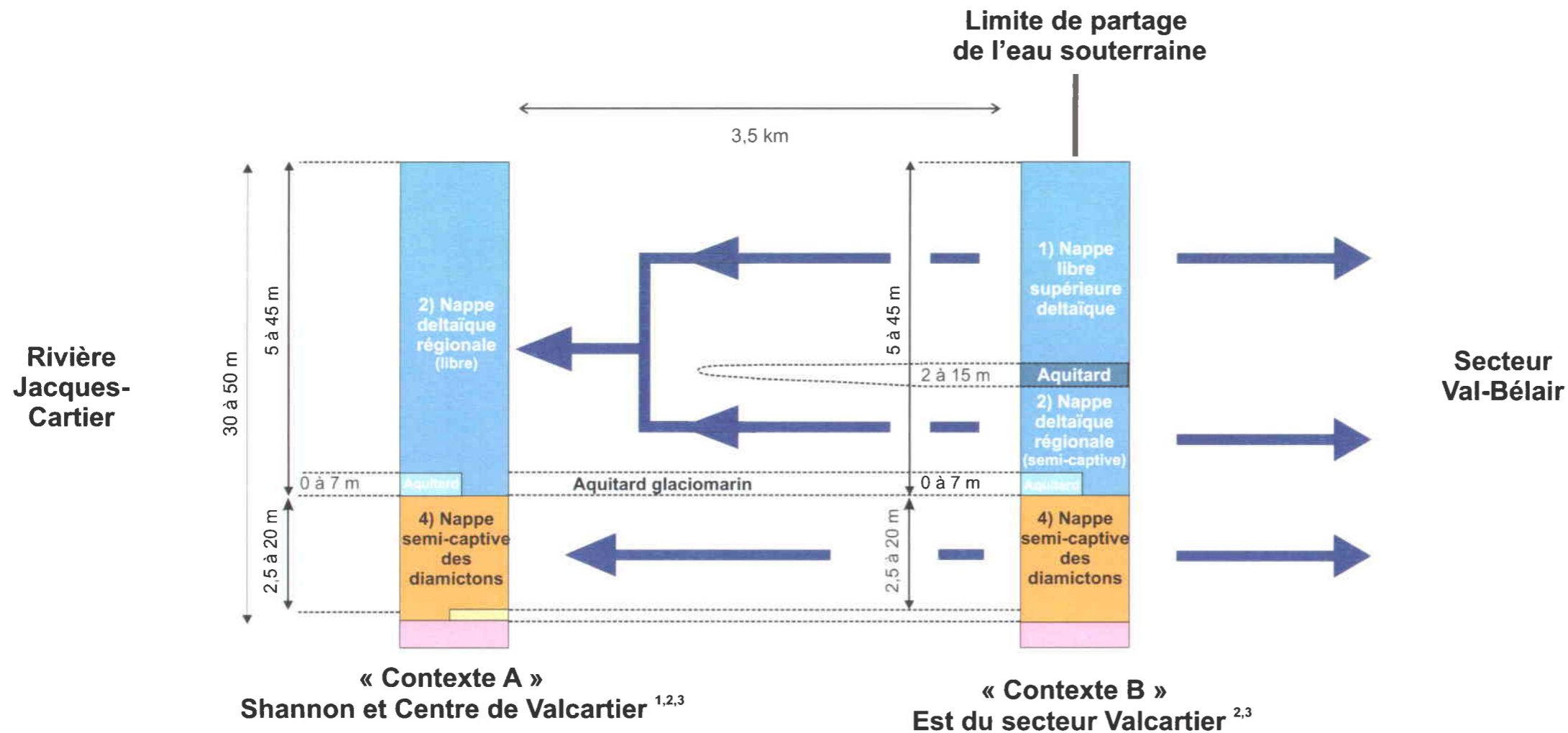
Contextes hydrogéologiques

- Sables et graviers deltaïques [Md]
- Sables et silts prodeltaïques [Md-p]
- Silt glaciomarin [Ma]
- Proglaciaire [Gx]
- Till [T]
- Roc [R]

Diamictons

- Directions générales d'écoulement
- Limite de partage de l'eau souterraine (nappe semi-captive)

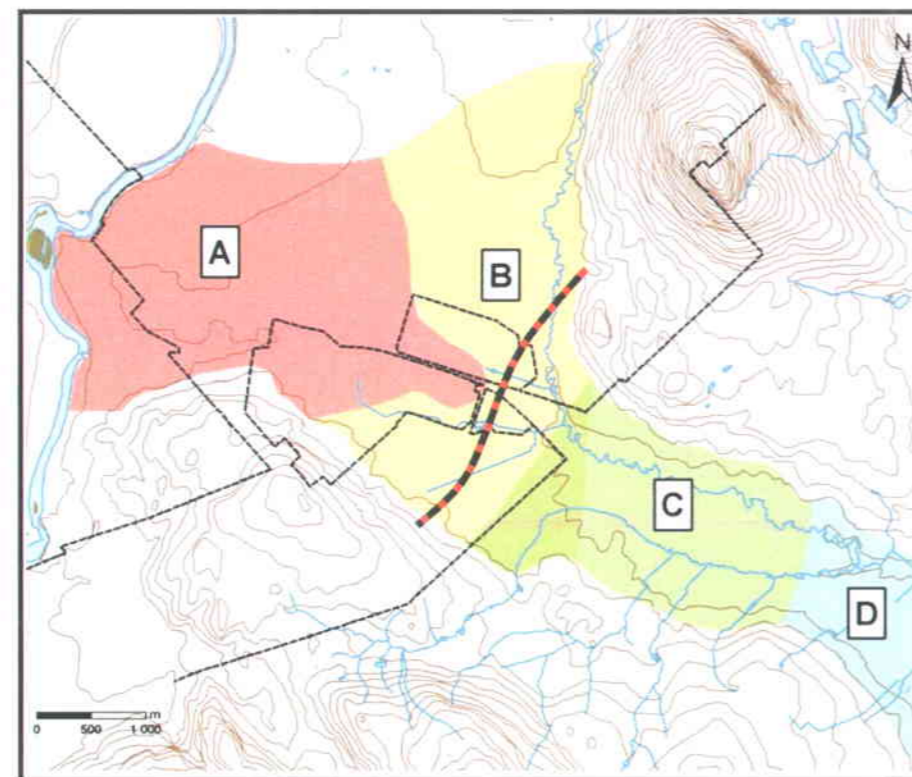
<sup>4</sup> les codes entre crochets renvoient aux unités de la carte de la géologie des formations superficielles. Les codes [Ma] et [Md-p] renvoient à des unités qui n'affleurent pas dans le secteur d'étude et ceux-ci sont par conséquent absents de la Planche 1.1.



« Contexte A »  
Shannon et Centre de Valcartier<sup>1,2,3</sup>

« Contexte B »  
Est du secteur Valcartier<sup>2,3</sup>

Étendue des contextes d'écoulement A à D



D'après Ouellon et al. (2010)

<sup>1</sup> Dans les journaux de forage, les unités de sédiments proglaciaires [G] et de till [T] sont souvent indifférenciées. Dans notre rapport, ces deux unités sont donc traitées en combinaison et nommées "diamictons", ce qui désigne un matériel composé de particules de tailles hétérogènes.

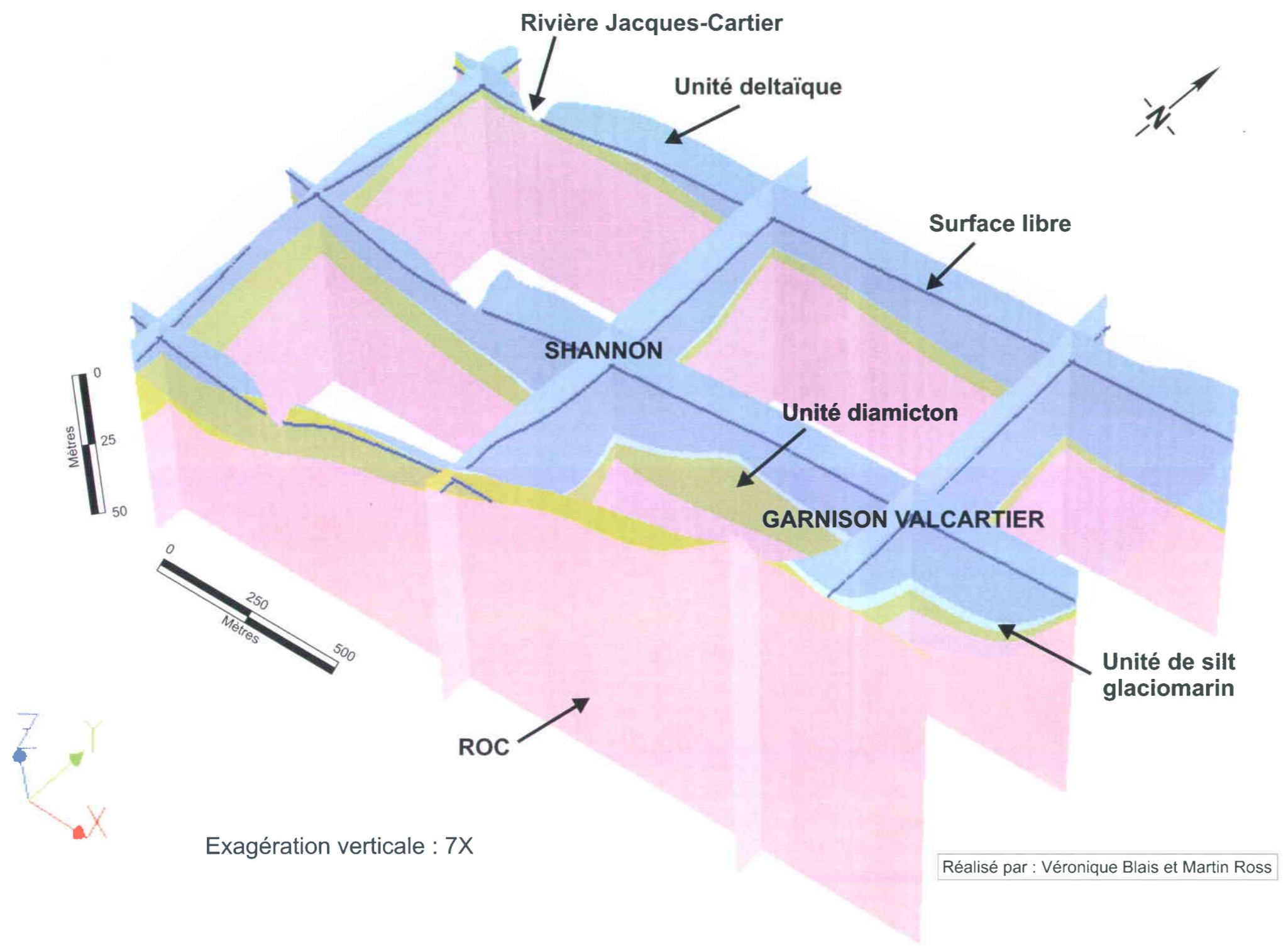
<sup>2</sup> L'unité de sédiments marins deltaïques [Md] comprend deux sous-faciès, soit les sables et graviers deltaïques [Md] et les sables et silts prodeltaïques [Md-p].

<sup>3</sup> Les différents faciès marins [Ma, Md et Md-p] sont limités aux élévations inférieures à ±180m au-dessus du niveau marin. Les flancs de montagne sont dominés par les affleurements de roc [R], de till [T] et dans une moindre mesure, par les sédiments proglaciaires [Gx].

