



Université du Québec

Institut national de la recherche scientifique

Eau, Terre et Environnement

**Caractérisation et modélisation numérique
de la contamination en TCE dans l'eau souterraine
du secteur Valcartier, Québec, Canada**

Par

Alexandre Boutin

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

Janvier 2004

© droits réservés de Alexandre Boutin 2004



RÉSUMÉ

L'étude a pour objectif général de comprendre un système aquifère granulaire complexe contaminé par des composés organiques volatils à l'aide de données de caractérisation et de travaux de modélisation numérique. Le site à l'étude est dans le secteur de Valcartier situé à environ 35 kilomètres au nord de la ville de Québec. En 1997, du trichloroéthène (TCE) a été découvert dans le système d'approvisionnement en eau potable de la base militaire de Valcartier. Des caractérisations ont suivi pour définir le contexte géologique et hydrostratigraphique. En décembre 2000, du TCE a été trouvé dans des puits privés de la municipalité voisine, Shannon. Une caractérisation de grande envergure du secteur a ensuite été entreprise afin de définir précisément le contexte hydrogéologique et la contamination de l'eau souterraine par le TCE.

Le contexte géologique du secteur est caractérisé par la présence de deux vallées enfouies dans lesquelles des sédiments proglaciaires, deltaïques, prodeltaïques et fluviaux sont présents. L'unité aquifère principale est le sable et gravier deltaïque d'une épaisseur totale atteignant jusqu'à 45 m. À l'est du secteur, cette unité est séparée par une unité silteuse prodeltaïque qui amène des conditions de nappe semi-captive sous le silt. Des conditions de nappe libre et semi-captive sont donc présentes au site et l'écoulement de l'eau souterraine est du nord et du sud vers le centre des vallées enfouies. Une ligne de partage des eaux est présente à l'est du secteur qui sépare l'écoulement dans la vallée vers Val-Bélair à l'est et vers Shannon à l'ouest.

Un panache de TCE dissous est présent dans l'eau souterraine du secteur. Un contexte de sources multiples a mené à la formation de ce panache qui est majeur, complexe et hétérogène. Les concentrations maximales mesurées dans le panache sont d'environ 1400 µg/L à 4500 µg/L à proximité des sources potentielles. Le panache a une superficie d'environ 2 800 000 m² et possède une largeur d'environ 600 m à son extrémité ouest.

La représentation quantitative de l'écoulement et de la migration de TCE a été réalisée à l'aide du simulateur numérique FRAC3DVS. Un maillage composé de plus d'un million d'éléments finis en 3D a été construit afin de représenter le contexte hydrostratigraphique du secteur. Le modèle comporte 19 zones de conductivité hydraulique et a été calé en ajustant les conductivités

hydrauliques et la recharge. Le traçage de particules a permis d'étudier la contribution et la migration de TCE à partir de différentes sources ainsi que de définir des aires d'alimentation pour les puits de production d'eau potable. Enfin, des simulations simplifiées du transport de masse ont permis de reproduire correctement la morphologie du panache régional de TCE et de quantifier le temps de migration à partir des différentes sources potentielles identifiées.



Alexandre Boutin, étudiant



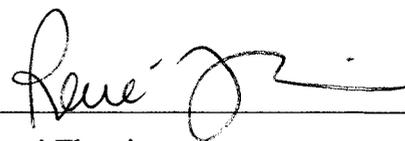
Richard Martel

Co-directeur de recherche



René Lefebvre

Directeur de recherche



René Therrien

Examineur interne

SUMMARY

This study aims to understand a complex granular aquifer system contaminated by volatile organic compounds (VOCs) using environmental characterization data and numerical modeling. The study site is located in the Valcartier region about 35 kilometres north of Québec City. In 1997, trichloroethene (TCE) was discovered in the drinking water supply system of the Valcartier Military Base. Many characterization phases followed to define the geological and hydrostratigraphic context. In December 2000, TCE was found in private wells in the neighbouring municipality of Shannon. An important characterization campaign was initiated to define more precisely the hydrogeological context and the groundwater TCE contamination in the sector.

The geology in the sector is characterized by the presence of two buried valleys in which fluvio-glacial, deltaic and prodeltaic, fluvial sediments are found. The main aquifer unit is deltaic sand and gravel with a maximum thickness of 45 m. In the eastern part of the site, a semi-confining silt unit splits the deltaic sands into two separate aquifers with unconfined conditions above the silt unit and semi-confined conditions beneath the silt. There are unconfined and semi-confined conditions at the site and groundwater flow is from north and south toward the center of the buried valley. A groundwater divide at the eastern part of the site diverts the groundwater flow toward Val-Bélair to the east and toward Shannon to the west.

At the Valcartier site, multiple sources have produced a complex and heterogeneous TCE dissolved groundwater plume. The maximum TCE concentrations measured in the plume are about 1400 µg/L to 4500 µg/L next to potential sources. The plume has an area of about 2 800 000 m² and a width of about 600 m at its western end.

To quantitatively represent groundwater flow and TCE migration, a numerical modelling study was conducted using the FRAC3DVS numerical code. A 3D mesh composed of more than one million elements was generated to accurately represent the hydrostratigraphic system. The model was composed of 19 hydraulic conductivity zones and was calibrated by adjusting the hydraulic conductivities and groundwater recharge. Particle tracking allowed the study of source zone

contributions and plume migration and also allowed the delineation of contributing areas of drinking water wells in the sector. Finally, simplified mass transport simulations reproduced correctly the morphology of the regional groundwater TCE plume and allowed quantification of migration time from the potential source zones.

REMERCIEMENTS

Tout au long de ce projet de maîtrise, de nombreuses personnes ont contribué à l'avancement de mes travaux par leur conseils, encouragements et connaissances. Mon directeur de recherche, René Lefebvre a su tout au fil des jours m'encadrer avec compétence et intérêt. Ses grandes connaissances dans le domaine de l'hydrogéologie ainsi son esprit créatif et curieux ont contribué de façon majeure à l'évolution et à la bonne marche des activités de recherche. Richard Martel, codirecteur de recherche, a aussi participé aux travaux par son expérience et sa compétence au niveau de l'étude de sites contaminés complexes. Il s'est beaucoup impliqué lors de la réalisation des travaux de terrains au début du projet. René Therrien, professeur à l'Université Laval, a aussi largement contribué au projet en fournissant le code FRAC3DVS pour la modélisation de l'écoulement et du transport et donnant de nombreux conseils lors des travaux de modélisation. Je tiens aussi à remercier tous les stagiaires de toute provenance confondue (Université Laval, École Polytechnique de Montréal, Université d'Orléans), qui par leur collaboration, idées et intérêts ont su permettre l'avancement rapide de la présente recherche. Enfin je tiens à remercier sincèrement ma famille et mes amis pour leur support et leur présence. Plus particulièrement, merci à Isabelle avec qui je partage ma vie qui sait me faire confiance, m'appuyer et me supporter.



TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|------------|
| RÉSUMÉ..... | I |
| SUMMARY..... | III |
| REMERCIEMENTS..... | V |
| | |
| 1. INTRODUCTION ET MISE EN CONTEXTE | 1 |
| 1.1 PROBLÉMATIQUE..... | 2 |
| 1.2 OBJECTIFS DU MÉMOIRE..... | 4 |
| 1.3 TRAVAUX ANTÉRIEURS | 5 |
| 1.4 MÉTHODOLOGIE..... | 7 |
| 1.5 CONTRIBUTIONS | 9 |
| 1.6 INTÉGRATION DES DONNÉES..... | 10 |
| | |
| 2. LOCALISATION ET CONTEXTE HYDROSTRATIGRAPHIQUE | 13 |
| 2.1 LOCALISATION..... | 13 |
| 2.2 CONTEXTE HYDROSTRATIGRAPHIQUE | 13 |
| 2.2.1 PROFONDEUR AU ROC | 15 |
| 2.2.2 RELATION ENTRE LES UNITÉS HYDROSTRATIGRAPHIQUES | 16 |
| | |
| 3. CARACTÉRISATION HYDROGÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOCHIMIQUE..... | 18 |
| 3.1 DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES | 18 |
| 3.1.1 MÉTHODOLOGIE..... | 18 |
| 3.1.2 MÉTHODES D'ANALYSES UTILISÉES..... | 19 |
| 3.1.2.1 Méthode de Uffink (1984) | 20 |
| 3.1.2.2 Méthode de Bouwer et Rice (1976)..... | 22 |
| 3.1.2.3 Méthode de Butler et Garnett (2000) | 24 |
| 3.1.3 STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES..... | 26 |
| 3.2 ÉTUDE DE LA PIÉZOMÉTRIE DES AQUIFÈRES DU SECTEUR VALCARTIER..... | 27 |
| 3.2.1 MÉTHODOLOGIE..... | 27 |
| 3.2.2 PIÉZOMÉTRIE ET ÉCOULEMENT DE LA NAPPE LIBRE | 29 |
| 3.2.3 PIÉZOMÉTRIE ET ÉCOULEMENT DE LA NAPPE SEMI-CAPTIVE..... | 32 |
| 3.3 DISTRIBUTION DU TRICHLOROÉTHÈNE DANS LE SECTEUR DE VALCARTIER..... | 34 |
| 3.3.1 MÉTHODOLOGIE..... | 34 |
| 3.3.2 CARTE DE CONTAMINATION EN TCE DANS L'AQUIFÈRE..... | 37 |
| 3.3.3 ZONES SOURCES POTENTIELLES IDENTIFIÉES DANS LE SECTEUR DE VALCARTIER..... | 39 |
| 3.3.4 ESTIMATION DU VOLUME DE TRICHLOROÉTHÈNE PRÉSENT DANS L'AQUIFÈRE DE VALCARTIER ... | 40 |

| | |
|--|-----------|
| 4. MODÉLISATION NUMÉRIQUE DE L'ÉCOULEMENT ET DU TRANSPORT | 42 |
| 4.1 MÉTHODOLOGIE..... | 42 |
| 4.2 MODÈLE CONCEPTUEL..... | 45 |
| 4.2.1 APPROCHE DÉTAILLÉE POUR LE MODÈLE DE VALCARTIER | 46 |
| 4.3 DOMAINE DE MODÉLISATION..... | 48 |
| 4.3.1 MAILLAGE EN DEUX DIMENSIONS..... | 48 |
| 4.3.2 MAILLAGE EN TROIS DIMENSIONS | 49 |
| 4.3.2.1 Définition des unités hydrostratigraphiques | 49 |
| 4.3.2.2 Définition du maillage 3D à partir de chacune des couches | 51 |
| 4.4 DESCRIPTION DES CONDITIONS AUX LIMITES..... | 53 |
| 4.4.1 CONDITIONS AUX LIMITES POUR LE MODÈLE D'ÉCOULEMENT | 53 |
| 4.4.2 CONDITIONS AUX LIMITES POUR LE TRANSPORT | 54 |
| 4.5 SIMULATEUR NUMÉRIQUE FRAC3DVS | 55 |
| 4.5.1 ÉQUATIONS REPRÉSENTANT L'ÉCOULEMENT À SATURATIONS VARIABLES DE L'EAU SOUTERRAINE EN TROIS DIMENSIONS | 55 |
| 4.5.2 ÉQUATIONS REPRÉSENTANT LE TRANSPORT DE SOLUTÉ EN TROIS DIMENSIONS | 57 |
| 4.5.3 RÉOLUTION NUMÉRIQUE DE L'ÉQUATION DE L'ÉCOULEMENT À SATURATIONS VARIABLES..... | 58 |
| 4.5.4 RÉOLUTION NUMÉRIQUE DE L'ÉQUATION DU TRANSPORT DE SOLUTÉ DANS UN MILIEU POREUX À SATURATIONS VARIABLES | 61 |
| 4.6 CRITÈRES DE CONVERGENCE SPÉCIFIÉS POUR LE MODÈLE DE VALCARTIER..... | 62 |
| 4.6.1 SIMULATIONS DE L'ÉCOULEMENT..... | 62 |
| 4.6.2 SIMULATIONS DU TRANSPORT DE MASSE..... | 63 |
| 4.7 AUTRES OUTILS INFORMATIQUES UTILISÉS..... | 63 |
| 4.7.1 INTERFACE GRAPHIQUE <i>GROUNDWATER MODELING SYSTEM</i> | 63 |
| 4.7.2 LOGICIEL DE VISUALISATION <i>TEC PLOT</i> | 63 |
| 4.8 CALAGE DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT | 64 |
| 4.8.1 CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES..... | 65 |
| 4.8.2 RECHARGE | 67 |
| 4.8.3 PROPRIÉTÉS CAPILLAIRES DE MATÉRIAUX..... | 67 |
| 4.8.4 POINT SINGULIER D'ÉCOULEMENT DE L'EAU SOUTERRAINE | 68 |
| 4.8.5 BILAN VOLUMÉTRIQUE DU MODÈLE CALÉ ET TEMPS DE SIMULATION..... | 69 |
| 4.9 ÉTUDE DE SENSIBILITÉ DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT | 70 |
| 4.9.1 SENSIBILITÉ AUX CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES ET À LA RECHARGE | 70 |
| 4.9.2 SENSIBILITÉ AU CHANGEMENT DES CONDITIONS AUX LIMITES | 71 |
| 4.10 SIMULATION DU TRANSPORT DE MASSE..... | 72 |
| 4.10.1 APPROCHE ET SIMPLIFICATIONS..... | 72 |
| 4.10.2 DISCRÉTISATION DU TEMPS (<i>TIMESTEP</i>)..... | 73 |
| 4.10.3 BILAN DE MASSE | 75 |
| 5. RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE ET DISCUSSION..... | 77 |
| 5.1 RÉSULTATS DES SIMULATIONS DE L'ÉCOULEMENT DE L'EAU SOUTERRAINE..... | 77 |
| 5.1.1 ÉCOULEMENT DE L'EAU SOUTERRAINE | 77 |
| 5.1.2 AIRES D'ALIMENTATION DES PUIITS DE CAPTAGE DE L'EAU SOUTERRAINE..... | 79 |
| 5.1.3 MIGRATION DU TCE À PARTIR DES ZONES SOURCES PAR TRAÇAGE DE PARTICULES..... | 80 |
| 5.2 RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION SIMPLIFIÉE DU TRANSPORT DE MASSE..... | 81 |
| 5.3 DISCUSSION SUR LES TRAVAUX DE MODÉLISATION NUMÉRIQUE..... | 84 |

6. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....88

BIBLIOGRAPHIE.....95

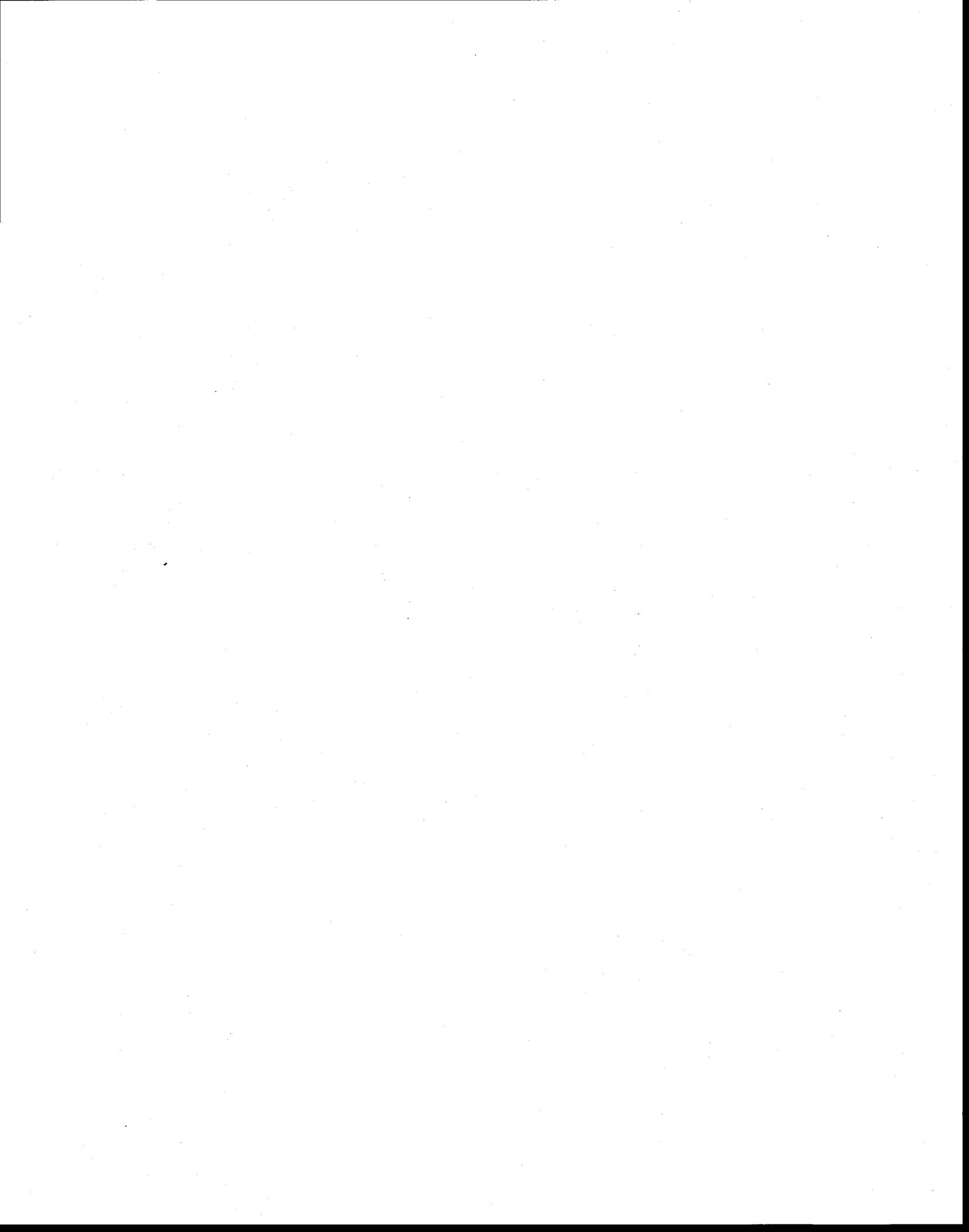
TABLEAUX.....101

FIGURES.....118



LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|---------------|---|-------|
| Tableau 1.1 : | Travaux de terrain par secteur réalisés avant août 2001 | p.102 |
| Tableau 1.2 : | Sources des données utiles à la compréhension de la problématique | p.103 |
| Tableau 1.3 : | Évolution de l'information disponible dans le secteur Valcartier (chimique, stratigraphique et hydrogéologique) | p.104 |
| Tableau 2.1 : | Données de profondeur au roc disponibles | p.105 |
| Tableau 2.2 : | Unités hydrostratigraphiques présentes dans le secteur Valcartier | p.107 |
| Tableau 3.1 : | Statistiques descriptives des résultats des essais de perméabilité | p.108 |
| Tableau 3.2 : | Estimation du volume d'eau contaminée et de la masse de TCE dissous dans le panache du secteur Valcartier en 2001 | p.109 |
| Tableau 4.1 : | Sommaire des principales caractéristiques du modèle d'écoulement | p.110 |
| Tableau 4.2 : | Sommaire des paramètres et des conditions aux limites du modèle calé | p.111 |
| Tableau 4.3 : | Bilan volumétrique du modèle d'écoulement calé | p.113 |
| Tableau 4.4 : | Sommaire des paramètres et conditions aux limites modifiées lors de l'étude de sensibilité du modèle | p.114 |
| Tableau 4.5 : | Tableau décrivant les conditions aux limites et leur effet au niveau de l'écoulement de l'eau souterraine dans le modèle numérique | p.115 |
| Tableau 4.6 : | Positions et caractéristiques des sources imposées dans le modèle de transport | p.116 |
| Tableau 4.7 : | Bilan volumétrique et caractéristiques numériques des simulations de transport | p.117 |



LISTE DES FIGURES

Toutes les planches sont présentées à la fin du mémoire

Planche 1 : Localisation et physiographie du secteur Valcartier

Figure 2.1 : Localisation de la région à l'étude comprenant la physiographie et les puits d'observation

Planche 2 : Contexte géologique du secteur Valcartier

Figure 2.2 : Colonne stratigraphique du secteur Valcartier

Figure 2.3 : Topographie du socle rocheux et position des sections géologiques

Figure 2.4 : Coupes hydrostratigraphiques Nord-Sud et Est-Ouest

Planche 3 : Modèle géologique en trois dimensions du secteur Valcartier

Figure 2.5 : Modèle géologique 3D vu à partir du sud vers le nord

Figure 2.6 : Localisation des coupes géologiques

Figure 2.7 : Coupes dans le modèle géologique 3D vues à partir du sud-est vers le nord-ouest

Figure 2.8 : Zoom sur le modèle géologique 3D vu à partir du sud-ouest vers le nord-est

Planche 4 : Propriétés hydrauliques des matériaux

Figure 3.1 : Types de réponses obtenues avec les essais de perméabilité

a) oscillatoire, b) linéaire et c) semi-oscillatoire

Figure 3.2 : Distribution des résultats d'essais de perméabilité pour les unités deltaïque, proglaciaire et prodeltaïque (conductivité hydraulique k)

Figure 3.3 : Tendances régionale de la conductivité hydraulique dans le sable deltaïque : tendance planaire

Figure 3.4 Tendances régionale de la conductivité hydraulique dans le sable deltaïque : distribution par krigeage

Planche 5 : Piézométrie de la nappe libre dans le secteur Valcartier

Figure 3.5 : Piézométrie de la nappe libre dans le secteur Valcartier

Planche 6 : Piézométrie de la nappe semi-captive dans le secteur Valcartier

Figure 3.6 : Piézométrie de la nappe semi-captive dans le secteur Valcartier

Planche 7 : Carte de contamination en TCE de l'eau souterraine dans le secteur Valcartier

Figure 3.7 : Carte de contamination en TCE de l'eau souterraine dans le secteur Valcartier

Planche 8 : Agrandissement de la carte de contamination en TCE de l'eau souterraine dans le secteur Valcartier

Figure 3.8 : Agrandissement de la carte de contamination en TCE de l'eau souterraine dans le secteur Valcartier

Planche 9 : Carte des zones sources présumées de la contamination en TCE de l'eau souterraine dans le secteur Valcartier

Figure 3.9 : Zones sources présumées de la contamination en TCE de l'eau souterraine

Planche 10 : Caractéristiques du modèle d'écoulement de l'eau souterraine dans le secteur de Valcartier

Figure 4.1 : Maillage et conditions aux limites du modèle d'écoulement

Figure 4.2 : Maillage vu en trois dimensions et coupe géologique Est-Ouest montrant la discrétisation verticale du modèle d'écoulement

Figure 4.3 : Zones de conductivités hydrauliques vues en plan pour l'unité deltaïque au-dessus de la couche silteuse prodeltaïque

Figure 4.4 : Zones de conductivités hydrauliques vues en plan pour l'unité deltaïque sous la couche silteuse prodeltaïque

Planche 11 : Calage et étude de sensibilité du modèle d'écoulement du secteur Valcartier

Figure 4.5 : Comparaison des charges simulées et mesurées pour le modèle d'écoulement calé

Figure 4.6 : Effets de la modification de la recharge et de la conductivité hydraulique sur le modèle d'écoulement calé

Figure 4.7 : Effets de la modification des conditions aux limites sur le modèle d'écoulement calé

Figure 4.8 : Carte de l'erreur de la simulation avec le modèle calé

Planche 12 : Piézométrie simulée et mesurée et vitesses d'écoulement de l'eau souterraine du secteur Valcartier

Figure 5.1 : Comparaison entre la piézométrie simulée et mesurée pour la nappe libre

Figure 5.2 : Vue 3D de la piézométrie simulée

Figure 5.3 : Vitesses d'écoulement de l'eau souterraine dans l'unité proglaciaire

Figure 5.4 : Vitesses d'écoulement de l'eau souterraine dans l'unité deltaïque sous la couche silteuse prodeltaïque

Planche 13 : Détail des conditions d'écoulement simulées avec le modèle d'écoulement

Figure 5.5 : Position des coupes sur la piézométrie simulée de la surface libre avec les vecteurs d'écoulement de longueur uniforme

Figure 5.6 : Coupes montrant les charges hydrauliques simulées

Figure 5.7 : Coupes montrant la saturation en eau simulée

Figure 5.8 : Vue 3D des charges hydrauliques simulées

Planche 14 : Aires d'alimentation des puits d'approvisionnement de la Garnison Valcartier déterminées par traçage de particules

Figure 5.9 : Aires d'alimentation des puits sans l'effet du pompage de P-7

Figure 5.10 : Aires d'alimentation des puits avec l'effet du pompage de P-7

Planche 15 : Patrons de migration simulés de TCE dans l'unité deltaïque à partir des zones sources

Figure 5.11 : Patrons de migration du TCE à partir des zones sources par traçage de particules

Planche 16 : Patrons de migration simulés du TCE par modélisation du transport de masse

Figure 5.12 : Panaches simulés du TCE par modélisation du transport après 10 ans

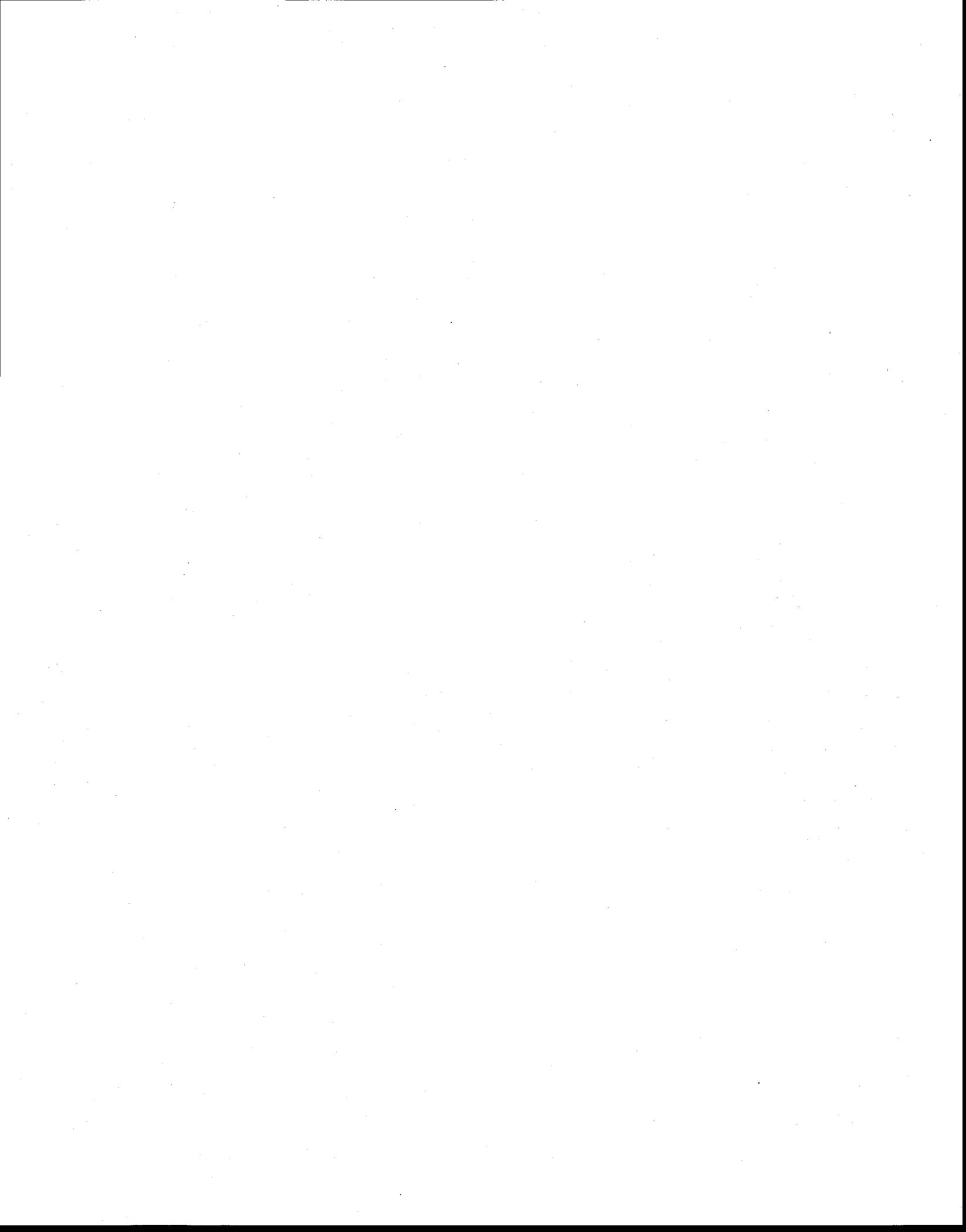
Figure 5.13 : Panaches simulés du TCE par modélisation du transport après 25 ans

Figure 5.14 : Panaches simulés du TCE par modélisation du transport après 60 ans

Figure 5.15 : Comparaison entre le panache simulé après 60 ans et le panache observé sur le terrain

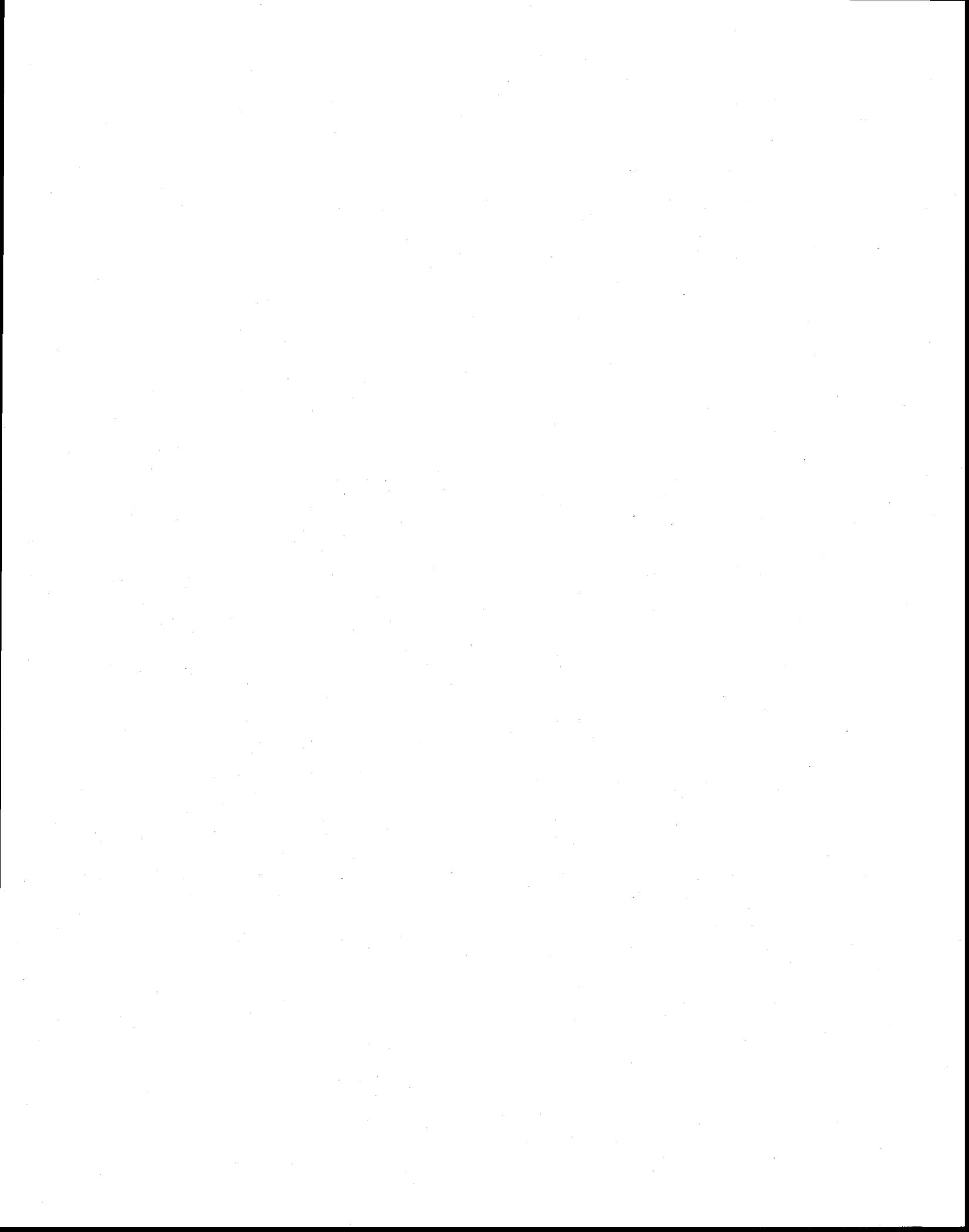
Planche 17 : Contribution des zones sources à la formation du panache de TCE simulé

Figure 5.16 : Contribution des zones sources de TCE intégrées dans le modèle après 60 ans de simulation



ANNEXES

Aucune annexe n'est incluse dans ce mémoire de maîtrise. Le Ministère de la Défense Nationale a préféré que les données utilisées pour les travaux documentés dans ce mémoire soient compilées uniquement dans un rapport d'expertise scientifique déposé par l'INRS-Eau, Terre et Environnement (rapport de recherche R-631, Lefebvre *et al.*, 2003). Les annexes de ce rapport contiennent toutes les données utiles à la réalisation de ce projet de recherche.