**Planche 2.2**  
Modèle géologique

Unités géologiques :

- Deltaïque
- Glaciomarin
- Diamictons
- Roc



Exagération verticale : 7X

Réalisé par : Véronique Blais et Martin Ross

Tiré de Lefebvre et al. (2010)

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

**Planche 2.3**

Écoulement et panache de TCE

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

- Limite de détection  $<[TCE] < 5 \mu\text{g/L}$
- $5 < [TCE] < 50 \mu\text{g/L}$
- $50 < [TCE] < 590 \mu\text{g/L}$
- $[TCE] > 590 \mu\text{g/L}$

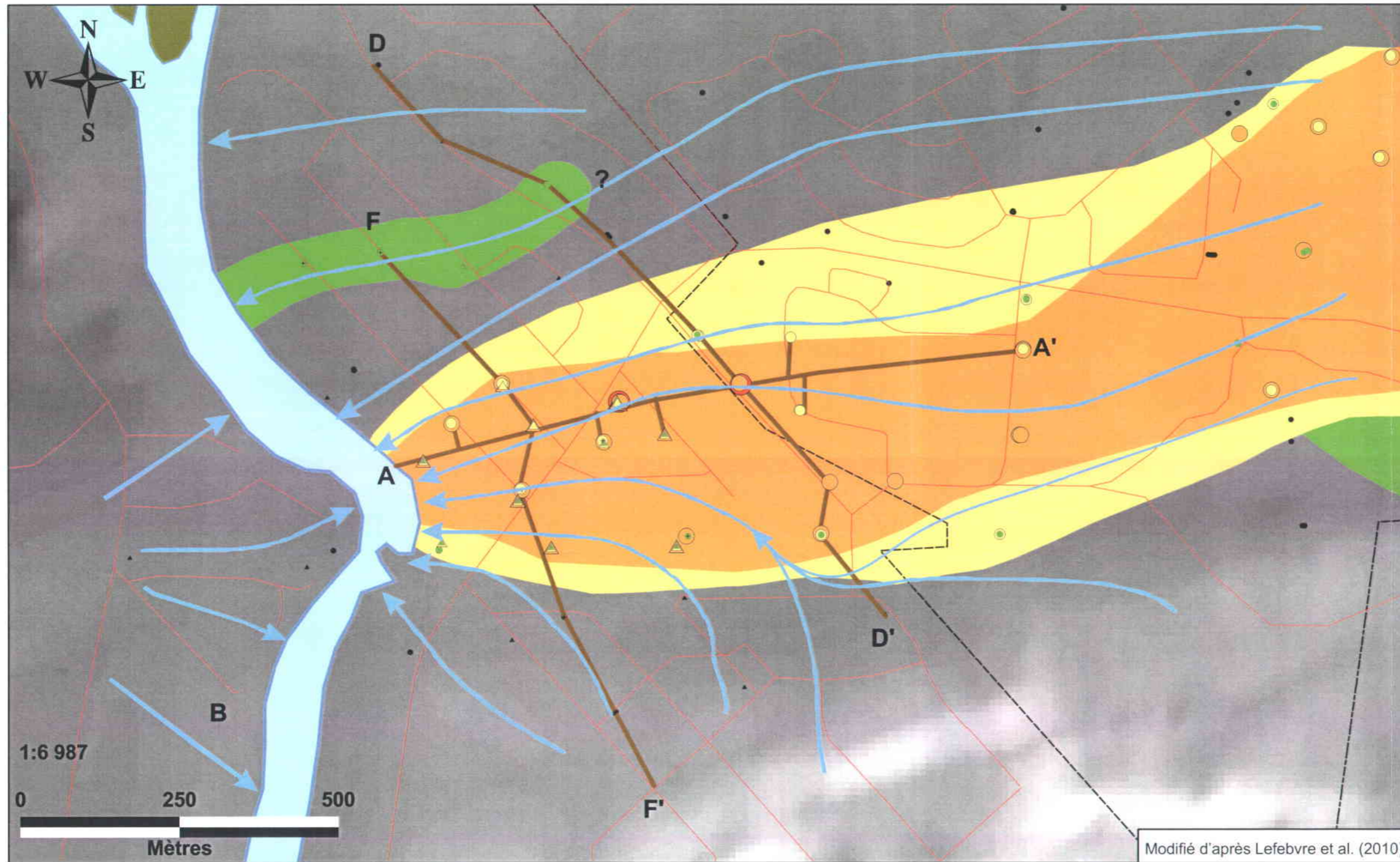
? Extension du panache et concentrations  
inconnues ou incertaines

--- Limites base

— Routes

— Coupes planche 2.4

→ Directions générales d'écoulement



Modifié d'après Lefebvre et al. (2010)

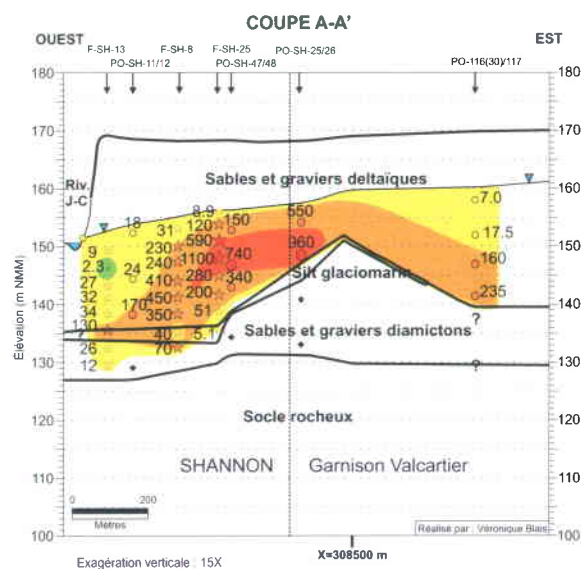
Modèle numérique de terrain produit par le LCNP



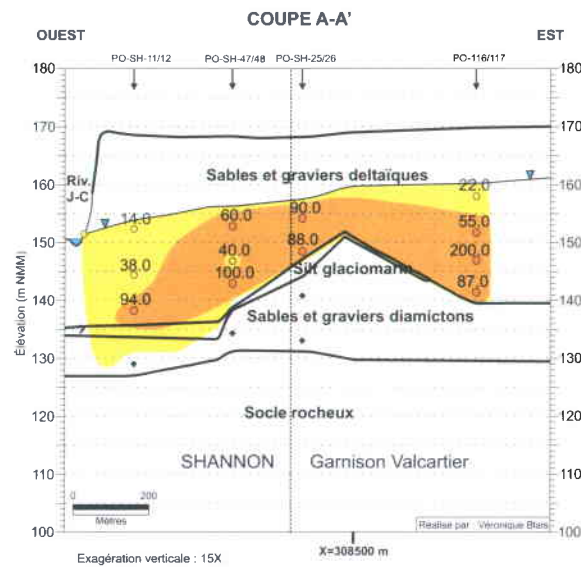
1- Les couleurs des points correspondent aux mêmes plages de concentrations que les couleurs des zones du panache

Modèle numérique de terrain utilisé comme fond de carte

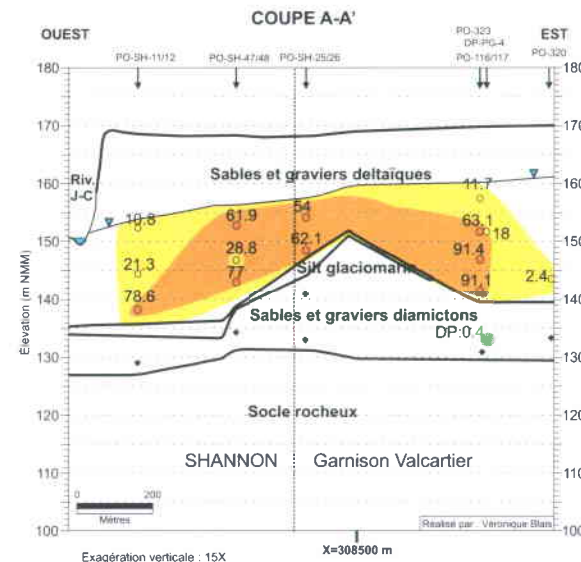
2004-2005



2007-2008



2009

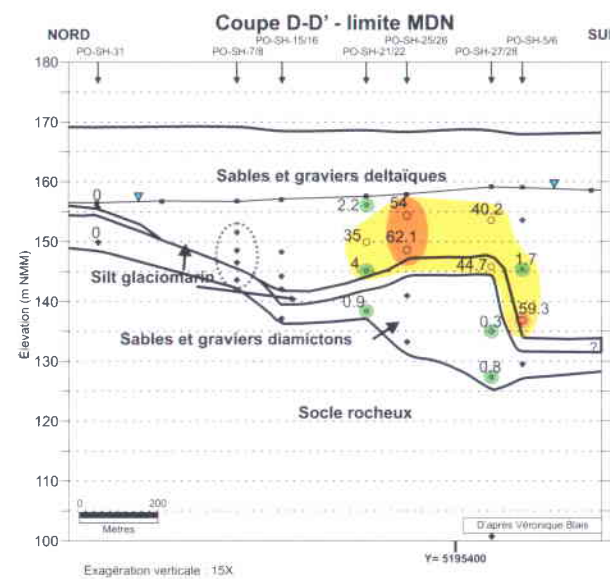
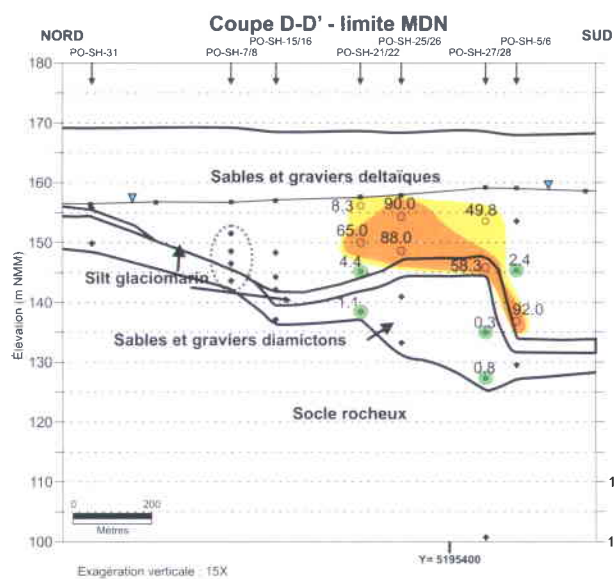
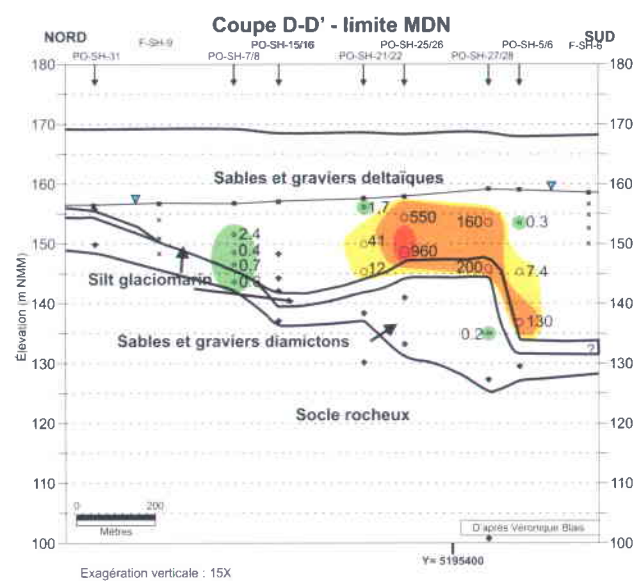


**INRS**  
Université du Québec

Expertise hydrogéologique sur le TCE dans l'eau souterraine à Shannon, Québec, Canada

René Lefebvre

INRS, Centre – Eau Terre Environnement  
Rapport de recherche R-1153  
Mai 2010



**Planche 2.4**  
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

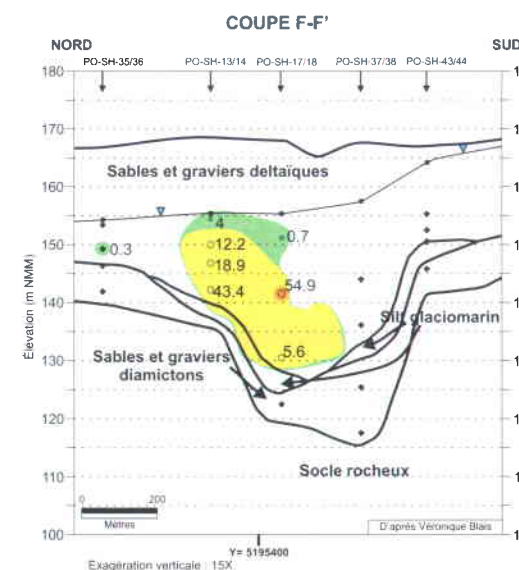
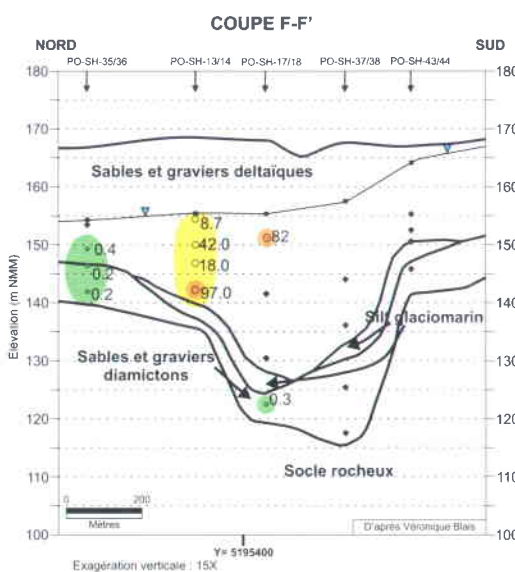
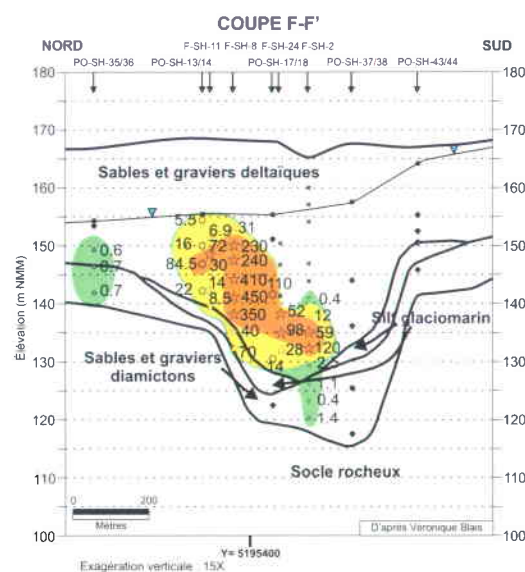
Échantillons de puits :