1. INTRODUCTION ET MISE EN CONTEXTE

Depuis la fin des années 1970, la société nord-américaine est de plus en plus sensibilisée aux problèmes environnementaux qui menacent le milieu naturel et la qualité de vie. Au cours des dernières années au Canada, des cas très médiatisés ont démontré les conséquences néfastes de la pollution des approvisionnements en eaux souterraines potables et ont éveillé encore plus l'opinion publique à ces questions, entre autre à Walkerton en Ontario et Ville Mercier au Québec. Ces problèmes ont révélés la vulnérabilité d'une ressource en eau qui était auparavant réputée pure et exempte de toute pollution, l'eau souterraine.

Puisque les activités industrielles passées utilisaient des produits chimiques polluants et persistants dans l'environnement sans pour autant procéder à un enfouissement ou à une disposition sécuritaire, de nombreux problèmes de contamination des sources d'eau potable ont pris naissance à cette époque. Aussi, dans certains contextes spécifiques, l'eau souterraine est très vulnérable à la pollution puisqu'elle se trouve à proximité de la surface du sol, où des activités de disposition non-sécuritaires des produits polluants menacent encore plus la pérennité de la ressource. Les technologies environnementales sont en développement rapide depuis les années 1970 toujours dans l'objectif d'identifier et de comprendre les problèmes. De nouvelles techniques d'échantillonnage, de forage et des méthodes plus poussées d'analyse chimique permettent d'atteindre une compréhension avancée des sites contaminés. Parallèlement aux techniques de terrain, des méthodes d'analyse quantitative des phénomènes chimiques et physiques contrôlant l'évolution d'un problème de contamination de l'eau souterraine ont été développées utilisant la modélisation numérique.

Pour faciliter la compréhension des phénomènes physiques et chimiques qui contrôlent l'écoulement de l'eau souterraine et le transport de contaminants, la modélisation numérique est aussi un outil très polyvalent qui permet de résoudre de nombreux problèmes. Depuis l'avènement des ordinateurs puissants, des problèmes de plus en plus complexes sont simulés à l'aide de modèles de plus en plus précis et détaillés. La première condition à la construction d'un modèle numérique valable tient en une bonne compréhension de la géologie et de l'hydrogéologie de l'aquifère à représenter. Des campagnes de terrain successives sont parfois

nécessaires au raffinement du modèle conceptuel d'un site. Par contre, une fois le niveau de compréhension du problème à simuler atteint et une fois qu'un modèle numérique représentatif est développé, les possibilités offertes par cet outil sont nombreuses et diverses. Il est possible de simuler le transport de contaminants et de déterminer le temps de transport à partir de différents secteurs. Un tel outil peut, entre autre, servir à la vérification de scénarios de gestion environnementale lors de la planification de travaux de restauration par exemple.

1.1 PROBLÉMATIQUE

Cette étude présente les étapes et résultats qui ont menés à la compréhension d'un cas complexe de contamination de l'eau souterraine dans un aquifère utilisé par des milliers de personnes comme source d'eau potable. Les sources potentielles de contamination sont reliées à des activités industrielles passées et à la disposition et à l'enfouissement de déchets industriels. Le problème de contamination a été mis à jour en 1997 lors de la découverte de composés organiques volatils dans le système d'alimentation en eau de la base militaire présente sur ce site. Des travaux de caractérisation environnementale et de modélisation numérique de l'écoulement et du transport de masse ont ensuite été entrepris afin de bien comprendre les différents phénomènes qui contrôlent la contamination.

Le site à l'étude se situe à environ 35 kilomètres au nord de la ville de Québec. La Garnison Valcartier et le centre de Recherche et Développement de Défense Canada (RDDC) Valcartier occupent le centre du site. À l'ouest, se situe la municipalité de Shannon tandis qu'à l'est, se retrouve l'arrondissement de Val-Bélair de la Ville de Québec. Une portion des terrains au sud du site est occupée par SNC Technologie Inc. (SNC TEC), une compagnie privée oeuvrant dans l'industrie de l'armement militaire.

Le principal contaminant organique dissous dans l'eau souterraine présent dans le secteur Valcartier est le trichloroéthène (TCE). En phase pure, le TCE est un liquide incolore, peu visqueux et ininflammable, ayant une odeur caractéristique, semblable à celle du chloroforme. Ce solvant chloré (C_2HCl_3), très volatil et moyennement soluble à la température ambiante, sert principalement au dégraissage et au nettoyage de pièces métalliques, usage étroitement lié aux

industries automobile et métallurgique. Il sert également pour le nettoyage à sec des vêtements (Martel *et al.*, 2000).

Le contexte hydrogéologique du secteur à l'étude est complexe puisque deux types d'aquifères sont présents, un aquifère libre régional et un aquifère semi-captif localisé à l'est. Au cours des années, les nombreuses phases de caractérisation environnementale ont permis de définir l'étendue de l'aquifère semi-captif ainsi que la piézométrie des deux aquifères. Des essais de perméabilité *in situ* dans les puits d'observation ont permis de caractériser les différentes zones de conductivités hydrauliques dans les matériaux granulaires. Des campagnes d'échantillonnages de l'eau souterraine dans les puits d'observation et à l'aide de sondages Geoprobe ont permis de définir l'étendue de la contamination de l'eau souterraine. Un panache de plus de 4 km de longueur et de 600 m de largeur a été identifié dans l'aquifère.

Les défis du présent projet de maîtrise sont multiples et font appel à plusieurs domaines d'étude de l'hydrogéologie classique et des contaminants. Pour comprendre la migration du TCE, l'étude de la distribution des matériaux géologiques et la définition des unités stratigraphiques sont très importantes. L'étude de la piézométrie des aquifères présents sur le site permet de connaître les directions et vitesses d'écoulement dans le secteur. Un travail de synthèse et d'analyse des données de forage et piézométriques ont permis de définir le contexte géologique et hydrogéologique. Les travaux de terrain ont permis de définir la variation des conductivités hydrauliques dans les matériaux sur le site. Pour définir l'étendue et les mécanismes de la migration du TCE dans le système aquifère, la compilation et l'analyse de la distribution des concentrations en TCE dans l'aquifère ont permis de délimiter le panache de TCE dissous en relation avec les zones sources. Toutes les informations ont été rassemblées dans un modèle numérique d'écoulement de l'eau souterraine et de transport de masse. Ce modèle permet de représenter précisément l'écoulement de l'eau souterraine. De plus, les simulations de transport de masse ont reproduit la morphologie du panache de TCE observée sur le terrain. Le modèle est utilisé pour comprendre le rôle des différentes zones sources et pour préciser l'historique de la contamination.

1.2 OBJECTIFS DU MÉMOIRE

Ce mémoire vise d'abord à présenter la compréhension du système aquifère au niveau hydrogéologique et hydrogéochimique, ainsi que les résultats de travaux de modélisation numérique de l'écoulement et du transport. Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- 1) Définir le contexte stratigraphique :
 - Description des unités géologiques rencontrées
 - Description de la profondeur au roc
- 2) Définir le contexte hydrogéologique :
 - Caractérisation des propriétés hydrauliques des matériaux
 - Distribution des unités hydrostratigraphiques
 - Piézométrie et vitesses d'écoulement de l'eau souterraine
 - Gradients hydrauliques horizontaux et verticaux
 - Interaction entre les eaux de surface et les eaux souterraines
- 3) Définir le contexte hydrogéochimique :
 - Distribution du trichloroéthène sous forme dissoute dans l'aquifère
 - Sources potentielles de la contamination
- 4) Étude de modélisation numérique de l'écoulement et du transport du TCE dans l'aquifère :
 - Discrétisation et maillage
 - Conditions aux limites
 - Calage et étude de sensibilité
 - Résultats des simulations
 - Transport de masse

1.3 TRAVAUX ANTÉRIEURS

De nombreuses études ont été réalisées depuis la découverte de la présence de trichloroéthène dans l'aquifère de Valcartier en 1997. Cette section vise à présenter les principales études ayant contribué à l'avancement de la compréhension de l'hydrogéologie, de la stratigraphie et de la contamination de l'eau souterraine par le TCE dans le secteur de Valcartier.

De nombreuses firmes de génie-conseil en environnement ont contribué par leurs travaux à la compréhension du site. Les études les plus récentes se sont penchées sur la problématique du TCE dans l'aquifère de Valcartier. La firme Bio-Géo Environnement a remis en 1998 un rapport qui traitait des sources potentielles de contamination de l'eau souterraine sur les terrains du Ministère de la Défense Nationale (Bio-Géo Environnement, 1998). Certains secteurs étaient ciblés comme potentiellement responsables de la contamination en TCE en raison de leurs activités antérieures.

En 1999, les Consultants HGE ont soumis une étude complète sur l'hydrogéologie du secteur (Consultants HGE, 1999). La première étude piézométrique régionale a été établie dans le cadre de cette étude à l'aide des diverses données compilées. La mise en évidence d'une couche de silt séparant une nappe libre régionale d'une nappe libre supérieure a constitué la découverte la plus significative de ces travaux. Toujours en 1999, le centre Géoscientifique de Québec déposait une étude qui comprenait une cartographie des dépôts meubles et une cartographie hydrogéologique régionale de la base militaire de Valcartier (Michaud *et al.* 1999). Cette étude comprenait une base de données répertoriant plusieurs sondages et forages effectués sur les terrains de la base militaire de Valcartier. D'autres travaux de terrain, comprenant du forage, de l'échantillonnage de sols et d'eau souterraine ont été réalisés par Dessau-Soprin (Dessau-Soprin, 1999 A et B; 2001) et SEDAC (Sedac, 2000) et visaient à compléter la compréhension de la stratigraphie, de l'hydrogéologie et de la contamination en TCE dans l'eau souterraine.

En novembre 2000, l'INRS-Géoressources déposait un rapport intitulé « *Caractérisation complémentaire des contextes géologique et hydrogéologique du secteur Valcartier* » (Martel *et*

al, 2000). Ce rapport comprend des cartes piézométriques complètes des aquifères libres et semi-captifs. De plus, la problématique de la contamination de l'eau souterraine par du TCE est abordée plus spécifiquement. Un modèle numérique d'écoulement de l'eau souterraine est aussi documenté dans ce rapport. Les conclusions de l'étude avisaient de la situation préoccupante du côté de Shannon et de Val-Bélair quant à une éventuelle migration du TCE.

Après la découverte de la contamination des puits de résidences privées sur le territoire de la municipalité de Shannon, une caractérisation majeure a été entreprise à l'été 2001. C'est la firme de consultants Dessau-Soprin qui était responsable de la supervision des travaux de forage, d'échantillonnage des sols et de l'eau souterraine ainsi que de l'arpentage. Les différents résultats de la caractérisation sont contenus dans le rapport en deux volumes déposé en 2002 (Dessau-Soprin, 2002).

L'INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE) avait pour mandat d'aviser le MDN sur les aspects techniques et scientifiques reliés à la caractérisation environnementale de l'été et de l'automne 2002. L'organisme avait aussi comme responsabilité la synthèse des résultats dans une base de données ainsi que le développement d'un modèle numérique d'écoulement de l'eau souterraine et de transport de masse dans le secteur de Valcartier. Des travaux de terrain ont aussi été complétés par l'INRS dont certaines analyses chimiques du TCE dissous dans l'eau souterraine à l'aide d'un laboratoire de terrain pour les échantillons provenant de travaux de profilage de la contamination de l'eau souterraine avec la profondeur. Des essais de perméabilité ont aussi été réalisés afin de mieux définir la distribution des conductivités hydrauliques sur le site. Les résultats, conclusions et recommandations sont documentés dans deux rapports distincts, un premier rapport interimaire déposé au printemps 2002 (Lefebvre *et al.*, 2002) et un second rapport final déposé en juin 2003 (Lefebvre *et al.*, 2003). Les travaux de maîtrise documentés dans ce mémoire ont été réalisés dans le cadre du mandat donné à l'INRS-ETE.

De nombreux autres rapports de diverses sources ont aussi été consultés pour mieux comprendre les nombreux aspects de la problématique. Du côté de SNC-TEC, les rapports documentant les travaux environnementaux réalisés au cours des années ont été rendus disponibles par les responsables de l'environnement du site (SNC-Lavalin Environnement, 1990 à 2002). Du côté de

la ville de Québec, anciennement la municipalité de Val-Bélair, des études de recherche en eau et de caractérisation environnementale ont permis de mieux comprendre la stratigraphie et la piézométrie du secteur (Consultants HGE, 1993; 1999; 2001; Compagnie Internationale des Eaux, 1977). La municipalité de Shannon a fourni les résultats d'analyses chimiques des composés organiques volatils provenant des différentes phases d'échantillonnage entreprises depuis la découverte de la contamination à Shannon en décembre 2000. Le Ministère de l'Environnement du Québec a aussi fourni des résultats d'analyses ainsi que des mesures de niveaux d'eau dans certains puits de surveillance situés sur les terrains de la municipalité.

1.4 MÉTHODOLOGIE

Face à une problématique environnementale de l'envergure de celle identifiée à Valcartier, une méthodologie complète et détaillée permet d'atteindre les objectifs de l'étude.

Dans un premier temps, les travaux de caractérisation ont permis de définir le contexte hydrogéologique qui contrôle grandement la migration de la contamination. La définition du contexte hydrogéologique inclut les informations suivantes :

- 1) Géologie des dépôts quaternaires et du roc;
- 2) Épaisseurs des unités géologiques et profondeurs au roc;
- 3) Types d'aquifère présents et piézométrie;
- 4) Gradients hydrauliques et vitesses d'écoulement;
- 5) Recharge de la nappe.

Les techniques utilisées pour définir le contexte hydrogéologique sont principalement les forages et l'installation de puits d'observation. Des forages stratigraphiques avec récupération d'échantillons de sols en continu permettent d'obtenir des descriptions stratigraphiques de qualité qui servent ensuite à définir l'extension des unités géologiques. Les foreuses de type *Rotasonic* offre une grande qualité d'échantillonnage des sols ainsi qu'un excellent pourcentage de récupération des échantillons. Les forages qui atteignent le roc sont utiles à la définition de l'épaisseur des dépôts. L'installation de puits d'observation crépinés dans différents horizons

aquifères permet la mesure des charges hydrauliques. Des cartes piézométriques qui renseignent sur les directions et les vitesses d'écoulement de l'eau souterraine ont été produites à l'aide des charges hydrauliques mesurées sur le terrain en décembre 2001 (Domenico et Schwartz, 1998; Freeze et Cherry, 1979; Todd, 1980). La recharge des aquifères a été estimée à l'aide des données historiques de précipitations (Martel *et al.*, 2000). Plusieurs méthodes existent pour évaluer la recharge en fonction du type de sol, de la température et de paramètres spécifiques à ces méthodes (Hamel, 2002). Une des techniques d'évaluation de la recharge utilise des mesures de charges hydrauliques fréquentes. Par l'étude des hydrogrammes de puits, il est possible d'estimer les valeurs de recharge d'un aquifère (Hamel, 2002; Healy et Cook, 2002; Larose-Charette, 2000; Fagnan *et al.*, 1999).

Une fois le contexte hydrogéologique connu, l'identification des sources de contamination constitue l'étape suivante à la caractérisation environnementale. L'échantillonnage et l'analyse chimique des sols et de l'eau souterraine dans des forages et des puits d'observation permettent d'identifier les secteurs les plus contaminés. L'historique de l'utilisation du site permet aussi de cibler des zones source potentielles. Différentes techniques d'échantillonnage existent et les propriétés physiques et chimiques du contaminant à l'étude dictent les techniques à utiliser. (Fetter, 1999; Domenico et Schwartz, 1998)

Ensuite, l'étendue de la contamination des sols et de l'eau souterraine doit être définie. La superficie et l'étendue verticale de la zone contaminée doivent être déterminées. La zone contaminée peut être divisée selon les concentrations mesurées ainsi que selon la forme sous laquelle le contaminant est observée (gazeuse, immiscible, résiduelle ou dissoute).

Lorsque le contexte hydrogéologique, les zones sources et l'étendue de la contamination sont connus, l'étape suivante est d'établir les techniques de restauration environnementale applicables au site. L'étendue de la contamination et la masse de contaminant présente dans l'aquifère permettent d'abord de sélectionner des technologies efficaces pour restaurer les secteurs contaminés. Les paramètres de transport tels que la sorption, le retard, la dispersion, la dégradation et les propriétés des liquides immiscibles doivent être étudiés lors du choix des techniques de restauration de l'aquifère (Fetter, 1999).

1.5 CONTRIBUTIONS

Plusieurs personnes, organismes et firmes privées ont participé de près ou de loin à la bonne marche de ce projet de recherche. La présente section indique les principaux intervenants qui ont contribué au projet de caractérisation environnementale à Valcartier.

Le projet a été réalisé en collaboration avec le Ministère de la Défense Nationale du Canada (MDN) qui a permis l'utilisation de toute les données, la publication des résultats et qui a contribué financièrement aux travaux de recherche à l'INRS-Eau, Terre et Environnement. C'est aussi cette organisation qui a planifié, surveillé et financé les différentes phases de caractérisation environnementale sur leur terrain. Plusieurs personnes du MDN ont collaboré de près ou de loin à la bonne marche des activités, soulignons Michael Hodgson puis Claudie Tremblay, officiers de l'environnement et Mireille Lapointe, adjointe à l'officier de l'environnement à la Garnison Valcartier, Stéphane Jean puis Aline Mongrain, responsable de l'environnement à la RDDC Valcartier et Nathalie Roy, chargée de projet en environnement à RDDC Valcartier.

La compagnie privée SNC-TEC a également collaboré au projet en permettant l'accès complet aux résultats des différentes caractérisations environnementales réalisées sur leur terrain. Tous les résultats d'analyses chimiques de l'eau souterraine et des sols ont été mis à la disposition de l'INRS-ETE. Les données à caractère hydrogéologique ont aussi été transmises à l'INRS-ETE.

Depuis 1998, la Commission Géologique du Canada (CGC) et l'INRS-Géoressources (maintenant INRS-Eau, Terre et Environnement) ont travaillé en collaboration sur le projet de Valcartier. D'abord, Yves Michaud a complété une première étude hydrogéologique pour le compte du MDN en 1998 (Michaud *et al.*, 1999). Ensuite, Richard Martel et René Lefebvre, professeurs à l'INRS-Eau, Terre et Environnement, ont complété une première étude des contextes géologique et hydrogéologique de Valcartier en novembre 2000 (Martel *et al.*, 2000). Les collaborateurs à cette étude ont été Michel Parent, chercheur à la CGC, pour l'étude de la géologie des dépôts meubles du secteur de Valcartier, Marc-André Carrier, stagiaire de l'École

Polytechnique de Montréal, Daniel Paradis, responsable de la modélisation numérique et Michel Mailloux responsable de l'étude piézométrique et des travaux de terrain.

Ce projet de maîtrise a été réalisé dans le cadre du dernier mandat de l'INRS-ETE et il a débuté en mai 2000. Le présent mémoire constitue l'aboutissement des travaux de recherche. De nombreuses personnes ont contribué à la bonne marche de ce projet depuis l'automne 2001. Les stagiaires Jean-Pierre Franzidis et Josée Villeneuve de l'École Polytechnique de Montréal ont collaboré à l'étude des propriétés hydrauliques par essais de perméabilité ainsi qu'à la compilation et l'interprétation des données hydrauliques et stratigraphiques. Les stagiaires Véronique Blais, Cintia Racine et Josée Thibodeau de l'Université Laval ainsi que Véronique de Montety de l'ESEM (U. D'Orléans, France) ont contribué à l'étude de la distribution, de transport et de l'atténuation du trichloroéthène de l'aquifère de Valcartier. D'ailleurs Véronique Blais a complété un projet de fin d'étude portant sur la distribution en trois dimensions du trichloroéthène à RDDC Nord (Blais, 2002). René Lefebvre a mené les dernières phases des travaux depuis l'automne 2002 à titre de responsable du projet.

Finalement, plusieurs firmes privées ont complété des mandats portant sur l'hydrogéologie du secteur de Valcartier et sur la problématique du TCE dans l'eau souterraine. Soulignons les firmes HGE, Dessau-Soprin, SNC Lavalin Environnement, Bio Géo et Sedac Environnement.

1.6 INTÉGRATION DES DONNÉES

Depuis la découverte de la présence de TCE dissous dans le système aquifère du secteur Valcartier, plusieurs phases de travaux de caractérisation ont été entreprises par le MDN, SNC TEC et les municipalités environnantes. Le tableau 1.1 montre de façon générale les types de travaux qui ont été effectués pour les différents secteurs avant que la campagne de caractérisation du MDN ne débute en août 2001.

Suite aux caractérisations effectuées dans le secteur, différents intervenants ont fourni des données diverses qui ont aidé à la compréhension de la problématique de contamination en TCE

(analyses chimiques, descriptions stratigraphiques, données piézométriques, etc.). Les sources de ces données sont présentées au tableau 1.2, incluant les travaux de l'automne 2001.

D'août 2001 à mars 2002, le MDN a réalisé sur ses terrains de la Garnison Valcartier et de RDDC Valcartier une vaste campagne de caractérisation afin d'améliorer le niveau de compréhension de la problématique de la contamination de l'eau souterraine par du TCE dans le secteur de Valcartier. Cette campagne a considérablement augmenté la quantité et la qualité des données disponibles dans le secteur. Au total, 396 puits d'observation ont été installés et 217 forages ont été réalisés, incluant 65 forages Rotasonic avec échantillonnage de sols en continu pour étudier la stratigraphie. À noter que la plupart des forages ont été aménagés en puits d'observation doubles (2 niveaux). Des travaux d'échantillonnage de l'eau souterraine dans les puits d'observation nouvellement construits et existants ont aussi été effectués.

Le tableau 1.3 montre que la dernière caractérisation du MDN a amélioré considérablement les connaissances sur le secteur Valcartier. Au niveau du contrôle sur la distribution des unités en profondeur, les seules données disponibles avant l'automne 2001 provenaient de descriptions de déblais de forage et de quelques échantillons de sol en cours de forage. La dernière campagne de caractérisation incluait 65 forages par la méthode Rotasonic qui permet l'échantillonnage en continu des matériaux meubles. Ces échantillons permettent une description précise et détaillée des types de matériaux présents en profondeur. Cette information est très importante compte tenu de la complexité de la distribution des matériaux et de l'importance de cette distribution sur l'écoulement de l'eau souterraine dans le secteur Valcartier. Des travaux de caractérisation environnementale supplémentaires sur les terrains de SNC-TEC ont ajouté 93 échantillons d'eau par sondages Geoprobe aux données disponibles mais aucun nouveau puits d'observation conventionnel.

Au niveau du contrôle piézométrique, les cartes produites en 2000 (Martel *et al.*, 2000) utilisaient environ 200 points de mesure tandis qu'environ 950 points de mesures de niveaux d'eau sont présentement disponibles. Des données piézométriques supplémentaires en périphérie de la Garnison et de la RDDC ont été obtenues provenant de 18 puits d'observation de la ville de Québec dans l'arrondissement 8 (Val-Bélair) et de 6 puits dans la municipalité de Shannon. Ces

données améliorent considérablement la définition de l'écoulement, particulièrement à RDDC Nord ainsi que dans la partie est de la région d'étude.

Le tableau 1.3 démontre également que près de 700 essais de perméabilité permettent maintenant de définir la distribution de la conductivité hydraulique des matériaux. Cette propriété était beaucoup moins bien connue avant la dernière campagne de caractérisation. Finalement, la dernière campagne a permis de tripler le nombre total d'analyses des composés organiques volatils (COV) dans les échantillons d'eau souterraine qui permettent, entre autre, de déterminer la concentration en TCE dissous. La base de donnée des analyses de COV dans l'eau souterraine du secteur dans des échantillons prélevés à différentes périodes dépasse maintenant 1000 résultats d'analyse du TCE. En plus des prélèvements d'eau souterraine dans des puits d'observation conventionnels, des profils de concentration en TCE ont été réalisés à l'aide de 182 sondages Geoprobe à RDDC Nord. Vingt-neuf (29) profils Geoprobe effectués à l'extérieur des terrains du MDN et environ 1000 autres résultats analytiques de COV dans l'eau souterraine sont également disponibles. Toutes ces données permettent de définir avec beaucoup plus de précision le panache de contamination de l'eau souterraine en TCE dissous dans le secteur.

2. LOCALISATION ET CONTEXTE HYDROSTRATIGRAPHIQUE

2.1 LOCALISATION

Le secteur Valcartier est situé à environ 35 km au nord du centre-ville de Québec (figure 2.1). Deux entités administratives du Ministère de la Défense Nationale (MDN) se partagent le territoire fédéral : la Garnison Valcartier et le centre R&D pour la Défense Canada Valcartier (RDDC Valcartier) divisé géographiquement en RDDC Nord et RDDC sud. On retrouve au sud du secteur un site industriel désaffecté appartenant à SNC TEC. Deux municipalités bordent le site, soit la ville de Québec à l'est (arrondissement 8 comprenant l'ancienne ville de Val-Bélair) et Shannon à l'ouest. La topographie générale du secteur est assez plane mais il est bordé par deux montagnes : le mont Rolland-Auger au sud et le Mont Brillant au nord-est. Deux rivières traversent aussi le secteur, à l'ouest, la rivière Jacques-Cartier et à l'est la rivière Nelson. Ces deux rivières s'écoulent du nord vers le sud.

Plusieurs organismes ont changé leur appellation récemment. Pour éviter toute confusion, mentionnons que la Garnison Valcartier s'appelait auparavant l'USS Valcartier, que RDDC Valcartier était nommé CRDV et que la ville de Val-Bélair n'a été que récemment regroupée au sein de la nouvelle ville de Québec, et fait maintenant partie de l'arrondissement 8.

2.2 CONTEXTE HYDROSTRATIGRAPHIQUE

La description du contexte hydrostratigraphique est basée sur les travaux de Michel Parent de la CGC documentés dans le rapport de Lefebvre *et al.* (2003). La position de la zone d'étude en bordure du piémont laurentien a joué un rôle important dans la sédimentation des matériaux meubles du secteur. La figure 2.2 montre schématiquement la stratigraphie dans le secteur Valcartier. Les dépôts meubles du secteur Valcartier sont constitués de la base au sommet par un till glaciaire, les sédiments proglaciaires, le silt glaciomarin, les sédiments deltaïque et prodeltaïque et à proximité de la rivière Jacques-Cartier par des sédiments alluvionnaires.

Les dépôts meubles reposent sur un substratum rocheux de composition de gneiss granitique à topographie variable caractéristique du Bouclier Canadien. Le roc est considéré peu fracturé et sa

faible conductivité hydraulique estimée à 10^{-12} m/s (Freeze et Cherry, 1979) en fait une unité imperméable.

Le till régional est d'origine glaciaire. Au cours des différentes phases de caractérisation, ce till a été peu échantillonné puisque presque tous les forages se sont terminés à l'interface entre le matériel deltaïque et proglaciaire. Le till a été mis en place lors de l'avancée et du retrait des glaciers au cours de la dernière phase glaciaire. L'unité est formée par un diamicton silto-argileux compact et imperméable. Il est assumé que le till recouvre une grande partie du secteur de Valcartier même si un nombre limité d'observation l'identifie.

Les eaux de fontes générées lors du retrait du glacier à la fin de la période glaciaire ont entraîné la déposition de l'unité proglaciaire. La morphologie de ces dépôts est caractérisée par la présence de chenaux sous-glaciaires et de cônes sous-aquatiques composés de sables et graviers. Les dépôts proglaciaires sont d'épaisseurs variables et sont présents à la Garnison Valcartier, à la RDDC Nord et Sud ainsi que chez SNC TEC. Les épaisseurs sont généralement plus importantes à l'ouest du secteur dans la vallée glaciaire enfouie vers Shannon.

Directement au-dessus des sédiments proglaciaires, un silt glaciomarin est présent surtout au sud du site. La déposition du silt glaciomarin aurait été provoquée par une baisse du taux de sédimentation après la phase proglaciaire. Le silt glaciomarin a été observé dans de nombreux forages à l'ouest de la Garnison et à la RDDC Nord et Sud. Peu d'évidences permettent d'identifier ce silt à Shannon et chez SNC TEC ainsi qu'au nord du secteur.

Des sables d'origine deltaïque glaciomarine constituent le matériel le plus commun en étendue et en profondeur dans le secteur Valcartier. Ce matériel est plus grossier à l'ouest dans l'axe de la vallée enfouie tandis qu'il est plus fin vers l'est à RDDC Nord et Sud ainsi que dans la vallée enfouie de l'arrondissement de Val-Bélair. En périphérie du delta, des sédiments prodeltaïques silto-argileux se sont déposés recoupant alors les sables deltaïques. Les variations du niveau marin causées par le relèvement isostatique ont amené la progradation du delta sur ses propres sédiments. Les sédiments deltaïques reposent sur le silt glaciomarin, les sédiments proglaciaires ou directement sur le roc dépendamment du secteur. Les sables et graviers deltaïques sont divisés

à l'est par la couche silteuse prodeltaïque entre 160 m d'altitude et la surface du sol. Du point de vue hydrogéologique, la présence de la couche silteuse prodeltaïque entraîne la présence d'une nappe libre supérieure et d'une nappe semi-captive. Le terme couche silteuse prodeltaïque regroupe l'intervalle de sédiments comportant une proportion importante de matériel silto-argileux.