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

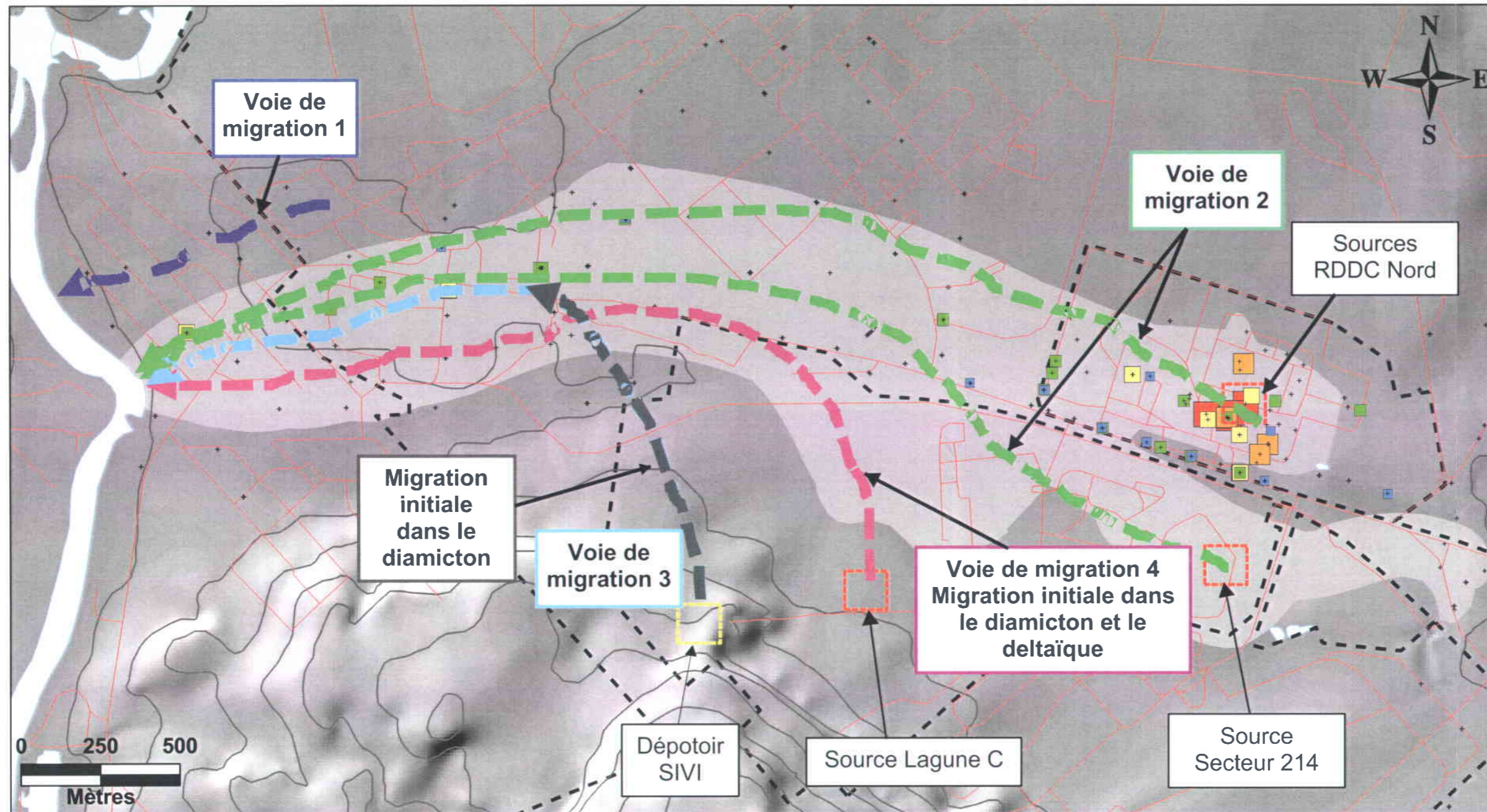
Zones de concentrations :

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

▽ Surface libre



Réalisé par Jean-Marc Ballard, Tiré de Lefebvre et al. (2010)



Tiré de Ouellon et al. (2010)

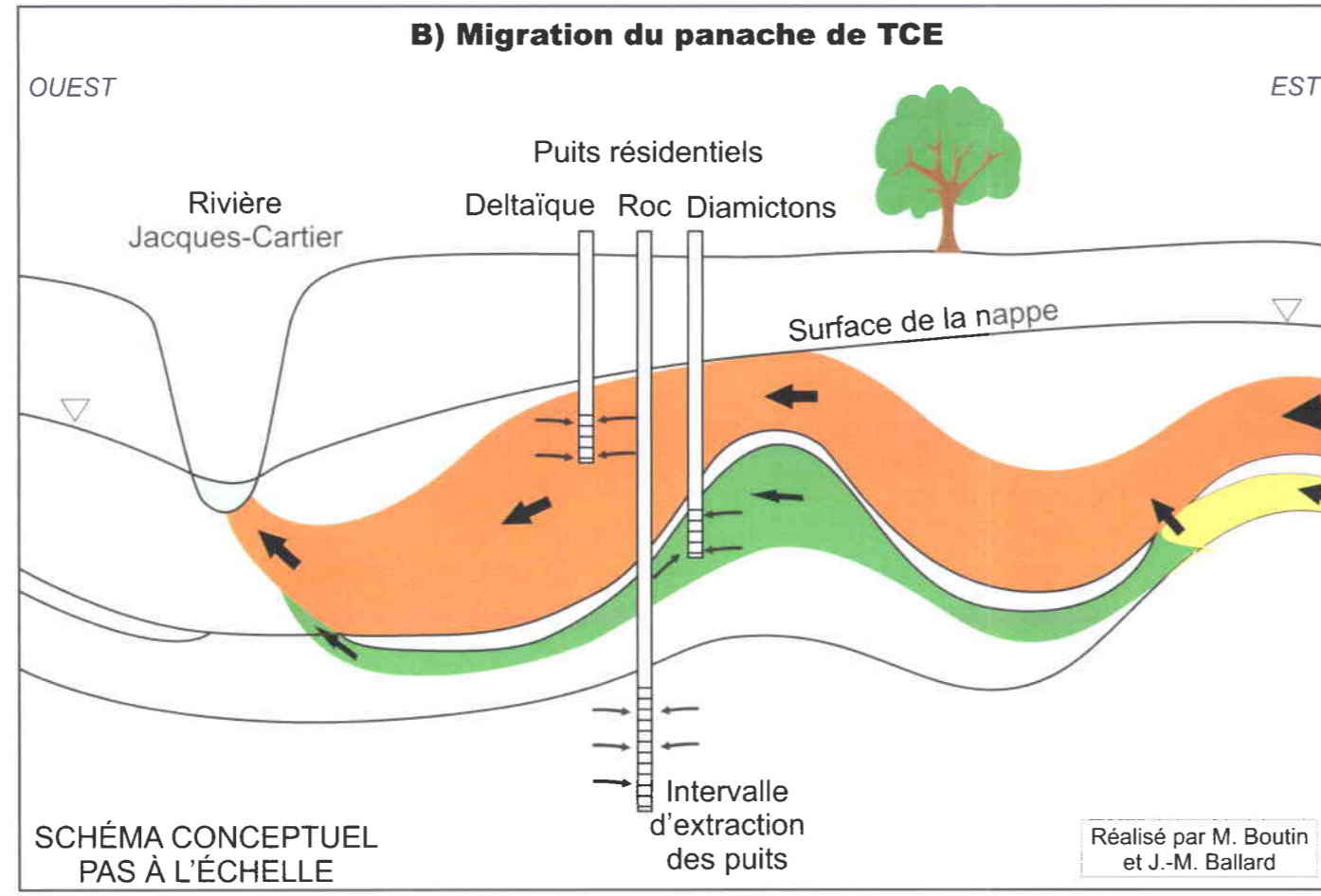
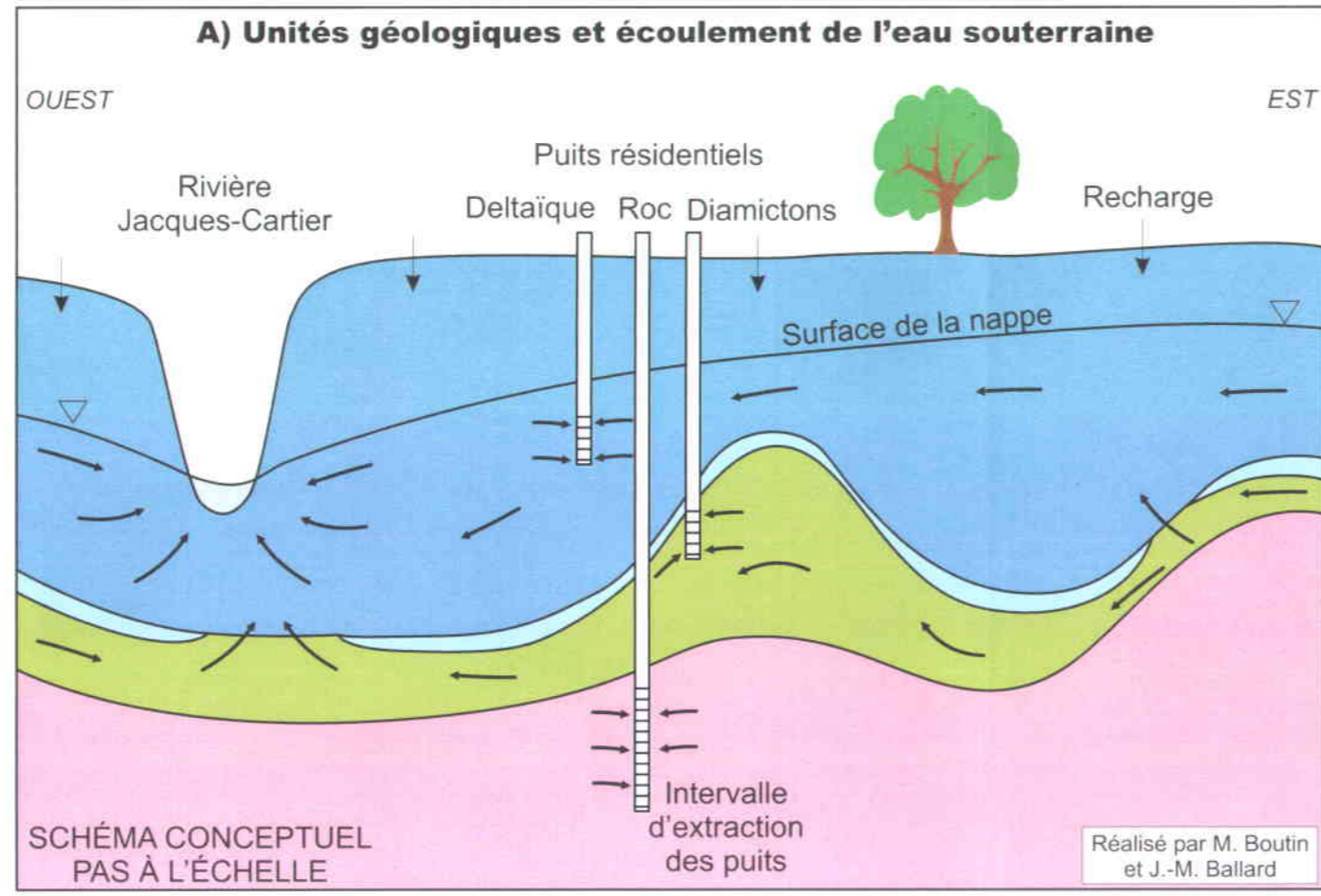
**Planche 2.5**  
Zones sources et voies  
de migration du TCE