L'étendue de la couche silteuse prodeltaïque est importante pour la compréhension du contexte hydrogéologique dans le secteur Valcartier. Les cartes piézométriques à la figure 3.5 et 3.6 présentent l'étendue de la couche silteuse prodeltaïque. Cette unité ne semble pas s'étendre latéralement à l'est jusqu'au mont Brillant (sauf peut-être dans la partie sud-est), tandis que du côté de Québec (Val-Bélair) et de RDDC Sud, la couche silteuse prodeltaïque semble rejoindre le mont Rolland-Auger. Cette unité a une épaisseur passant de 5 à 15 m, entre 155 et 170 m d'altitude, dans le secteur de RDDC Nord et des champs de tir Batoche/Cambrai/Normandie de la Garnison Valcartier. À RDDC Sud, la couche silteuse prodeltaïque forme une unité distincte de celle du silt glaciomarin, l'autre unité silteuse située plus en profondeur surmontant l'unité proglaciaire et surmontée par une couche de sable d'origine deltaïque. La couche silteuse prodeltaïque est située principalement entre 150 et 165 m d'altitude et elle s'insère au sein de la séquence deltaïque alors que les silts glaciomarins s'insèrent entre les sédiments deltaïques et proglaciaires (figures 2.2 et 2.4).

2.2.1 PROFONDEUR AU ROC

La figure 2.3 montre une carte de la topographie du socle rocheux définie à partir des informations disponibles à partir des forages qui atteignent le roc. Bien que la surface du sol soit relativement plane dans le secteur Valcartier, la figure 2.3 montre que la topographie du roc indique la présence de deux vallées enfouies. Une des deux vallées se retrouve dans la partie ouest du secteur et suit un axe approximatif nord-sud sous l'axe de la rivière Jacques-Cartier. Cette dernière vallée est moins évidente à l'étude de la figure 2.3 mais celle-ci se prolonge sous la rivière Jacques Cartier. La deuxième vallée enfouie s'allonge dans un axe est-ouest au centre du secteur Valcartier. Ces vallées enfouies sont comblées de sédiments tel que décrit précédemment dont l'épaisseur maximale peut atteindre environ 50 m sous la Garnison Valcartier, à l'ouest de RDDC Nord.

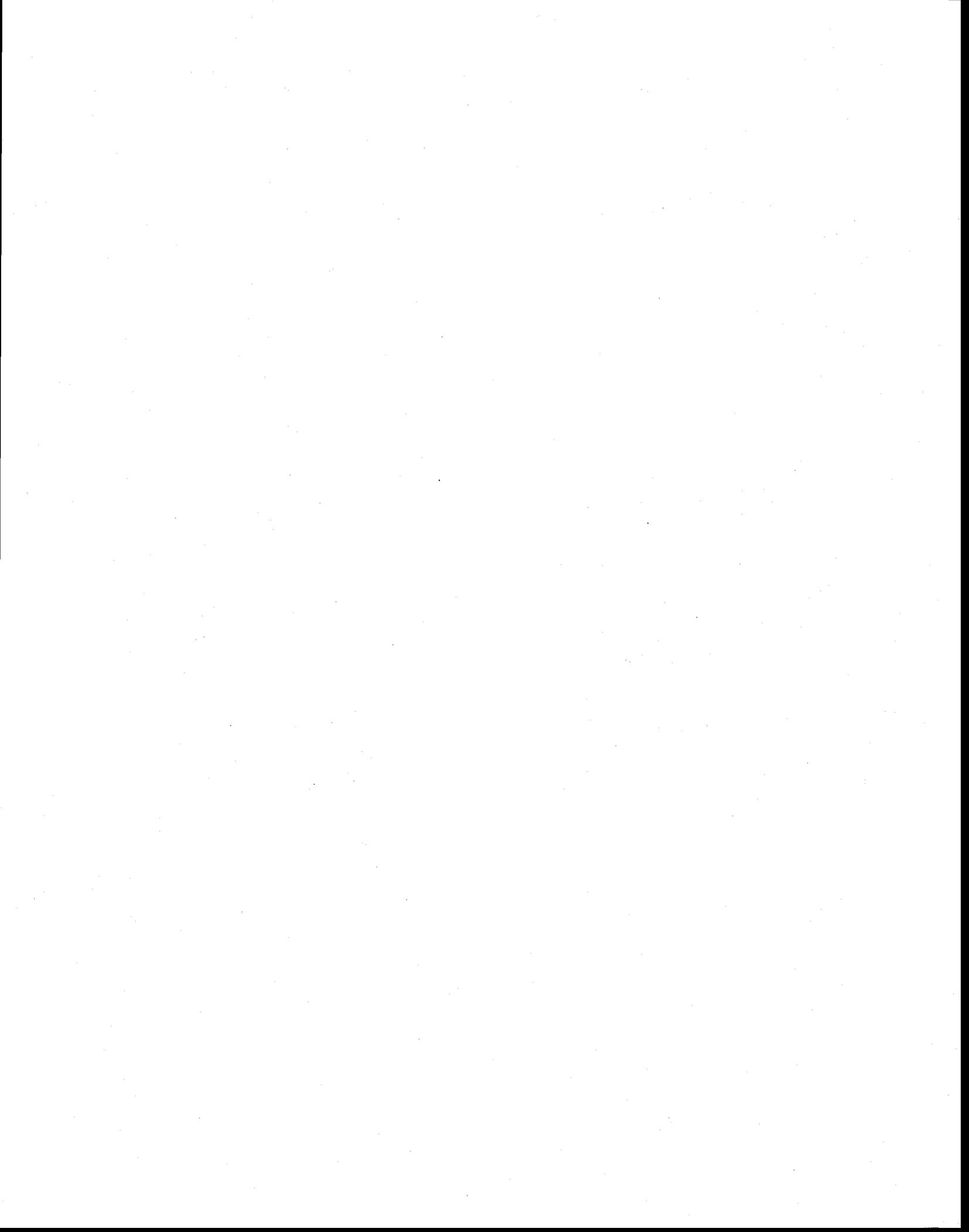
2.2.2 RELATION ENTRE LES UNITÉS HYDROSTRATIGRAPHIQUES

La figure 2.4 montre deux des sections hydrostratigraphiques développées pour le secteur Valcartier. La localisation de ces sections est montrée à la figure 2.3. La coupe A-A' montre une section longitudinale tracée d'ouest en est dans la principale vallée enfouie sous-jacente au secteur Valcartier. La coupe B-B' est une section transversale nord-sud à travers cette même vallée dans la partie est du secteur Valcartier. Ces coupes montrent non seulement les unités géologiques présentes en profondeur mais également les charges hydrauliques (niveaux d'eau) mesurées dans l'unité de sable deltaïque, tant au-dessus qu'en dessous de la couche silteuse prodeltaïque. À cause de sa forte conductivité hydraulique mais surtout de son épaisseur et de sa continuité latérale, l'unité de sable deltaïque est la principale unité aquifère retrouvée dans le secteur.

Dans la partie est du secteur, l'unité de sable deltaïque est cependant séparée en deux par la couche silteuse prodeltaïque dont la conductivité hydraulique est plus faible. Puisque le sable deltaïque est en contact avec la surface du sol et l'atmosphère, des conditions de nappe libre sont présentes dans le sable deltaïque au-dessus de la couche silteuse, là où celle-ci est présente, et ailleurs dans le secteur où la couche silteuse est absente. Cependant, des conditions de nappe semi-captive sont présentes dans le sable deltaïque sous-jacent à cette couche silteuse. La faible conductivité hydraulique de la couche silteuse prodeltaïque limite l'infiltration d'eau vers les couches plus profondes. L'importante perte de charge hydraulique résultant de l'infiltration à travers la couche silteuse peu perméable engendre ainsi un gradient hydraulique vertical entre le sable deltaïque situé au-dessus et en dessous de la couche silteuse. La présence de ce gradient vertical implique que l'écoulement aura tendance à se faire vers le bas à travers la couche silteuse. Les sections hydrostratigraphiques de la figure 2.4 donnent un bon aperçu des conditions d'écoulement dans le secteur Valcartier et du rôle important joué par la présence de la couche silteuse prodeltaïque.

Un modèle géologique en trois dimensions (3D) de la distribution des unités a été développé à partir des coupes géologiques et hydrostratigraphiques et de l'interpolation de l'élévation des

interfaces entre les unités rencontrées dans le secteur Valcartier. Ce modèle permet une meilleure compréhension de la distribution des unités dans l'ensemble du secteur et de leurs relations verticales et latérales. La figure 2.5 montre une vue en perspective de ce modèle géologique 3D tout en indiquant la localisation de points d'intérêt à la surface du modèle. La figure 2.6 montre la localisation de coupes verticales dans le modèle qui sont montrées aux figures 2.7 et 2.8. Ces deux dernières figures montrent bien la distribution des unités selon deux perspectives différentes. Il peut être constaté que l'unité de sable et gravier proglaciaire présente à la base tend à s'épaissir dans la partie ouest du secteur, à proximité de Shannon. La couche silteuse glaciomarine qui recouvre cette unité a une épaisseur variable et est absente par endroits, particulièrement dans les parties ouest et nord du secteur. La couche silteuse prodeltaïque s'intercale dans le sable deltaïque dans la partie est du secteur mais cette couche est discontinue dans la partie centrale du secteur entre RDDC Nord et SNC TEC et absente dans le secteur de la Garnison Valcartier. Cette distribution complexe des matériaux en 3D dans le secteur exerce un contrôle important sur le système d'écoulement. C'est pourquoi le modèle géologique en 3D a servi de base à la définition des couches utilisées dans le modèle numérique d'écoulement décrit au chapitre 4.



3. CARACTÉRISATION HYDROGÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOCHIMIQUE

3.1 DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES

3.1.1 MÉTHODOLOGIE

La conductivité hydraulique des matériaux joue un rôle important dans un système aquifère car elle contrôle la facilité de l'eau souterraine à s'écouler à travers les matériaux poreux. Avec la porosité et les gradients hydrauliques, la conductivité hydraulique contrôle aussi la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine. Des travaux de caractérisation des propriétés hydrauliques ont été complétés par l'équipe de l'INRS-Eau, Terre et Environnement afin de connaître l'intervalle des valeurs et la distribution des conductivités hydrauliques des différentes unités présentes dans le secteur d'étude. Dans le cas du système aquifère de la région de Valcartier, près de 700 essais de perméabilité ont été complétés dans plus de 250 puits, soit en moyenne trois essais par puits d'observation. La caractérisation de ces propriétés visait aussi à classer les unités hydrostratigraphiques en fonction de leur perméabilité. Enfin, ces données permettaient également de vérifier si le modèle de déposition des sédiments contrôlait la perméabilité des matériaux et permettait de définir des zones de conductivité hydraulique pour les unités hydrostratigraphiques présentes dans le secteur.

Trois méthodes courantes sont utilisées pour estimer la conductivité hydraulique des matériaux granulaires. L'utilisation des données de granulométrie permet une estimation de la conductivité hydraulique, par exemple à l'aide de la méthode de Hazen (Vukovic et Soro, 1992). Il peut être toutefois noté que les résultats obtenus à partir d'une telle méthode ne sont pas très réalistes à cause de la faible représentativité des échantillons recueillis. Les essais de pompage permettent d'estimer une conductivité hydraulique moyenne d'un grand volume d'aquifère (Kruseman et de Ridder, 1994; Todd, 1980). Cependant, ce type d'essai ne peut que difficilement être fait dans un aquifère contaminé comme celui de Valcartier puisque l'eau contaminée pompée doit être gérée. Finalement, les essais de perméabilité (*slug tests*) permettent de mesurer *in situ* la conductivité hydraulique localement autour de la crépine d'un puits sans avoir à gérer d'effluents contaminés. Le concept de l'essai de perméabilité est de provoquer une perte ou un gain de charge hydraulique artificiellement, i.e. par ajout ou retrait d'eau ou par injection d'air dans le tubage du

puits au-dessus du niveau d'eau. Ensuite, à l'aide d'un capteur de pression présent dans le puits sous le niveau statique de l'eau, la remontée ou la descente de la charge est mesurée en fonction du temps. Le taux de remontée ou de descente permet de déterminer la conductivité hydraulique du matériel aquifère présent autour de la crépine (Butler, 1997; Kruseman et de Ridder, 1994).

La méthode préconisée à Valcartier est la troisième, soit l'injection d'air comprimé dans le tubage au-dessus du niveau d'eau à l'aide d'un appareillage muni d'une valve d'injection, de manomètres et d'une valve permettant de relâcher instantanément la pression dans le puits. Levy et Pannell (1991) ont démontré que l'utilisation d'un tel système était avantageuse par rapport aux méthodes conventionnelles dans les aquifères granulaires à conductivité hydraulique élevée où la remontée du niveau d'eau ne prend que quelques secondes.

Les avantages d'utiliser l'air comprimé comme médium de compression de la nappe sont nombreux. D'abord, il n'y a aucun ajout ou retrait d'eau, ce qui évite tout contact avec de l'eau contaminée. Aussi, le rabattement imposé à la nappe peut être contrôlé à l'aide d'un manomètre qui lit la pression d'air dans le puits. Par conversion de la pression, il est possible de connaître le rabattement en centimètres d'eau dans le puits. Il est recommandé de faire trois essais par puits avec des rabattements initiaux différents. Ceci permet de s'assurer de la reproductibilité des données de conductivité hydraulique. En effet, un puits mal développé peut amener une variation anormale des valeurs de conductivité hydraulique selon l'ordre des tests ou selon le rabattement imposé. Sur les 698 essais effectués, seulement à dix reprises un puits a répondu de façon différente aux trois essais. Ainsi, il peut être conclut que le développement des puits était adéquat pour l'ensemble des puits échantillonnés.

3.1.2 MÉTHODES D'ANALYSES UTILISÉES

Selon le type de matériel aquifère rencontré et le détail de construction des puits d'observation testés, différentes réponses sont observées lors de la remontée du niveau d'eau dans le puits après le relâchement de la pression d'air provoquant la remontée de l'eau. Sur le site de Valcartier, trois types de réponses ont été observés (figure 3.1) : la réponse log-linéaire, la réponse oscillatoire et une réponse qui pourrait être qualifiée d'intermédiaire, i.e. une réponse semi-

oscillatoire. Les réponses oscillatoires (*underdamped*) sont celles qui ont été le plus souvent rencontrées, i.e. dans environ 52% des essais. La réponse log-linéaire (*overdamped*) a été obtenue dans 38% des tests tandis que la réponse semi-oscillatoire (*critically damped*) a été rencontrée dans 10% des essais. Une réponse oscillatoire survient lorsque l'inertie de la colonne d'eau dans le puits est non-négligeable (Kruseman et de Ridder, 1994). Ceci est observé lorsque le puits possède une longue colonne d'eau pour une courte crépine dans du matériel très perméable. Pour les réponses log-linéaires, l'inertie de la colonne d'eau est considérée comme négligeable. Le troisième type de réponse survient lorsque le comportement est intermédiaire.

Trois méthodes d'interprétation ont été utilisées pour déterminer la conductivité hydraulique selon le type de réponse obtenue lors des essais de perméabilité. La méthode de Uffink (1984) a été appliquée à l'interprétation des essais montrant un comportement oscillatoire, la méthode de Bouwer et Rice (1976) a été utilisée pour les réponses log-linéaires et, enfin, la méthode de Butler et Garnett (2000) a été employée pour les réponses semi-oscillatoires. Ces différentes méthodes ont amené des résultats semblables quant aux valeurs de conductivités hydrauliques pour des matériaux de même type. De plus, dans la grande majorité des puits testés, l'interprétation des données obtenues des essais de perméabilité consécutifs résultait en un faible écart entre les valeurs de conductivité hydraulique interprétées.