- + Points de contrôle perchlorate
- 1 < Perchlorate < 2 µg/L
- 2 < Perchlorate < 5 µg/L
- 5 < Perchlorate < 15 µg/L
- 15 < Perchlorate < 50 µg/L
- 50 < Perchlorate < 100 µg/L
- Étendue du TCE (> 5 µg/L)
- - - Limite de propriété
- Rivières et ruisseaux
- Routes
- Contours topographiques
- Zone source
- Zone source potentielle

Expertise hydrogéologique sur le TCE dans l'eau souterraine à Shannon, Québec, Canada

René Lefebvre

INRS, Centre – Eau Terre Environnement  
Rapport de recherche R-1153  
Mai 2010



**Planche 3.1**  
Modèle conceptuel de l'exposition au TCE par les puits résidentiels

Unités géologiques :

- Deltaïque
- Glaciomarin
- Diamictons
- Roc

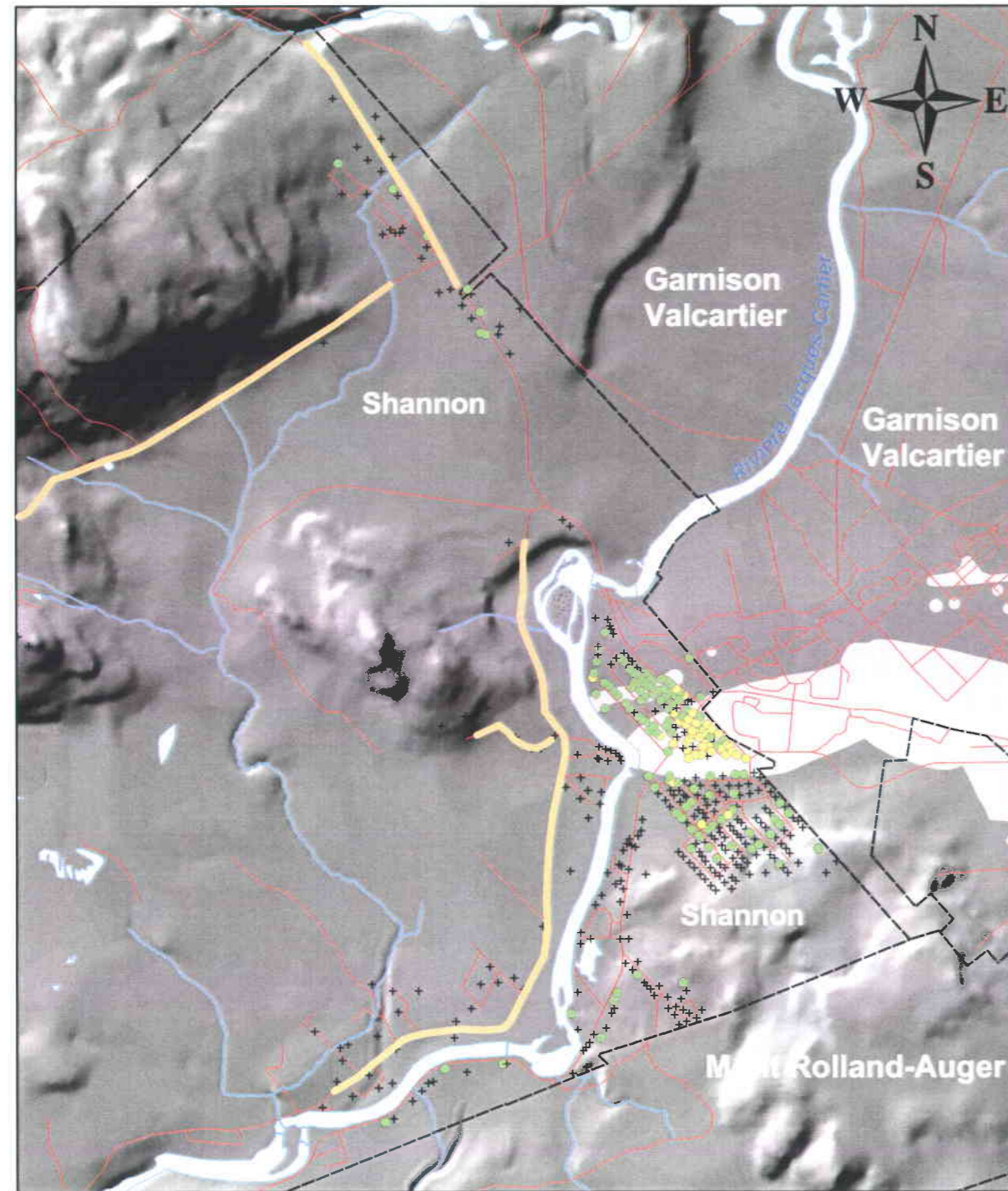
Panache de TCE (µg/L) :

- n.d. < [TCE] < 5
- 5 <= [TCE] < 50
- 50 <= [TCE] < 590

- Direction d'écoulement
- Migration du TCE

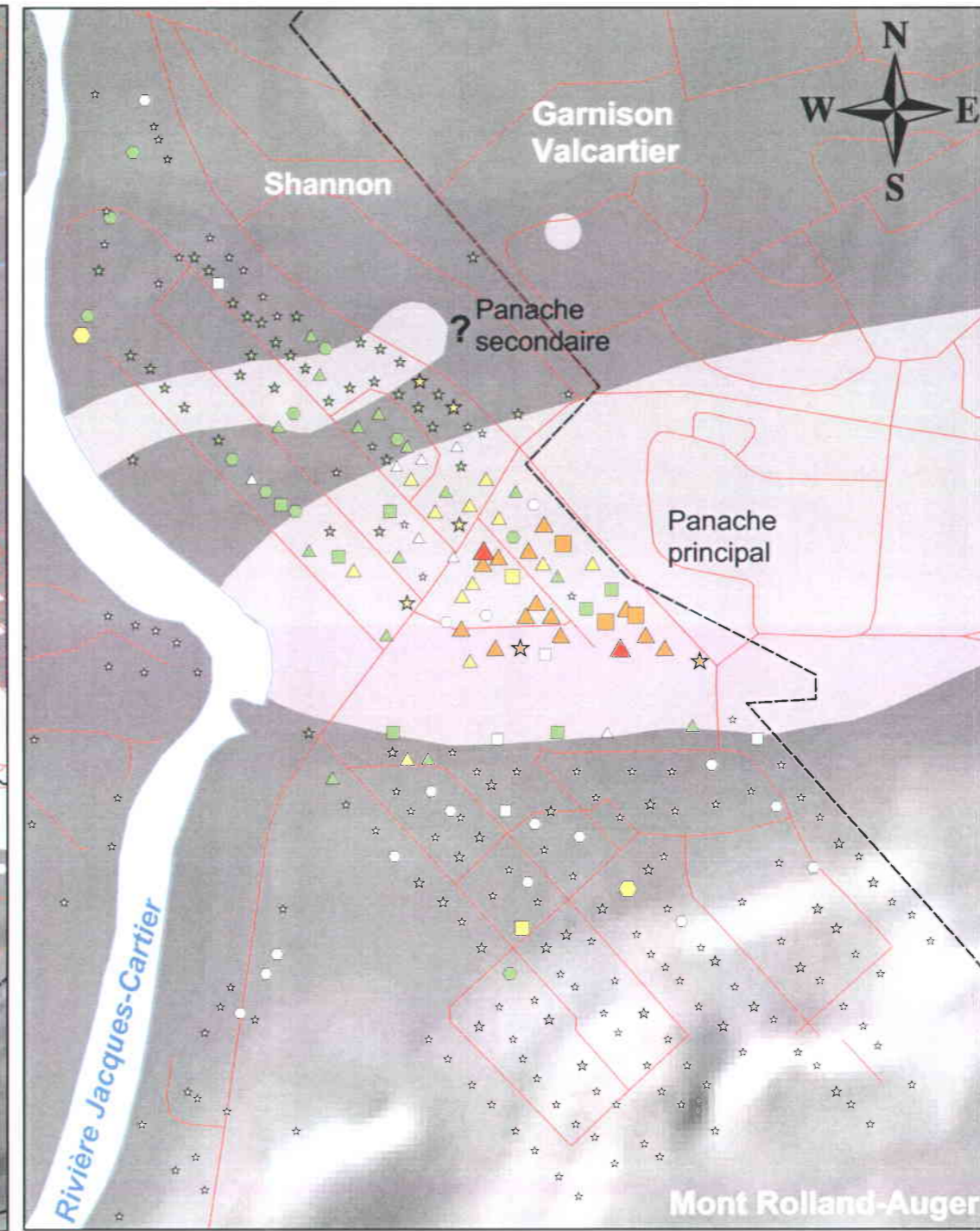
Migration du TCE provenant des zones sources en amont

Carte 1: Étendue du suivi du MDDEP



0 495 990 1 980 Meters

Carte 2: Concentration maximales en TCE en relation avec le panache délimité par Lefebvre et al. (2010)



0 115 230 460 Meters

Réalisé par Jean-Marc Ballard

Expertise hydrogéologique sur le TCE dans l'eau souterraine à Shannon, Québec, Canada

René Lefebvre

INRS, Centre – Eau Terre Environnement  
Rapport de recherche R-1153  
Mai 2010

**Planche 3.2**

Suivi du TCE dans les puits résidentiels par le MDDEP

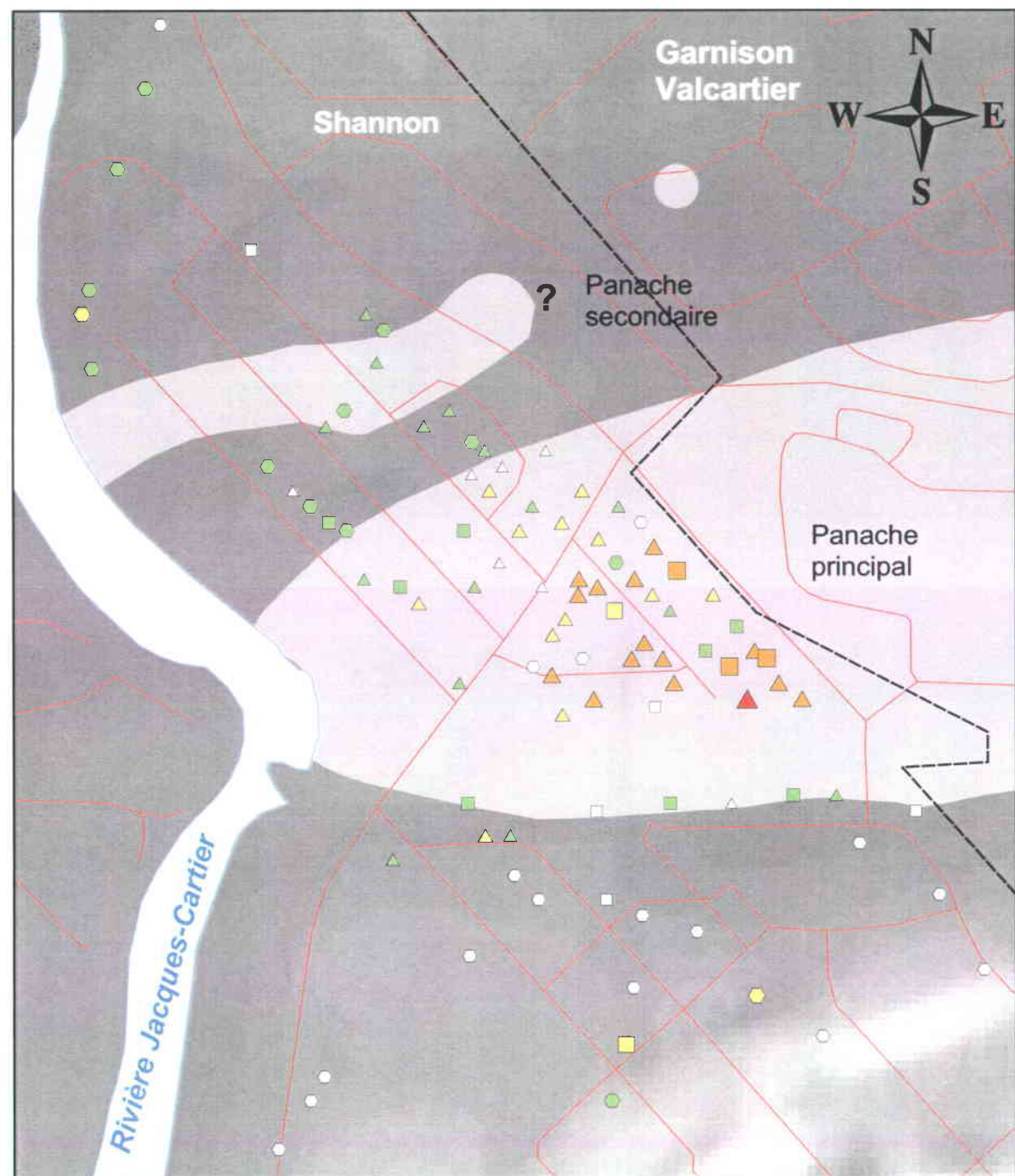
**Carte 1:**

- + TCE non détecté
- TCE détecté sous 5 µg/L
- TCE détecté supérieur à 5 µg/L
- Tronçons de routes où le TCE n'a pas été détecté dans les puits suivis par le MDDEP (résidences individuelles pas montrées sur la carte)