3.1.2.1 MÉTHODE DE UFFINK (1984)

La méthode de Uffink a été développée pour déterminer la conductivité hydraulique des formations géologiques montrant une réponse oscillatoire (*underdamped*) lors des essais de perméabilité *in situ*. La réponse oscillatoire est définie par la relation suivante (Kruseman et de Ridder, 1994; Van der Kamp, 1976; Uffink, 1984).

$$h_t = h_0 e^{-\alpha t} \cos \omega t \quad (3.1)$$

Avec

h_0 : changement instantané de la charge hydraulique au temps $t = 0$ (m)

h_t : charge hydraulique dans le puits au temps t (m)

ω : fréquence angulaire de l'oscillation de la charge hydraulique (s^{-1})

γ : constante d'amortissement (s^{-1})

La constante d'amortissement γ et la fréquence angulaire de l'oscillation ω s'expriment comme suit :

$$\gamma = \omega_0 B \quad (3.2)$$

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - B^2} \quad (3.3)$$

Avec

ω_0 : la fréquence d'oscillation libre de la charge hydraulique

B : paramètre défini par l'équation (3.6)

Le temps entre deux cycles d'oscillation τ_n (s) et le ratio entre deux minimums ou maximums successifs h_n (m) et h_{n+1} (m) : $\ln(h_n/h_{n+1}) = \delta$ permet de déterminer les valeurs de γ et ω .

$$\gamma = \frac{\delta}{\tau_n} \quad (3.4)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau_n} \quad (3.5)$$

$$B = \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + 4\pi^2}} \quad (3.6)$$

$$\omega_0 = \frac{\sqrt{\delta^2 + 4\pi^2}}{\tau_n} \quad (3.7)$$

La relation développée par Uffink permet de relier les caractéristiques de l'oscillation des charges hydrauliques avec le temps à une valeur de conductivité hydraulique (Uffink, 1984)

$$\frac{1}{B} \ln \left(\frac{1.26KD}{r_c^2 \omega_0} x \frac{1}{\alpha} \right) + \frac{\theta - \pi}{\sqrt{1 - B^2}} = \frac{8KD}{r_c^2 \omega_0} \quad (3.8)$$

avec

$$\alpha = S \frac{r_w^2}{r_c^2} e^{-2 \cdot \text{skin}} \quad (3.9)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1 - B^2}}{B} \right) \quad (3.10)$$

K : conductivité hydraulique (m/s)

r_c : rayon du tubage (m)

r_w : distance horizontale du centre du puits à la partie intacte de l'aquifère (m)

skin = « skin effect » ou effet de puits

Un nomogramme indique la relation entre B et $(r_c^2 \omega_0 / 4KD)$ pour différentes valeurs de α (Kruseman et de Ridder, 1994). Dans les feuilles de calcul développées pour appliquer cette méthode, l'équation 3-8 est plutôt solutionnée de façon itérative. Des conditions doivent être respectées pour justifier l'utilisation de la méthode. Ces conditions s'apparentent à celles de la méthode de Cooper.

3.1.2.2 MÉTHODE DE BOUWER ET RICE (1976)

La méthode de Bouwer et Rice permet de déterminer la conductivité hydraulique dans un aquifère libre en se basant sur l'équation de Thiem. L'équation décrivant l'écoulement dans un puits après un retrait soudain d'eau est décrite par l'équation suivante (Bouwer et Rice, 1976; Kruseman et de Ridder, 1994):

$$Q = 2\pi Kd \frac{h_i}{\ln(R_c/r_w)} \quad (3.11)$$

Le taux de remontée de la nappe est :

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{Q}{\pi r_x^2} \quad (3.12)$$

la conductivité hydraulique K (m/s) est donnée par :

$$K = \frac{r_c^2 \ln(R_c/r_w) l}{2d} \ln \frac{h_0}{h_t} \quad (3.13)$$

les variables sont définies comme suit :

Q : débit de pompage (m^3/s)

K : conductivité hydraulique (m/s)

r_c : rayon de la section non-crépinée du puits (m)

r_w : distance du centre du puits à la partie intacte de l'aquifère (m)

R_c : distance radiale du puits à laquelle la différence de charge hydraulique est dissipée (m)

d : longueur de la section crépinée du puits (m)

h_0 : charge hydraulique dans le puits au temps $t=0$ (m)

h_t : charge hydraulique dans le puits au temps t (m)

La distance R_c est définie à partir de relations différentes selon que le puits est crépiné partiellement ou totalement dans l'aquifère (Kruseman et de Ridder, 1994). Les auteurs définissent aussi la procédure à suivre pour déterminer les paramètres requis pour l'analyse des essais de perméabilité avec cette méthode. Des conditions doivent être satisfaites pour que l'analyse puisse être faite avec la méthode et ces conditions sont similaires à celles relatives à l'application de l'équation de Thiem. Brièvement, ces conditions et hypothèses sont (Kruseman et de Ridder, 1994) :

- L'aquifère est en condition de nappe libre et d'étendue infinie
- L'aquifère est homogène, isotrope et d'égale épaisseur
- La surface libre de l'aquifère est horizontale avant le début de l'essai
- La charge hydraulique dans le puits est réduite instantanément, il n'y a pas de rabattement hors du puits, et aucun écoulement n'existe au-dessus de la surface libre
- L'inertie de la colonne d'eau est négligeable
- Les pertes de charges dans le puits sont négligeables
- Le puits pénètre totalement ou partiellement l'aquifère
- Le diamètre du puits est de dimension finie
- L'écoulement vers le puits est en régime permanent

3.1.2.3 MÉTHODE DE BUTLER ET GARNETT (2000)

Pour les réponses semi-oscillatoires observées dans quelques puits, la méthode de Uffink s'est avérée inefficace pour estimer la conductivité hydraulique des matériaux. Il était difficile de superposer correctement les courbes de la solution analytique aux données de terrain. Plusieurs méthodes ont été considérées et la méthode développée spécifiquement pour ce type de réponse par Butler et Garnett (2000) du Kansas Geological Survey a été retenue.

Les méthodes présentées sont basées sur des modèles décrits par Springer et Gelhar (1991) et Butler (1997) pour les essais de perméabilité dans des puits à pénétration partielle, respectivement pour des aquifères libres et confinés. Un graphique de la charge hydraulique normalisée en fonction du temps est d'abord préparé ($H(t)/H_0$). Des courbes types sont ensuite générées à l'aide des équations suivantes (Zlotnik and McGuire, 1998).

$$w_d(t_d) = e^{-\frac{C_D t_d}{2}} \left[\cos(\omega_d t_d) + \frac{C_D}{2\omega_d} \sin(\omega_d t_d) \right] \text{ avec } C_D < 2 \quad (3.14)$$

$$w_d(t_d) = e^{-t_d} (1 + t_d) \text{ avec } C_D = 2 \quad (3.15)$$

$$w_d(t_d) = -\left(\frac{1}{\omega_d^+ - \omega_d^-}\right) \left[\omega_d^- e^{\omega_d^+ t_d} - \omega_d^+ e^{\omega_d^- t_d} \right] \text{ avec } C_D > 2 \quad (3.16)$$

Avec

C_D : paramètre d'amortissement adimensionnel

g : accélération gravitationnelle (m^2/s)

H_0 : changement initial du niveau d'eau (m)

L_e : longueur effective de la colonne d'eau (m)

t_d : paramètre de temps adimensionnel $(g/L_e)^{1/2} t$

t : temps (s)

w : déviation du niveau d'eau par rapport au niveau d'eau initial (m)

w_d : déviation normalisée du niveau d'eau (w/H_0) (m)

ω_d : paramètre de fréquence adimensionnel $\left(-|1 - (C_D/2)^2|^{1/2}\right)$

et :

$$\omega_d^\pm = -\frac{C_D}{2} \pm \omega_d \quad (3.17)$$

La courbe type est ajustée aux données normalisées de terrain puis la relation suivante permet de déterminer la conductivité hydraulique.

$$K_r = \frac{t_d^* r_c^2 \ln[R_e / r_w]}{t^* 2bC_D} \quad (3.18)$$

Avec

b : longueur de la crépine (m)

R_e : rayon effectif du puits (m) (Bouwer et Rice, 1976)

r_c : rayon effectif du tubage (m)

r_w : rayon de la crépine ou du forage (m)

La procédure complète est présentée dans l'article de Butler et Garnett (2000). Une feuille de calcul est aussi disponible pour automatiser le calcul de la conductivité hydraulique à partir des données brutes de terrain.

3.1.3 STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES

Au total, 698 essais de perméabilité ont été complétés dans 254 puits d'observation sur la propriété du MDN. Le tableau 3.1 montre les différentes statistiques décrivant les conductivités hydrauliques par unité hydrostratigraphique. Ces résultats sont aussi illustrés à la figure 3.2. À partir des statistiques descriptives, il est possible d'affirmer, qu'en moyenne, l'unité deltaïque est l'unité la plus perméable de toutes les unités hydrostratigraphiques testées. Cependant, la conductivité hydraulique varie dans l'unité deltaïque à l'intérieur du secteur Valcartier. Les figures 3.3 et 3.4 montrent que la conductivité hydraulique dans le sable deltaïque diminue en direction est. La figure 3.3 montre un plan interpolé à travers les données disponibles dans l'unité deltaïque indiquant cette tendance générale. La figure 3.4 présente une interpolation par krigeage du logarithme des mesures de conductivité hydraulique (K , m/s) dans le sable deltaïque. L'interpolation par krigeage permet d'obtenir la meilleure estimation linéaire non biaisée d'une propriété dont les valeurs sont connues à certains points dans l'espace (de Marsily, 1986), comme c'est le cas pour les données de conductivité hydraulique dans le secteur Valcartier. Les résultats de cette interpolation présentée à la figure 3.4 montrent une importante variabilité de K mais la tendance à la diminution en direction est demeure évidente. Cette diminution de la conductivité hydraulique dans cette direction est reliée à la taille généralement plus faible des particules de sable dans le secteur est qui se trouve dans la partie distale de la sédimentation deltaïque. Cette localisation explique également la présence de la couche silteuse qui est également d'origine prodeltaïque. De plus, en comparant la figure 3.4 à la figure 2.3, il peut être constaté que les valeurs maximales de conductivité hydraulique se retrouvent dans l'axe de la partie la plus profonde de la vallée enfouie est-ouest présente dans le secteur Valcartier.

3.2 ÉTUDE DE LA PIÉZOMÉTRIE DES AQUIFÈRES DU SECTEUR VALCARTIER

3.2.1 MÉTHODOLOGIE

La mesure des niveaux d'eau et l'établissement de cartes piézométriques permettent de déterminer les directions d'écoulement des eaux souterraines dans un aquifère. Dans le secteur à l'étude, la complexité de l'écoulement des eaux souterraines et la présence de deux nappes distinctes rendent l'étude piézométrique plus complexe (Martel *et al.*, 2000). En effet, la couche silteuse prodeltaïque, présente localement dans la partie est du secteur étudié, sépare le sable deltaïque en deux aquifères: une nappe libre dans la partie supérieure au-dessus de la couche silteuse et où elle est absente, ainsi qu'une nappe semi-captive sous la couche silteuse prodeltaïque, là où elle est présente. Pour distinguer les deux contextes dans lesquels se retrouvent des conditions de nappe libre dans le secteur, le terme « nappe libre supérieure » au-dessus de la couche silteuse prodeltaïque sera utilisé tandis que le terme de « nappe libre régionale » le sera où la couche silteuse est absente. Alors que la nappe libre est présente sur tout le secteur Valcartier, les conditions semi-captives sont présentes uniquement où se retrouve la couche silteuse prodeltaïque, soit dans la partie nord-est de RDDC Nord, ainsi qu'à RDDC Sud et au sud des terrains de SNC-TEC.

Afin de s'assurer de la précision des mesures de l'altitude de la surface piézométrique, les puits d'observation doivent être nivelés et arpentés pour en connaître leur position exacte dans l'espace. Ce travail a été complété par la firme d'experts-conseil Dessau-Soprin à l'aide d'un système de positionnement global (*GPS*) et d'une station totale. Les résultats ont été vérifiés lors de la mise en carte des valeurs en comparant ces résultats au positionnement préliminaire réalisé en début de projet.

Un relevé piézométrique régional a été complété par différents intervenants de la région de Valcartier à la mi-décembre 2001 ainsi qu'en mars 2002. Sur les terrains du MDN, i.e. à RDDC Nord, Sud et Essais ainsi qu'à la Garnison Valcartier, des niveaux d'eau ont été mesurés dans tous les nouveaux puits d'observation installés pendant l'automne ainsi que dans la majorité des puits d'observation déjà existants. Ce relevé piézométrique a été complété entre le 6 et le 13

décembre 2001. En parallèle, les niveaux d'eau ont été mesurés dans tous les puits d'observation existants sur les terrains de SNC-TEC au sud du site. Ce relevé a été complété le 7 décembre 2001. D'autres niveaux d'eau ont été pris entre le 4 et le 18 mars 2002 dans les derniers puits d'observation installés en février 2002 sur les terrains du MDN. Des mesures ont aussi été prises à ce moment dans des puits d'observation déjà visités en décembre 2001 afin de s'assurer que les niveaux d'eau pouvaient être comparés entre eux. Des mesures de niveau d'eau ont également été obtenues pour 18 puits d'observation de la ville de Québec dans l'arrondissement 8 (Val-Bélair) et effectuées dans six (6) des puits d'alimentation privés de la ville de Shannon.

Au total, environ 700 mesures de charges hydrauliques prises en décembre 2001 et mars 2002 ont été compilées et ont servi à l'établissement de la piézométrie et de l'écoulement de l'eau souterraine dans le secteur Valcartier. Compte tenu du contexte hydrogéologique qui comporte un écoulement de l'eau souterraine dans deux aquifères distincts, la classification des puits d'observation par type de nappe a été faite préalablement à la cartographie piézométrique. Ainsi, environ 580 puits sont installés dans la nappe libre tandis qu'environ 110 puits le sont dans la nappe semi-captive. Ces données ont servi à définir deux cartes piézométriques distinctes.

Les isopièzes sont des lignes représentant la position d'une charge hydraulique spécifique de valeur constante. Une carte piézométrique se construit en interpolant les positions entre les puits d'observation ayant la même altitude de la surface piézométrique par des courbes d'élévation du niveau de l'eau souterraine appelées isopièzes. Dans le secteur Valcartier, compte tenu de la densité élevée des points de contrôle du niveau d'eau, les isopièzes ont été dessinés à chaque mètre d'altitude de la nappe. Différentes approches peuvent être utilisées pour le traçage des isopièzes. Des méthodes d'interpolation numériques peuvent être appliquées. Pour le système aquifère de Valcartier, les isopièzes ont été dessinés manuellement en interpolant les données de niveaux d'eau d'une même nappe (libre et semi-captive séparément) en considérant les effets présumés des limites hydrauliques sur les niveaux d'eau, surtout les cours d'eau. Une interpolation numérique aurait été applicable au centre du secteur Valcartier mais cette approche n'aurait pas pu tenir compte de la présence des rivières Nelson et Jacques-Cartier qui se trouvent en périphérie du secteur où le contrôle piézométrique est insuffisant pour assurer une interpolation numérique cohérente avec la présence de ces limites. L'incertitude dans la

détermination de la piézométrie dans ces secteurs est indiquée par l'utilisation de lignes pointillées alors qu'aux endroits où le contrôle est suffisant, des lignes pleines sont utilisées pour tracer les isopièzes.

Deux cartes piézométriques ont été construites, une pour la nappe libre et une autre pour la nappe semi-captive. Puisque les conditions de nappe semi-captive n'existent que lorsque la couche silteuse prodeltaïque est présente, i.e. dans la partie est du site, la piézométrie de la nappe semi-captive rejoint celle de la nappe libre dans les secteurs où la couche silteuse prodeltaïque est absente. À noter que la présence de l'unité de silt argileux gris glaciomarin entre les unités deltaïque et proglaciaire n'amène pas clairement des conditions semi-captives dans l'unité proglaciaire sous-jacente. Un gradient existe néanmoins entre les deux unités pour quelques puits en bordure sud du site mais, régionalement, les conditions semblent être du type d'un aquifère libre. Il est probable que cette unité de silt argileux soit absente en certains endroits, permettant le contact hydraulique entre les deux unités et engendrant ainsi des conditions de nappe libre dans l'unité proglaciaire.