**Carte 2:**

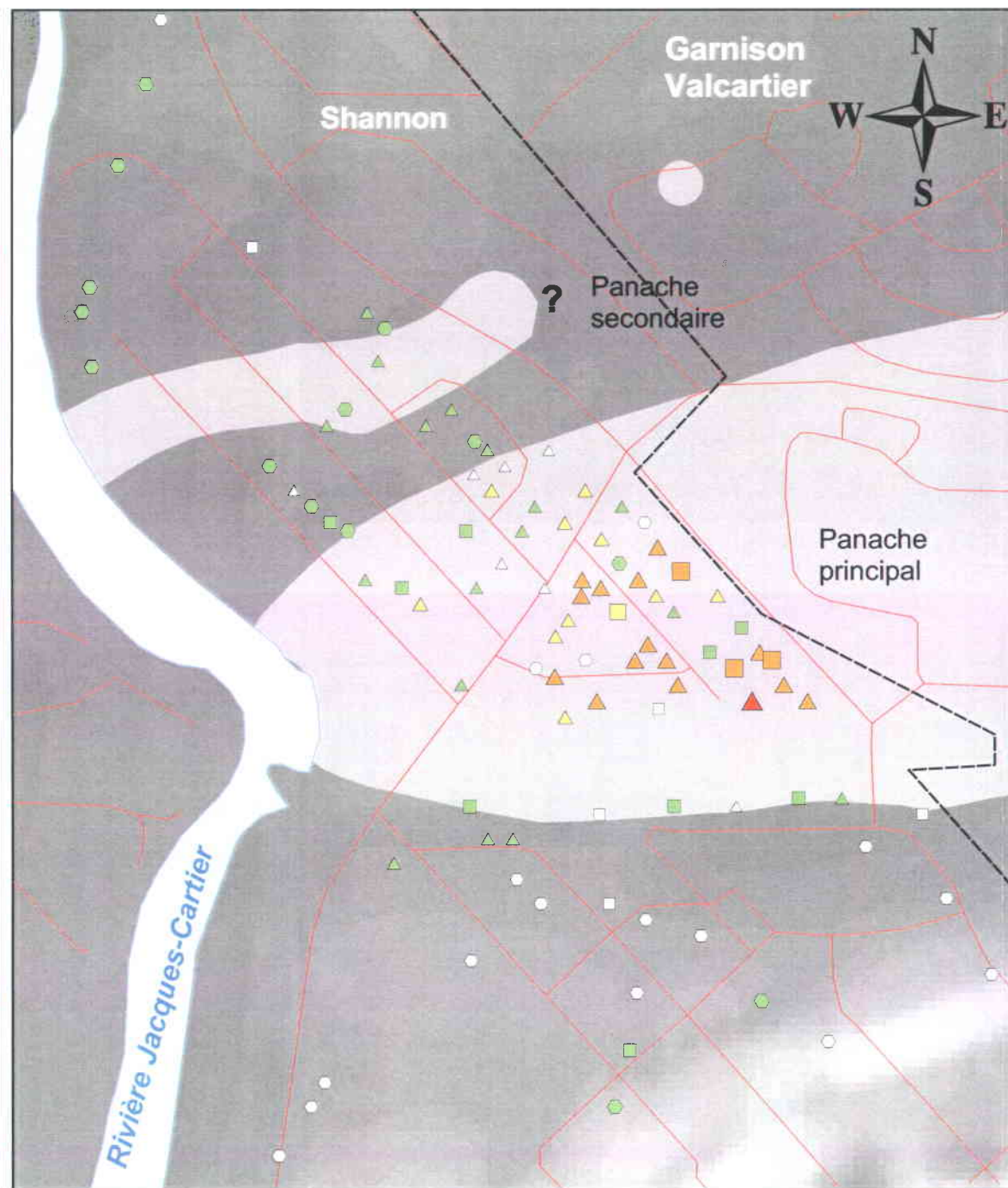
- Unité de captage du puits
  - △ Puits dans l'unité deltaïque
  - Puits dans les diamictons
  - Puits dans le roc
  - ☆ Puits de profondeur inconnue
- Classes de concentrations TCE (µg/L)
  - [TCE]>590
  - 50<[TCE]<590
  - 5<[TCE]<50
  - limite de détection<[TCE]<5
  - non détecté (n.d.)
- Étendue du panache de TCE (Planche 2.3)
- Limite de propriété
- Routes

Carte 1 : Concentrations maximales en TCE en relation avec le panache délimité par Lefebvre et al. (2010) pour les puits dont la profondeur est connue



0 125 250 500 Meters

Carte 2 : Concentrations moyennes en TCE en relation avec le panache délimité par Lefebvre et al. (2010) pour les puits dont la profondeur est connue



0 125 250 500 Meters

Réalisé par Jean-Marc Ballard

Expertise hydrogéologique sur le TCE dans l'eau souterraine à Shannon, Québec, Canada

René Lefebvre

INRS, Centre – Eau Terre Environnement  
Rapport de recherche R-1153  
Mai 2010

**Planche 3.3**

TCE dans les puits résidentiels par rapport à l'unité du captage

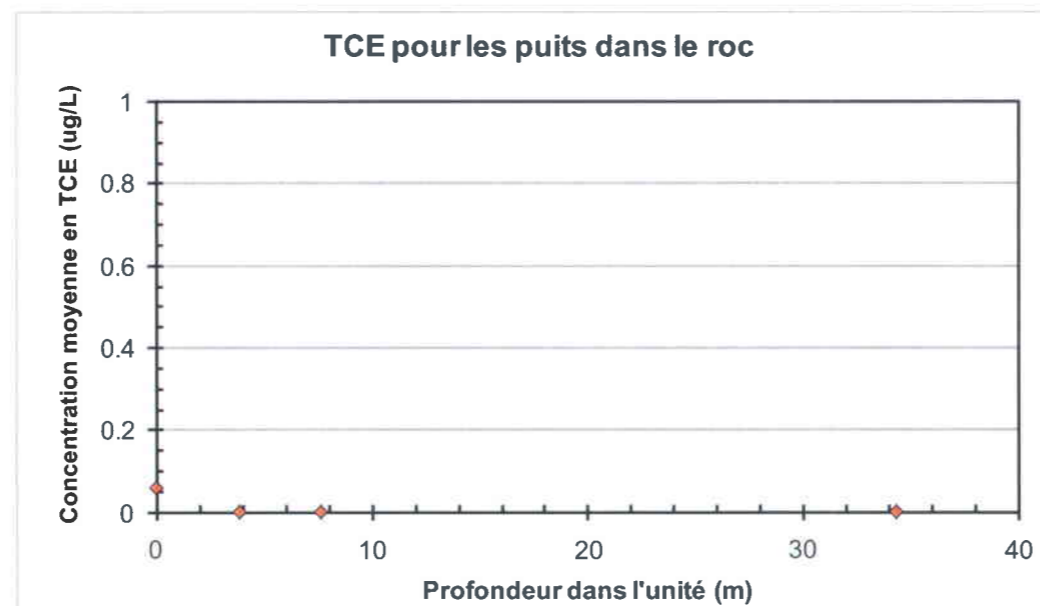
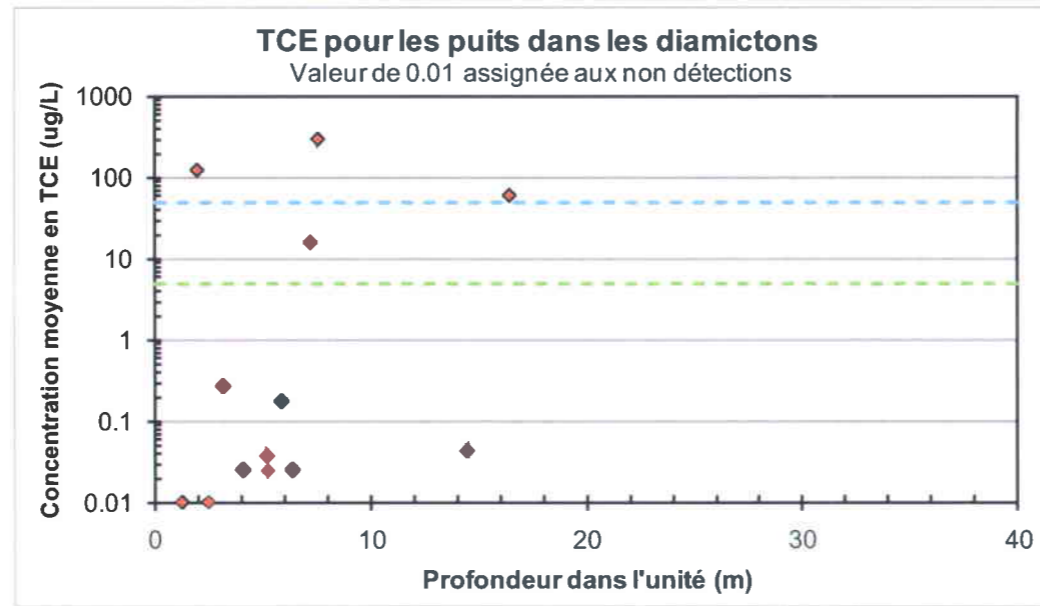
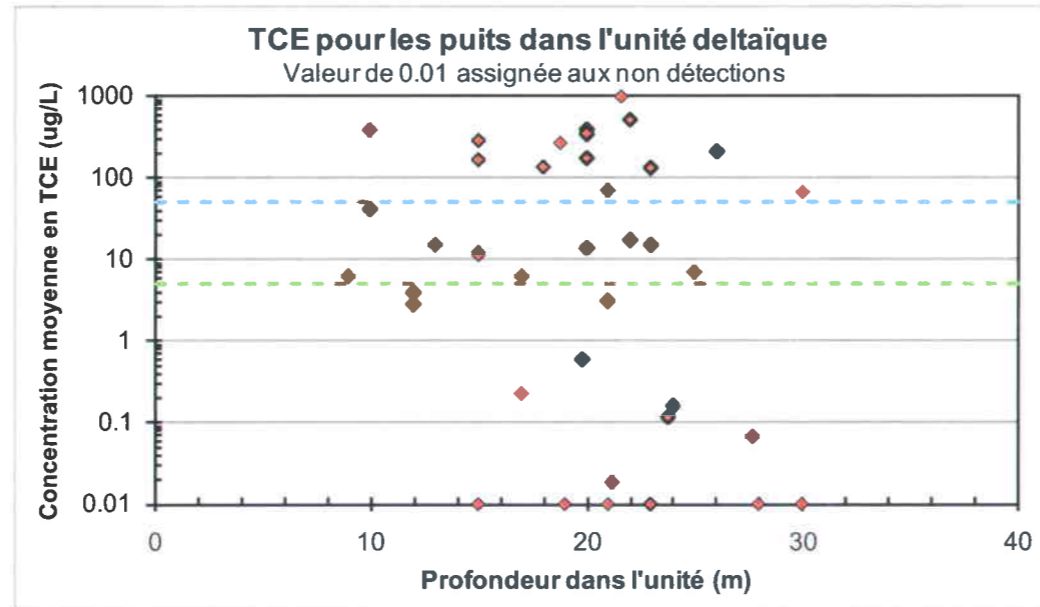
**Cartes 1 et 2:**

- Unité de captage du puits
- △ Puits dans l'unité deltaïque
  - Puits dans les diamictons
  - Puits dans le roc

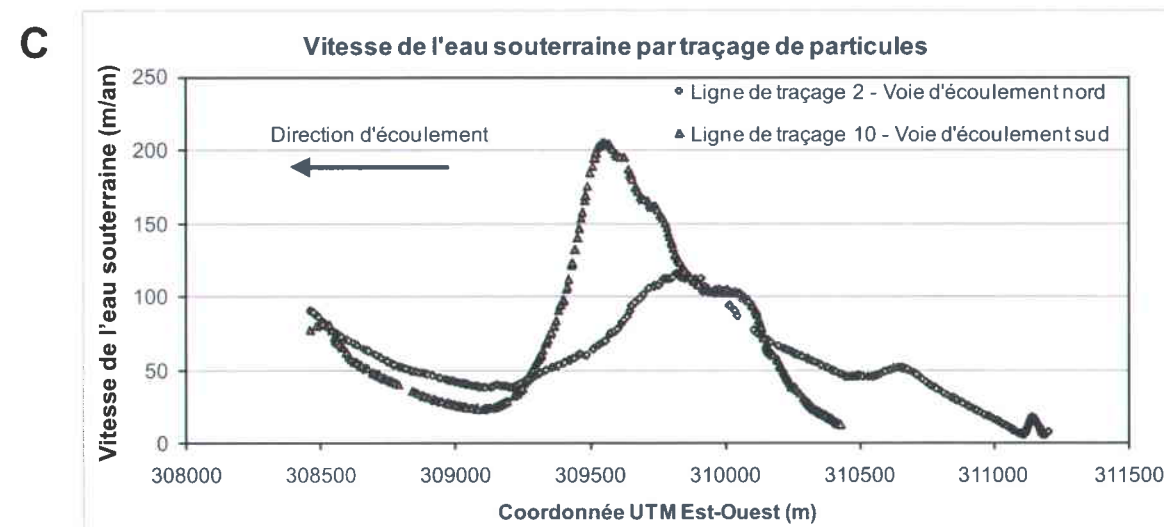
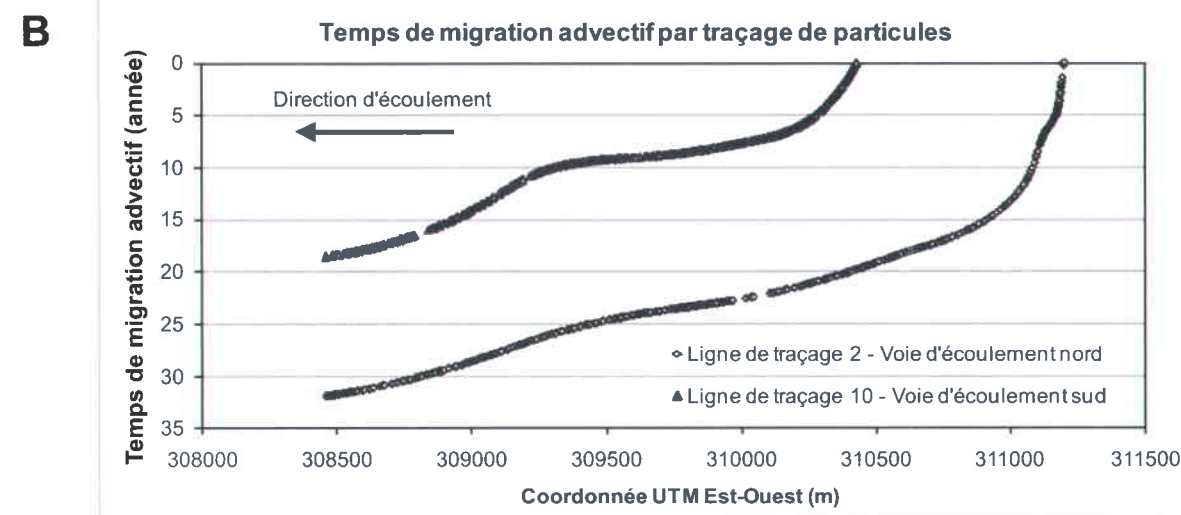
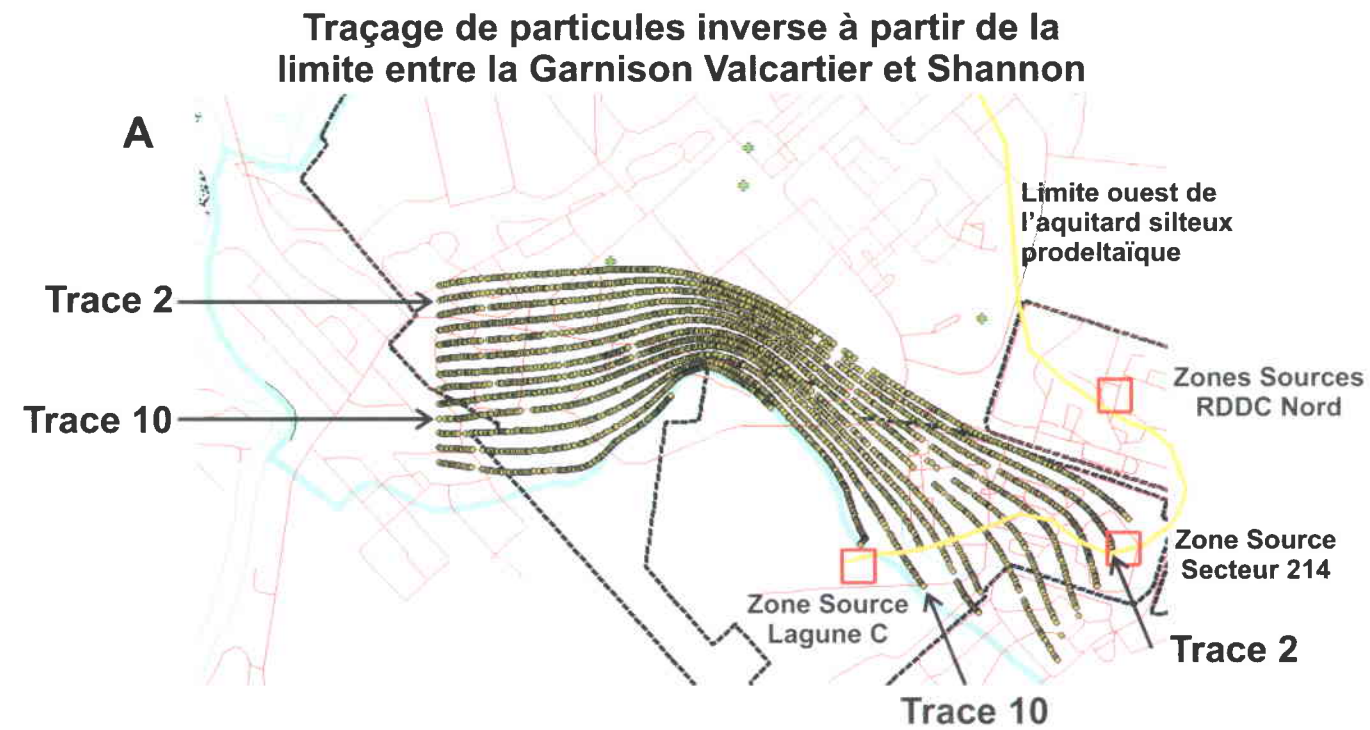
Classes de concentrations TCE (µg/L)

- [TCE]>590
- 50<[TCE]<590
- 5<[TCE]<50
- limite de détection<[TCE]<5
- non détecté (n.d.)
- Étendue du panache de TCE (Planche 2.3)
- Limite de propriété
- Routes

**Planche 3.4**  
Profondeurs des puits  
résidentiels à Shannon dans  
leurs unités de captage

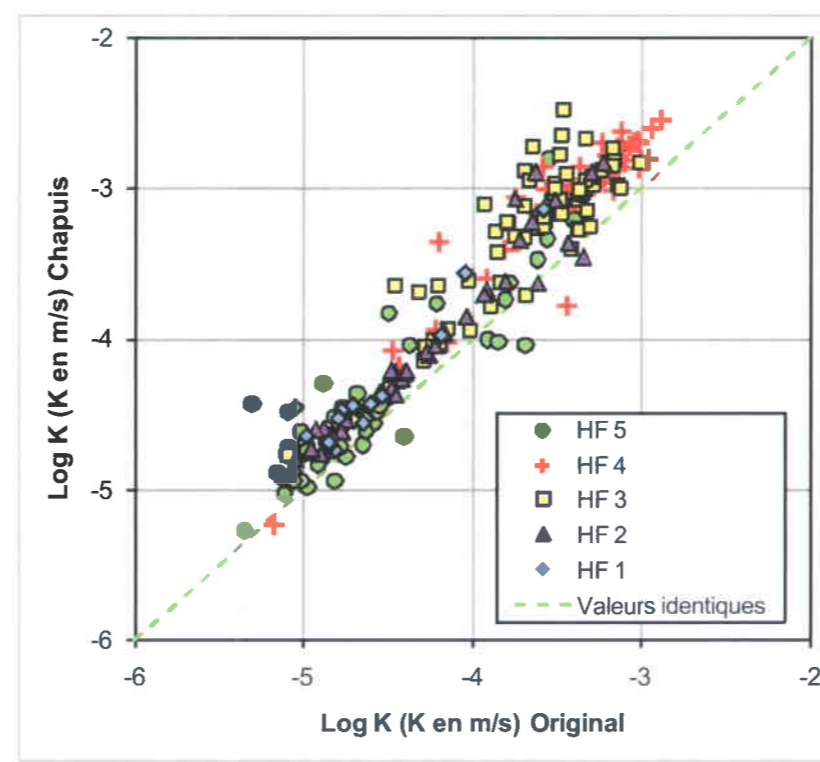
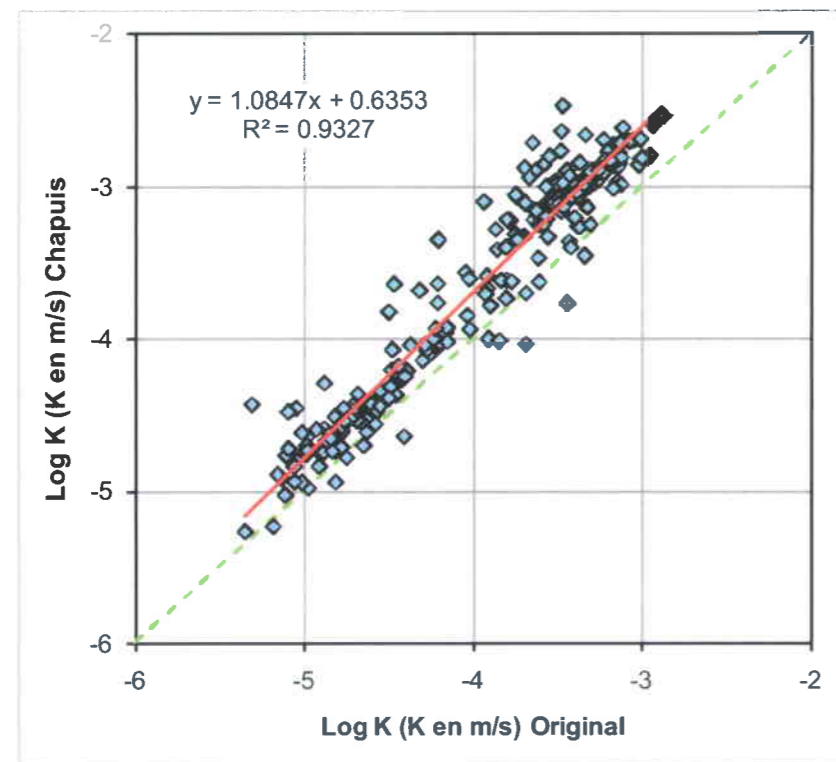


Note: puits situés dans le panache principal pour lesquels la profondeur du puits est disponible