3.2.2 PIÉZOMÉTRIE ET ÉCOULEMENT DE LA NAPPE LIBRE

Un écoulement en nappe libre implique que la surface supérieure de la nappe est en contact avec la pression atmosphérique. Dans le secteur Valcartier, des conditions de nappe libre sont rencontrées dans deux contextes différents. D'abord, dans le secteur administratif de la Garnison Valcartier et au sud-ouest de RDDC Nord, seul l'aquifère libre régional est présent puisque la séquence de sédiments est constituée presque uniquement de sables et graviers de la base au sommet (unités deltaïque et proglaciaire). Il y a une mince unité de silt gris argileux glaciomarin entre les unités deltaïque et proglaciaire, mais elle n'engendre pas de conditions semi-captives dans l'unité proglaciaire sous-jacente. Dans les autres secteurs du site étudié, l'aquifère libre est aussi présent mais n'occupe que la partie supérieure de la séquence de sédiments, ayant pour base la couche silteuse prodeltaïque.

La figure 3.5 montre la piézométrie de la nappe libre et indique également la distribution de la couche silteuse prodeltaïque. De façon générale, dans la partie est du secteur, l'écoulement est

convergent vers le centre du secteur et ce à partir du nord et du sud. De plus, la topographie du socle rocheux exerce un contrôle important sur l'écoulement puisque la présence de dépressions enfouies (vallées glaciaires) amène un écoulement chenalisé dans ces dernières. Ces vallées suivent d'abord un axe est-ouest, de RDDC Nord vers Shannon et puis nord-ouest/sud-est, dans la région de Val-Bélair (voir figure 2.3 montrant la topographie du socle rocheux). La perméabilité et l'épaisseur des matériaux contrôlent aussi la direction et la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine. Ainsi, au centre des vallées enfouies, les matériaux aquifères sont très perméables, tant pour les unités deltaïques que proglaciaires. Les vitesses d'écoulement sont donc assez importantes. Vers l'est, soit sur les terrains de RDDC Nord et Sud ainsi que SNC TEC, en bordure du complexe deltaïque, les matériaux sont plus fins et le gradient hydraulique est faible, ce qui amène des vitesses d'écoulement inférieures à 20 m par année pour les unités équivalentes. Les vitesses d'écoulement de l'eau souterraine peuvent être plus rapides en bordure des monts Rolland-Auger et Brillant.

La présence de la couche silteuse prodeltaïque amène des conditions particulières d'écoulement de la nappe libre supérieure à l'est du site. Ainsi, la nappe libre supérieure est en contact avec la pression atmosphérique à ces endroits car le sable deltaïque est présent jusqu'à la surface du sol. Cette nappe libre est donc soumise au processus de recharge des aquifères par l'infiltration directe à la surface du sol des précipitations et des eaux de fonte printanières, contrairement à la nappe semi-captive sous-jacente. Le patron général d'écoulement de la nappe libre supérieure à RDDC Nord est du centre de la couche silteuse prodeltaïque vers ses bordures (est, ouest et sud), et du nord vers le sud pour la portion nord de la couche. Un patron d'écoulement semblable existe à RDDC Sud et au sud de SNC TEC mais cette fois-ci l'écoulement est généralement du sud vers le nord. À la bordure ouest de la couche silteuse prodeltaïque, un gradient hydraulique important existe en raison de l'arrivée de l'eau de la nappe libre supérieure dans la dépression piézométrique, au centre du site. Sur cette bordure, on note une différence d'élévation de la charge hydraulique de 1 à 4 m entre la nappe libre supérieure et l'aquifère semi-captif qui se rejoignent à cet endroit pour former la nappe libre régionale. Ainsi, lorsque la couche silteuse prodeltaïque se termine, l'eau provenant la nappe libre supérieure subit une perte de charge de quelques mètres pour rejoindre l'altitude de la nappe libre régionale. Cet abaissement soudain de la charge hydraulique se produit sur une distance horizontale de quelques mètres seulement.

Cette situation particulière est observée tout au long de la bordure ouest de la couche silteuse prodeltaïque, et permet même à certains endroits de suivre la position précise de cette bordure même lorsque les informations stratigraphiques ne sont pas complètes. Les gradients hydrauliques horizontaux mesurés sur la carte piézométrique dans la zone de perte de charge importante à la limite ouest de la couche silteuse prodeltaïque sont de l'ordre de 0,1 m/m. Une dépression piézométrique est observée au centre du secteur où les nappes libre supérieure et semi-captive se rejoignent pour former la nappe libre régionale. Dans cette dépression piézométrique située à la limite des propriétés de RDDC Nord et de SNC TEC, les gradients hydrauliques horizontaux sont minimales, impliquant des vitesses très faibles d'écoulement de l'eau souterraine.

Une autre caractéristique importante de la nappe libre supérieure, surtout dans le contexte de la contamination de l'aquifère par du TCE, est la présence d'une ligne de partage des eaux souterraines dans le secteur est du site. Cette ligne de partage sépare l'écoulement de la nappe libre vers deux directions opposées. Du côté est de la ligne, la nappe libre supérieure s'écoule vers la rivière Nelson, tandis que du côté ouest, la nappe libre supérieure est drainée vers la rivière Jacques-Cartier. Le grand nombre de points de contrôle piézométriques fournis par la caractérisation de l'automne-hiver 2001-2002 a permis de préciser sa position par rapport à la ligne de partage qui avait été définie précédemment (Martel *et al.* 2000). Par rapport à sa position présumée précédemment, la ligne de partage est maintenant tracée un peu plus à l'ouest dans la portion nord-ouest de RDDC Nord et aussi légèrement plus à l'ouest au centre des terrains de SNC TEC. Pour le reste, elle demeure généralement à la même position que définie précédemment. La position de cette ligne de partage des eaux revêt une grande importance du fait que certaines des zones sources potentielles de TCE se situent à proximité de cette ligne. La migration du TCE dissous émis par les zones sources dans la nappe libre supérieure se dirigera dans des directions différentes selon que ces zones sources sont situées à l'est ou à l'ouest de la ligne de partage des eaux souterraine.

Des capteurs de pression ont été installés par l'INRS dans deux puits entre février 2000 et décembre 2001 : N7-2 localisé dans le secteur de la limite de partage des eaux et PO-2 localisé plus à l'ouest. Ces mesures ont permis d'observer le changement des niveaux d'eau au cours de

l'année, surtout lors de la recharge printanière de la nappe reliée à la fonte des neiges. Durant cette période de recharge, des mesures de direction et vitesse de l'eau souterraine avec le Geoflo ont été faites dans des puits d'observation près de la limite de partage des eaux à des intervalles de deux semaines. Ces mesures ont montré un déplacement de la ligne de partage des eaux vers l'ouest durant la recharge. Cependant, la limite de partage des eaux est revenue à sa position initiale après seulement quelques semaines. Considérant la très faible vitesse de l'eau souterraine aux abords de la ligne de partage, il est peu probable que la fluctuation saisonnière de sa position puisse conduire à des modifications significatives des directions de migration de la contamination émise aux zones sources localisées aux abords de la ligne de partage des eaux.

3.2.3 PIÉZOMÉTRIE ET ÉCOULEMENT DE LA NAPPE SEMI-CAPTIVE

Lorsqu'un aquifère est sous-jacent à une unité imperméable qui amène un isolement hydraulique des matériaux sous-jacents, des conditions captives ou semi-captives sont présentes si les niveaux d'eau dans l'aquifère excèdent l'élévation de la base de l'unité confinante. Un aquifère est dit semi-captif lorsque la couche imperméable isolant l'aquifère est d'étendue limitée, ce qui implique un isolement hydraulique partiel de l'aquifère. Dans le secteur Valcartier, la couche silteuse prodeltaïque présente à l'est du secteur semble saturée sur toute son épaisseur et les niveaux piézométriques dans l'unité deltaïque sous la couche silteuse sont à une élévation supérieure à la base de la couche silteuse. Il en résulte que l'aquifère de sable et gravier deltaïque présent sous la couche silteuse peut être défini comme semi-captif, puisque la couche silteuse prodeltaïque n'est pas continue dans tout le secteur. Même si les conditions sont semi-captives sous la couche silteuse prodeltaïque, le sable et gravier deltaïque est continu latéralement avec les zones où la couche silteuse est absente. L'eau souterraine présente sous la couche silteuse s'écoule donc latéralement dans la même unité pour atteindre les endroits représentant la nappe libre régionale, passant ainsi de conditions semi-captives à des conditions libres. Ainsi, au nord-ouest et au sud-ouest du site, la nappe semi-captive rejoint la nappe libre régionale (RDDC Nord, SNC TEC) et ce, sans important gradient horizontal contrairement à ce qui est observé lorsque la nappe libre supérieure atteint la nappe libre régionale.

La figure 3.6 montre la piézométrie de la nappe semi-captive sous l'étendue de la couche silteuse prodeltaïque. La nappe semi-captive est ainsi présente dans la partie est du secteur Valcartier et elle se poursuit vers l'est dans la vallée enfouie en direction de la ville de Québec (Val-Bélair). Il y a donc continuité entre la nappe semi-captive du secteur Valcartier et la partie ouest de l'aquifère captif qui s'étend vers Val-Bélair. De façon générale, l'écoulement de l'eau souterraine se fait du nord-est vers le sud-ouest dans la partie nord de la nappe semi-captive et du sud vers le nord dans la portion sud du site. Comme dans la nappe libre supérieure, il y a donc convergence de l'écoulement dans la nappe semi-captive vers la vallée enfouie située entre RDDC Nord et SNC TEC. Cette convergence est cependant moins directe que dans la nappe libre supérieure. De façon similaire à la nappe libre supérieure, il y a aussi une ligne de partage des eaux souterraines dans la nappe semi-captive, bien que sa position soit plus difficile à préciser. C'est pourquoi cette ligne est indiquée par une large bande à la figure 3.6. La carte piézométrique de la nappe semi-captive nous montre tout de même que dans la partie centrale, à l'est de la nappe semi-captive, l'écoulement de l'eau souterraine est divergent : une partie de l'écoulement se fait vers l'ouest alors qu'une autre partie se fait vers l'est en direction de la ville de Québec (Val-Bélair). Comme pour la nappe libre, la ligne de partage des eaux de la nappe semi-captive se trouve à l'est de RDDC Nord et de SNC TEC.

Le patron d'écoulement de la nappe semi-captive est plutôt régulier dans la portion nord de la couche silteuse, soit pratiquement vers l'ouest dans la partie ouest et approximativement vers le sud dans la partie est en bordure de la couche silteuse prodeltaïque. Les vitesses d'écoulement dans la nappe semi-captive sont approximativement équivalentes à celles dans la nappe libre, mais elles semblent plus constantes que dans la nappe libre. Il y a un certain changement de la direction générale d'écoulement dans la nappe semi-captive dans la moitié nord de RDDC Nord : l'écoulement de la nappe semi-captive devient plus vers l'ouest à partir d'une direction qui était plutôt du nord-est vers le sud-ouest. Cette direction d'écoulement est différente de celle présente dans la nappe libre supérieure qui se fait presque directement vers le sud au centre de RDDC Nord (figure 3.5). Le long de la rivière Nelson, la nappe semi-captive est absente dans la partie nord du secteur des poudrières de la Garnison Valcartier. Le peu de contrôle sur la piézométrie dans ce secteur ne permet pas de déduire adéquatement l'effet de la présence de la rivière Nelson tant sur la nappe semi-captive que sur la nappe libre (supérieure et régionale). La nappe semi-

captive est aussi présente au sud du site, à RDDC Sud et au sud de SNC TEC. À ces endroits, l'écoulement est vers le nord et le nord-ouest, sauf pour la portion est de RDDC Sud où l'écoulement de la nappe semi-captive est orienté vers le nord-est et l'est en direction de la ville de Québec (Val-Bélair).

Un gradient hydraulique vertical important existe entre la nappe libre supérieure et la nappe semi-captive (figure 2.4). Ce gradient hydraulique vertical est de l'ordre de 0,3 à 0,1 m/m et indique un écoulement vers le bas à travers la couche silteuse prodeltaïque. La nappe libre supérieure au nord de RDDC Nord a une altitude de sa surface piézométrique d'environ 171 m par rapport à environ 167 m d'altitude pour la nappe semi-captive sous-jacente.

3.3 DISTRIBUTION DU TRICHLOROÉTHÈNE DANS LE SECTEUR DE VALCARTIER

3.3.1 MÉTHODOLOGIE

La délimitation du panache de TCE dissous dans l'eau souterraine du secteur Valcartier a nécessité l'acquisition de données hydrogéochimiques provenant de l'analyse d'échantillons d'eau souterraine. De telles données permettent normalement de délimiter la distribution en plan de la concentration d'un contaminant dans l'aquifère. Exceptionnellement, lorsque les données sont abondantes et proviennent de différentes profondeurs dans l'aquifère, il est alors possible de définir la forme d'un panache en trois dimensions. Dans le cas du secteur Valcartier, trois sources principales de données ont été utilisées pour parvenir à caractériser le plus précisément possible le panache de TCE dissous:

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

L'échantillonnage et l'analyse de l'eau souterraine dans les puits d'observation ont été réalisés sur les terrains du MDN en suivant un protocole préétabli en collaboration entre le MDN et l'INRS-ETE. Ce protocole suit le guide d'échantillonnage du Ministère de l'Environnement du Québec (MENV, 1994). L'échantillonnage a été fait après que les puits aient été développés pour assurer le bon contact hydraulique des intervalles crépinés avec le matériel aquifère encaissant. Par la suite, avant l'échantillonnage de l'eau souterraine, les puits d'observation ont été purgés d'au moins deux fois leur volume en eau. Le pompage a été fait avec une pompe de type Waterra et des tubages dédiés dans chaque puits avec des pompes à soupapes à leur base. À la fin de la purge, les échantillons d'eau souterraine ont été prélevés lorsque l'eau était relativement claire et qu'au moins deux paramètres mesurés sur le terrain devenaient stables (pH, conductivité électrique, oxygène dissous, température, potentiel d'oxydo-réduction). Un échantillonneur à seringue de type Hypofil était utilisé afin de limiter la volatilisation des composés organiques volatils (COV) dissous, notamment le chlorure de vinyle, lors du transfert de l'échantillon d'eau souterraine dans les contenants d'échantillonnage.

Il est important de considérer la construction des puits lorsque l'on compare entre elles des concentrations de contaminants dissous dans l'eau souterraine. Ainsi, présentement, sur les terrains du MDN, les puits d'observations sont installés avec trois différentes longueurs de crépines : 1,5 m, 3,0 m et 4,5 m. Plus la crépine d'un puits d'observation est longue, plus la possibilité de dilution de l'échantillon augmente. En effet, si l'intervalle vertical contenant de l'eau contaminée est moins épais ou décalé par rapport à l'intervalle crépiné, le pompage dans un puits muni d'une longue crépine peut alors recueillir à la fois de l'eau contaminée et de l'eau non contaminée. Les concentrations dans les puits d'observation munis de longues crépines sont donc généralement considérées représenter des valeurs minimales par rapport aux concentrations réelles présentes dans l'aquifère. Par contre, les puits d'observation à longue crépine offrent l'avantage d'avoir une meilleure possibilité de détection d'un contaminant présent dans l'aquifère puisque la section verticale couverte est plus grande.

Des échantillons d'eau souterraine ont aussi été prélevés à l'aide d'une méthode de sondage par enfoncement de type "*direct push*" à partir d'un système de marque Geoprobe. Le principe de cette technologie est d'enfoncer une pointe crépinée à une profondeur désirée à l'aide d'un train

de tiges pour ensuite prélever un ou plusieurs échantillons d'eau souterraine à différentes profondeurs selon un intervalle vertical donné. Au terme du sondage, la crépine et le train de tiges sont retirés, ne laissant pas dans l'aquifère d'installation qui peut être échantillonnée à nouveau. Avec ce type de système, il est ainsi possible de mesurer des profils de contamination dissoute en fonction de la profondeur. Le Geoprobe a été utilisé sur les terrains de RDDC Nord et Sud pour faire du profilage des concentrations en TCE dans l'objectif de détecter la présence de TCE et de connaître sa distribution verticale. Puisque la distribution du TCE dans ces secteurs était inconnue avant la campagne de caractérisation, cette technique a permis d'optimiser l'emplacement des puits d'observation permanents qui ont été implantés à partir des résultats des profilages Geoprobe. Une autre variante de la méthode Geoprobe par enfoncement a aussi été utilisée sur les terrains de SNC TEC. Plutôt que d'échantillonner l'eau sur des profils verticaux à intervalle régulier, un ou deux échantillons ont été prélevés sur les terrains de SNC TEC à une profondeur spécifique à l'endroit du sondage.