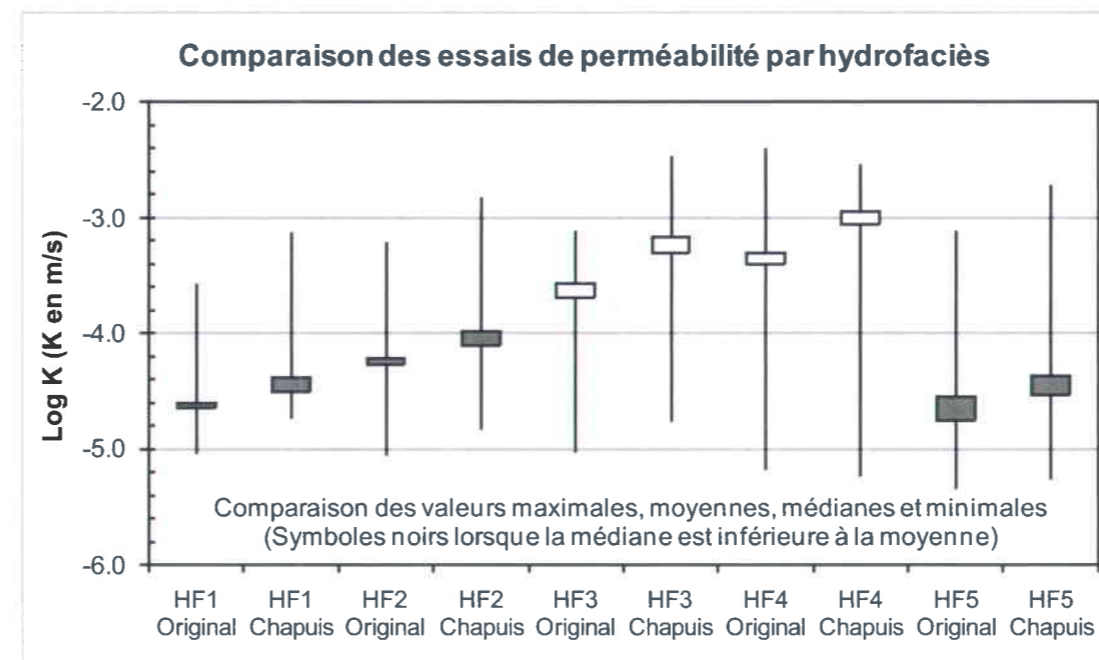
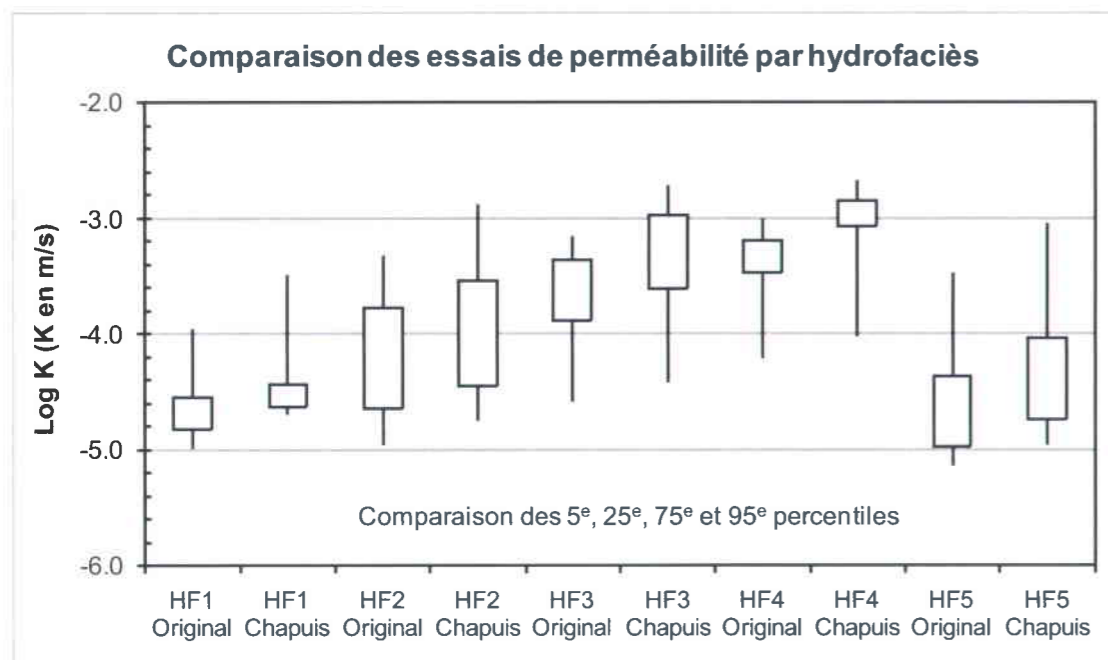


**Planche 3.5**  
Temps de migration  
du TCE

<sup>A</sup>les codes entre crochets renvoient aux unités de la carte de la géologie des formations superficielles. Les codes [Ma] et [Md-p] renvoient à des unités qui n'affleurent pas dans le secteur d'étude et ceux-ci sont par conséquent absents de la Planche 1.1.

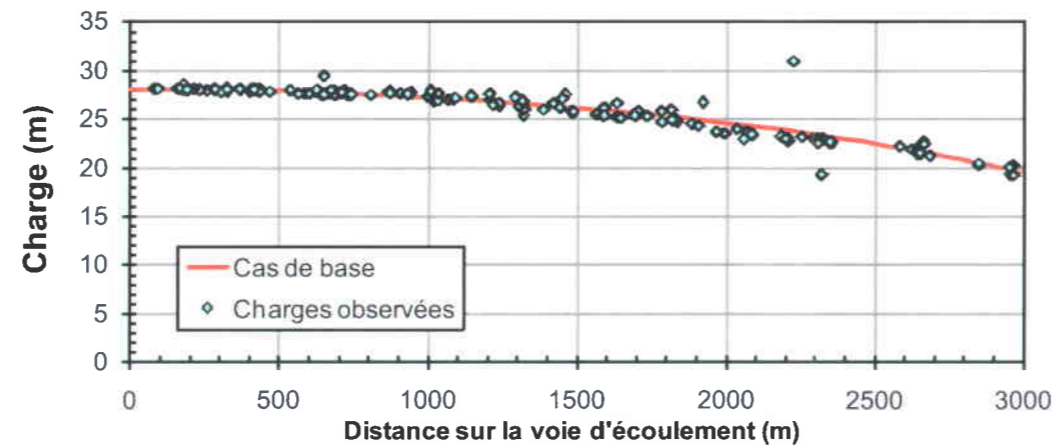


**Planche 4.1**  
Comparaison des  
interprétations des  
essais de perméabilité



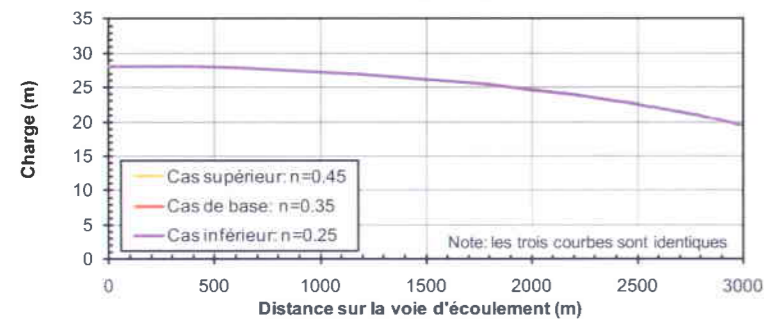
**Planche 4.2**  
Sensibilité des  
paramètres hydrauliques  
pour les nappes libres

Calage des paramètres du cas de base



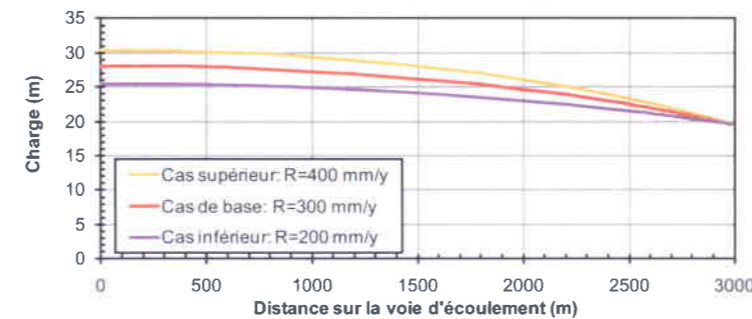
**Sensibilité à la porosité**

Sensibilité : Charge vs porosité



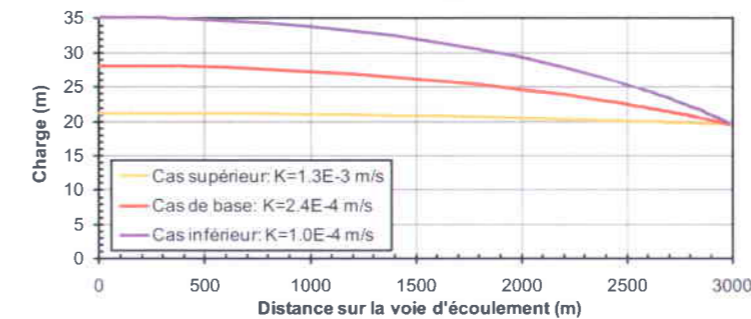
**Sensibilité à la recharge**

Sensibilité : Charge vs recharge

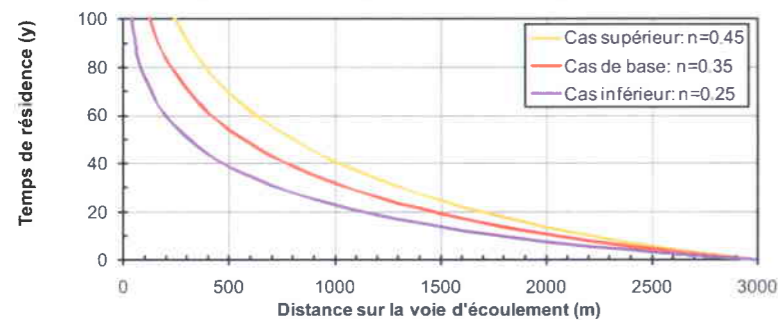


**Sensibilité à la conductivité hydraulique (K)**

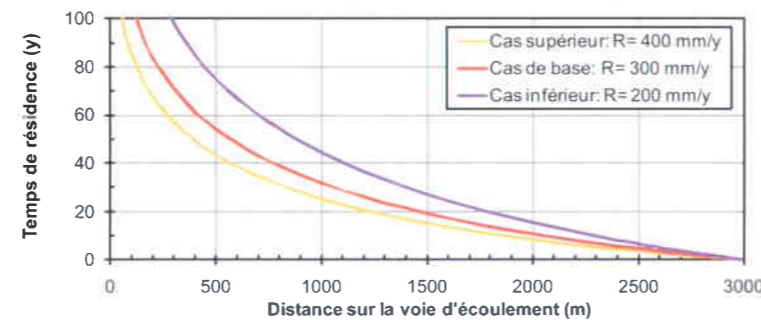
Sensibilité : Charge vs K



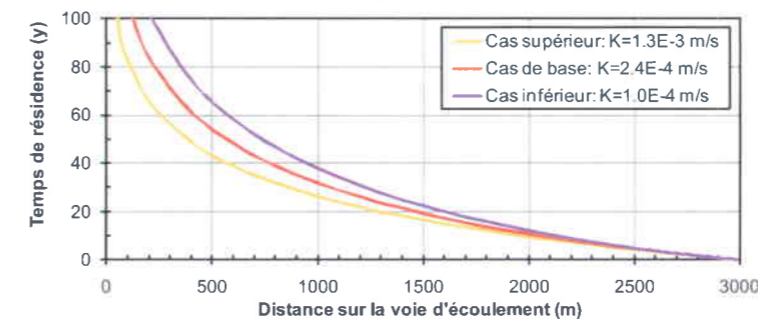
Sensibilité : Temps de résidence vs porosité



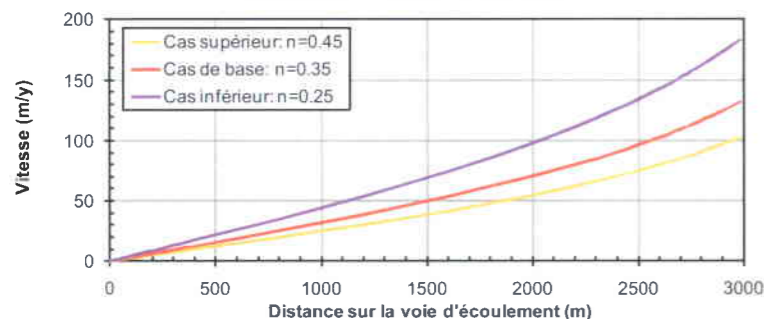
Sensibilité : Temps de résidence vs recharge



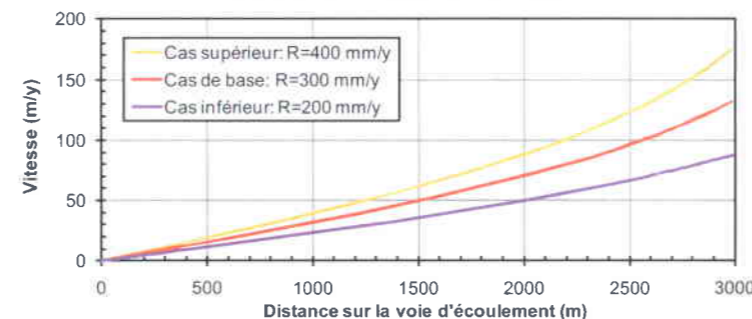
Sensibilité : Temps de résidence vs K



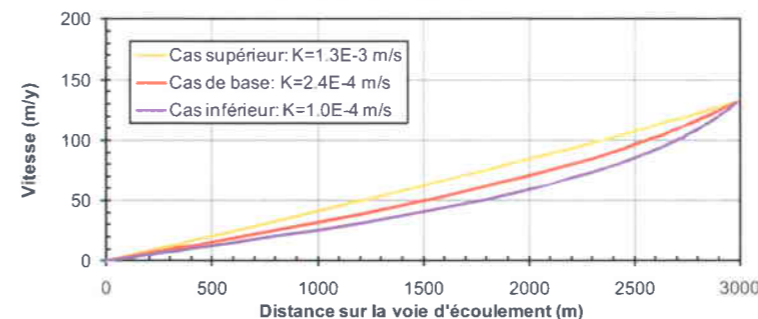
Sensibilité : Vitesse vs porosité



Sensibilité : Vitesse vs recharge



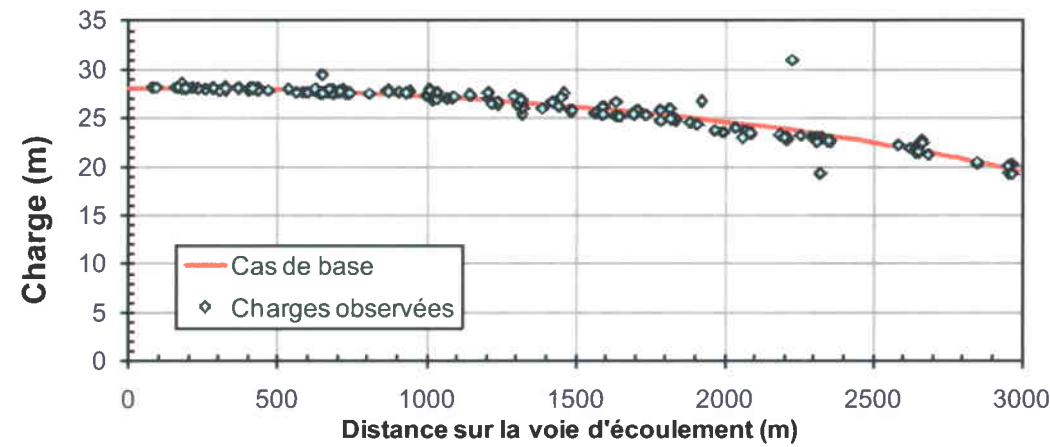
Sensibilité : Vitesse vs K



Note: La porosité, la recharge et la conductivité hydraulique ( $K$ ) ont été variées à l'intérieur de la plage possible de ces paramètres pour évaluer la sensibilité des résultats (charge hydraulique, temps de résidence et vitesse de l'eau souterraine) de la solution analytique de Chesnaux et al. (2005) représentant l'écoulement dans les nappes libres.

**Planche 4.3**  
Précision des  
résultats pour les  
nappes libres

Calage des paramètres du cas de base

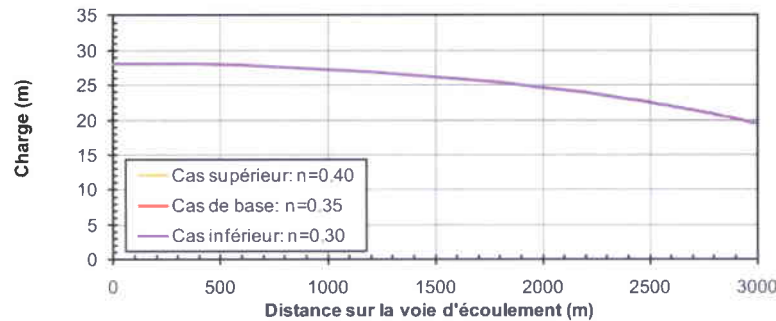


Précision vs porosité

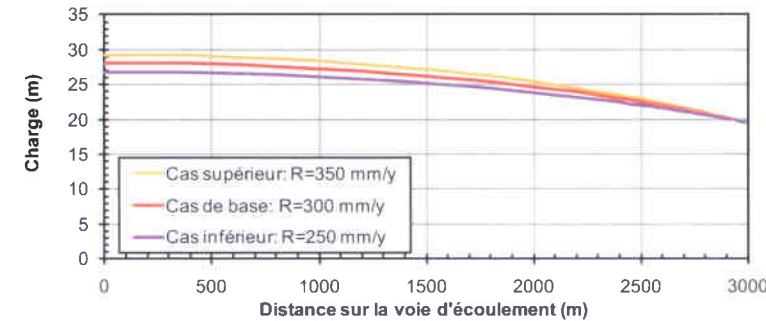
Précision vs recharge

Précision vs porosité  
et recharge

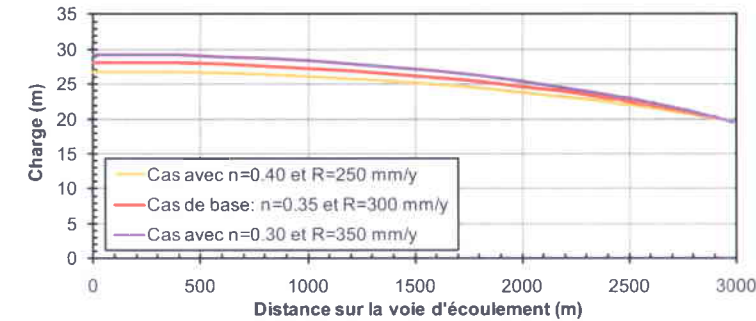
Précision : Charge vs porosité



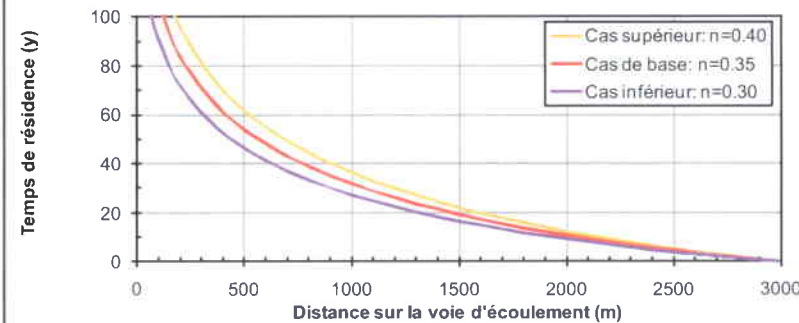
Précision : Charge vs recharge



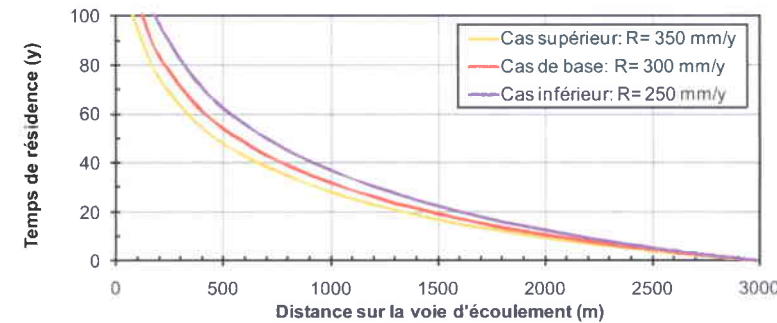
Précision : Charge vs porosité & recharge



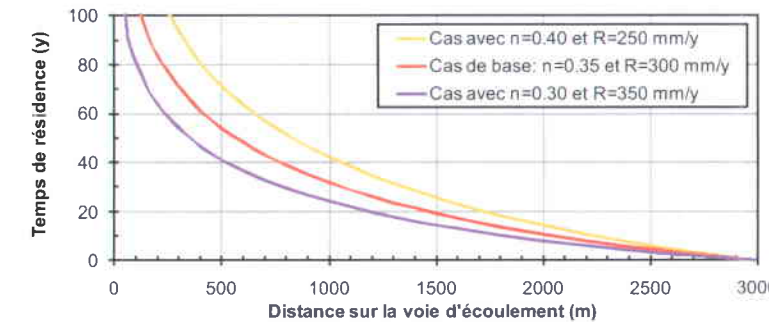
Précision : Temps de résidence vs porosité



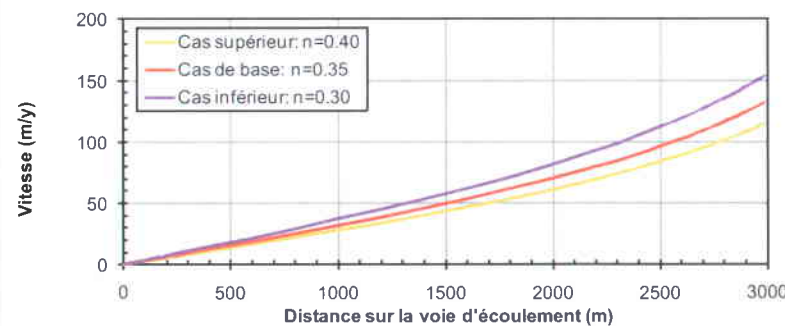
Précision : Temps de résidence vs recharge



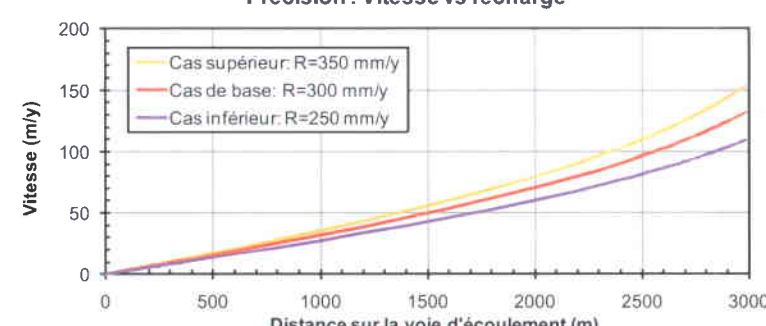
Précision : Temps de résidence vs porosité & recharge



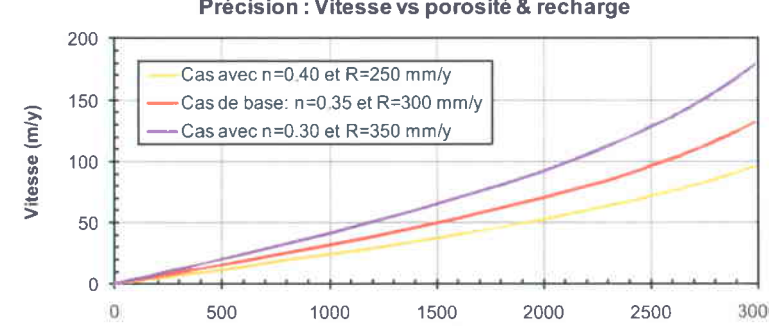
Précision : Vitesse vs porosité



Précision : Vitesse vs recharge



Précision : Vitesse vs porosité & recharge



Note: La porosité et la recharge ont été variées indépendamment et ensemble à l'intérieur de la plage plausible de ces paramètres pour évaluer la précision des résultats (charge hydraulique, temps de résidence et vitesse de l'eau souterraine) de la solution analytique de Chesnaux et al. (2005) représentant l'écoulement dans les nappes libres.