L'échantillonnage d'eau avec le système Geoprobe utilise des tiges crépinées de longueur restreinte (0,3 m, 0,6 m ou 1,02 m). Les échantillons prélevés représentent ainsi une valeur pratiquement ponctuelle de la concentration dans le panache puisque les échantillons ont généralement subi peu d'effets de dilution, contrairement aux puits d'observation conventionnels munis de longues crépines. Les concentrations maximales obtenues avec le système Geoprobe dans un profil traversant un panache tendent donc à être plus élevées que les concentrations obtenues d'échantillons prélevés dans des puits conventionnels dans la même portion du panache. Enfin, un autre avantage de cette méthode est qu'elle permet de connaître la concentration en TCE rapidement si des capacités analytiques sont présentes directement sur le terrain. Les échantillons d'eau souterraine prélevés à RDDC avec la méthode Geoprobe étaient acheminés à un laboratoire de terrain aménagé à RDDC Nord pour obtenir les concentrations en TCE dans l'eau souterraine généralement la journée même où les échantillons étaient prélevés. Le laboratoire mobile appartenait à l'IRB alors que les trois chromatographes en phase gazeuse installés dans le laboratoire provenaient de l'IRB, de l'INRS-ETE et de l'Université Laval.

Enfin, le troisième type d'information hydrogéochimique disponible dans la région de Valcartier provient des résultats de l'échantillonnage de puits d'alimentation privés à Shannon et de puits

d'approvisionnement en eau potable de la Garnison Valcartier (P-2, P-4 et P-5). Les informations obtenues des puits privés sont utiles pour déterminer la présence ou l'absence de TCE dans la nappe à ces endroits. Par contre, les détails de construction des puits privés, notamment leur profondeur, sont rarement disponibles. Ainsi, la valeur des informations obtenues de ces puits est plutôt d'ordre qualitatif. Les puits d'approvisionnement à forts débits comme ceux du MDN amènent un effet de dilution du TCE puisque l'eau échantillonnée peut provenir d'un mélange d'eau souterraine exempte de contamination et d'eau contaminée. Les valeurs obtenues sont donc encore une fois qualitatives à cause du facteur de dilution important relié à l'ouvrage de captage utilisé comme moyen d'échantillonnage.

Les trois différentes sources d'information sur les concentrations en TCE dans l'eau souterraine ne représentent pas la même chose. Elles donnent des valeurs de concentration qui sont soit une valeur "minimale" (puits d'approvisionnement et puits d'observation avec longues crépines), une valeur "moyenne" (puits d'observation avec courtes crépines) ou une valeur "maximale" (profilages Geoprobe). Dans une telle situation, il n'est pas possible, ni souhaitable, de tracer en plan de nombreuses plages restreintes de concentration dans le panache sur la base de ces diverses sources de données sur les concentrations. Le panache de contamination en TCE a donc été défini avec de larges zones de concentrations à l'intérieur desquelles les valeurs généralement rencontrées sont à l'intérieur d'une plage définie. Des concentrations exceptionnelles, plus élevées ou inférieures, par rapport aux limites de la plage de concentration d'une zone peuvent tout de même y être présentes.

3.3.2 CARTE DE CONTAMINATION EN TCE DANS L'AQUIFÈRE

Afin de bien représenter de façon claire et concise l'information recueillie lors des campagnes d'échantillonnage de l'eau souterraine par les différentes méthodes énumérées précédemment, des outils de cartographie informatisée ont été utilisés. La base de données hydrogéochimique MS Access (Version 2000, Microsoft) a été reliée au logiciel MapInfo (Version 6.0, MapInfo Corporation) qui permet de mettre en carte rapidement et efficacement le niveau de contamination de l'eau par du TCE. La figure 3.7 montre la carte de contamination en TCE ainsi générée, où les données ponctuelles de concentration en TCE sont présentées, en plus de zones

de niveau de contamination définies sur la base de ces données ponctuelles. La légende des symboles utilisés sur la figure 3.7 est présentée à la page précédent la planche 7. Sur cette carte, des symboles de couleurs et de grosseurs différentes sont utilisés selon l'intensité de la contamination en TCE mesurée dans l'échantillon prélevé au point de mesure. Différents symboles sont utilisés pour représenter les types de prélèvement: des étoiles pour les concentrations maximales obtenues par les profils Geoprobe, des cercles pour l'échantillonnage de puits d'observation conventionnels dans la nappe libre, des losanges pour les puits d'observation conventionnels échantillonnés dans la nappe semi-captive et enfin des carrés pour les puits privés d'alimentation en eau échantillonnés à Shannon. Ces différents symboles permettent de classifier l'information pour faciliter l'analyse des résultats.

Pour délimiter le panache de contamination en TCE dissous dans l'eau souterraine, nous avons adopté une approche reliée à la concentration maximale acceptable (CMA) en TCE dans l'eau potable présentement en vigueur au Canada, soit 50 µg/L (Conseil canadien des ministres de l'environnement, CCME, 2002). Ainsi, deux zones sont définies sur la figure 3.7: une zone en jaune dans laquelle les concentrations en TCE rencontrées sont généralement situées entre la limite de détection et 50 µg/L; et une zone en rouge pour les endroits où les concentrations en TCE mesurées dans l'eau souterraine dépassent généralement 50 µg/L. Ce mode de représentation permet donc de connaître l'ampleur en superficie de la contamination en TCE, en plus d'identifier les secteurs où ces concentrations dépassent la norme. De plus, la superposition de la carte de contamination à la piézométrie permet de vérifier l'accord entre la distribution des concentrations en TCE et l'écoulement de l'eau souterraine.

Les concentrations en TCE dissous présentes dans le secteur Valcartier varient latéralement et verticalement dans le panache. Les concentrations maximales rencontrées à RDDC Nord varient entre 800 et 1300 µg/L tandis que les concentrations maximales présentes sur les terrains de SNC TEC dans le secteur 214 sont de l'ordre de 1 000 à 4 500 µg/L. Pour l'ancienne Lagune C, plus à l'ouest sur les terrains de SNC TEC, les concentrations maximales sont de l'ordre de 1 600 µg/L dans un puits d'observation tandis qu'une concentration de 2 600 µg/L en TCE a été détectée par un sondage Geoprobe. La portion du panache présente à l'ouest des terrains de la Garnison Valcartier a pour concentration maximale 1 200 µg/L tandis que la majorité des valeurs

maximales mesurées varie entre 560 et 920 µg/L au centre du panache de TCE dissous. À la limite ouest de propriété de la Garrison Valcartier avec Shannon, les valeurs maximales mesurées sont de 260 à 340 µg/L. À la limite de propriété du MDN avec Val-Bélair, les concentrations maximales rencontrées sur le territoire du MDN sont de l'ordre de 15 µg/L en TCE dissous, donc sous la CMA de 50 µg/L.

La caractérisation effectuée par SNC TEC à l'été 2002 a permis de préciser l'étendue du panache de contamination en TCE dissous relié à cette zone source. Ces données démontrent qu'il y probablement a un lien entre la contamination mesurée dans le Secteur 214 et le panache principal rencontré plus à l'ouest sur les terrains de la Garrison Valcartier.

La figure 3.8 montre un agrandissement de la carte de contamination en TCE dissous dans l'aquifère à Valcartier. Une particularité de la figure est une nouvelle division des plages de concentrations en TCE par l'ajout d'une zone en vert indiquant les secteurs où les concentrations mesurées dans l'aquifère sont généralement au dessus de 500 µg/L. Cette nouvelle division permet d'identifier les secteurs les plus fortement contaminés par du TCE dissous dans l'aquifère. Il peut être remarqué sur la carte que deux zones en verts de grande superficie sont présentes chez SNC TEC dans en aval de la lagune C à l'ouest et dans le secteur 214 à l'est. Trois zones vertes sont identifiées à la RDDC Nord. Une première zone à l'est du secteur à partir de la clôture est et incluant le bâtiment 67, une autre zone plus à l'ouest à proximité du bâtiment 7 et enfin une zone au nord à proximité du bâtiment 98. La dernière zone à la RDDC Nord comporte des concentrations au-dessus de 500 µg/L uniquement dans la nappe semi-captive. Un panache de TCE dissous est aussi présent dans la nappe libre supérieure à cet endroit mais les concentrations mesurées sont inférieures à 500 µg/L.

3.3.3 ZONES SOURCES POTENTIELLES IDENTIFIÉES DANS LE SECTEUR DE VALCARTIER

En identifiant les secteurs dans lesquels les plus grandes concentrations sont observées, il est possible de délimiter les zones sources potentielles responsables de la contamination. La figure 3.9 présente les zones sources identifiées suite aux différentes caractérisations environnementales (Blais, 2002). Au sud du secteur sur les terrains de SNC TEC en bordure du

mont Rolland-Auger est située la lagune C. Cette lagune aurait été utilisée comme site de disposition de matières résiduelles entre 1963 et 1970. Les sols contaminés ont été excavés et enfouis de façon sécuritaire en 1994 dans une cellule d'enfouissement à sécurité maximale. À l'est des terrains de SNC TEC, une seconde zone source est identifiée. Il s'agit du secteur 214 dans lequel les plus fortes concentrations en TCE dissous ont été mesurées historiquement. Depuis 1998 un système de pompage et traitement de l'eau souterraine est en fonction la moitié de l'année pour empêcher la migration du TCE et pour restaurer l'aquifère. Les sources potentielles identifiées à RDDC Nord sont les bâtiments no. 67 et no. 98 dont les activités antérieures ont été liées à l'utilisation du TCE. Le lagon bleu, ancien lieu de disposition des effluents du réseau acide du complexe expérimental en fonction entre 1944 et 1985 est aussi identifié comme source de contamination en TCE potentielle. Les autres bâtiments ou installations indiquées sont uniquement suspectées comme source potentielles de contamination puisque des activités à risque ont eu lieu dans ces endroits dans le passé et que des concentrations plus fortes en TCE sont observées à proximité. Plus de détails sur les zones sources, particulièrement à RDDC Nord, sont fournis par Blais (2002) et Lefebvre *et al.* (2003).

3.3.4 ESTIMATION DU VOLUME DE TRICHLOROÉTHÈNE PRÉSENT DANS L'AQUIFÈRE DE VALCARTIER

Une fois que les superficies des zones contaminées sont déterminées, le volume d'eau contaminée présent dans l'aquifère peut être évalué. La gestion et la restauration d'un aquifère contaminé nécessite d'avoir une estimation du volume d'eau contaminée en circulation ainsi que de la masse de TCE se trouvant dans l'aquifère. À l'aide de la figure 3.7, les superficies respectives des zones du panache sont d'abord calculées ; soit la superficie totale du panache, celle de la zone contaminée au-dessus de 50 µg/L et celle en-dessous de 50 µg/L. La superficie totale du panache est de 3,16 km², de 1,86 km² pour la zone < 50 µg/L et de 1,30 km² pour la zone > 50 µg/L. Une épaisseur moyenne du panache est estimée à 20 m par l'étude de la distribution des concentrations en TCE dans le panache tandis que la porosité est fixée à 0,33. Le volume d'eau contaminée dans l'ensemble du panache est estimé à environ 20 860 000 m³; à 12 260 000 m³ sous 50 µg/L et à 8 600 000 m³ au-dessus de 50 µg/L. Les concentrations moyennes en TCE ont été calculées à partir des résultats d'analyses chimiques du TCE dans l'eau souterraine de l'année 2001 présentées sur la figure 3.7. Les valeurs de concentrations moyennes

sont de 177 $\mu\text{g/L}$ pour le panache au-dessus de 50 $\mu\text{g/L}$, de 5,77 $\mu\text{g/L}$ pour le panache au-dessous de 50 $\mu\text{g/L}$ et de 101,7 $\mu\text{g/L}$ pour les deux panaches combinés en calculant la moyenne proportionnellement aux volumes d'eau contaminée. La masse totale de TCE estimée dans le panache est de 1593 kg. Le tableau 3.2 présente les résultats du calcul du volume d'eau contaminée dans le panache ainsi que la masse de TCE présente.

4. MODÉLISATION NUMÉRIQUE DE L'ÉCOULEMENT ET DU TRANSPORT

4.1 MÉTHODOLOGIE

Le système aquifère du secteur Valcartier est complexe au niveau de l'écoulement de l'eau souterraine en raison de son contexte géologique particulier. La présence de deux types d'aquifères (libre et semi-captif) engendre des gradients hydrauliques verticaux et horizontaux qui varient régionalement dans les aquifères. Puisque le système d'écoulement contrôle en grande partie la migration de la contamination en TCE dissous dans l'aquifère, une compréhension quantitative de l'écoulement de l'eau souterraine doit être atteinte. La modélisation numérique de l'écoulement de l'eau souterraine permet d'arriver à un tel niveau de compréhension.

Pour représenter le plus fidèlement possible le système d'écoulement considéré, il est essentiel de choisir un simulateur numérique dont les capacités sont en mesure de représenter la situation. Le simulateur numérique FRAC3DVS (Therrien et Sudicky, 1996), décrit à la section 4.4, possède les caractéristiques requises pour développer un modèle numérique d'écoulement et de transport de masse dans le secteur Valcartier qui répond aux objectifs suivants :

- Le modèle doit représenter l'écoulement à saturations variables puisqu'une grande partie du système aquifère est en conditions de nappe libre ;
- La modélisation doit se faire en trois (3) dimensions puisque les relations complexes entre les unités hydrostratigraphiques ainsi que le système d'écoulement exigent une telle représentation ;
- Le modèle doit permettre une discrétisation par éléments finis pour représenter précisément les conditions aux limites, la position des puits et la morphologie complexe des unités hydrostratigraphiques ;
- La modélisation doit se faire en régime permanent avec une recharge moyenne constante imposée à la surface supérieure du maillage afin de permettre le calage du modèle avec les données de niveaux d'eau prises en décembre 2001. Ces niveaux d'eau sont représentatifs des niveaux moyens au cours de l'année.

L'approche générale utilisée pour les simulations est d'abord de définir un secteur à modéliser à l'intérieur duquel les conditions d'écoulement, la distribution des matériaux et les propriétés hydrauliques sont bien connues. Les limites du domaine de modélisation sont tracées pour correspondre à des conditions hydrauliques connues. Les limites physiques sont préférables aux limites hydrauliques puisque les limites physiques ne sont pas influencées par des sollicitations de l'aquifère, tandis que les limites hydrauliques le sont (Anderson et Woessner, 1992). Un maillage constitué par des éléments finis est construit à l'intérieur du domaine en respectant un niveau de détails qui tient compte de la variabilité des gradients hydrauliques ainsi que de la précision requise pour les simulations du transport de contaminant. Les couches du modèle numérique sont définies à partir du modèle géologique en trois dimensions (chapitre 2). Des propriétés hydrauliques et capillaires initiales sont attribuées aux matériaux en fonction des données disponibles, notamment celles de la conductivité hydraulique (chapitre 3). La distribution initiale des niveaux d'eau du modèle est tirée de la carte piézométrique du secteur (chapitre 3).

À partir de ces conditions et propriétés initiales, le calage du modèle a été fait par essais et erreurs en faisant varier les propriétés hydrauliques des matériaux et la recharge assignées au modèle. Les propriétés capillaires et les conditions aux limites ont aussi été modifiées lors du calage du modèle. Le modèle a été calé en comparant les charges hydrauliques simulées avec le modèle aux charges hydrauliques mesurées dans le secteur Valcartier en minimisant l'erreur. En plus des charges hydrauliques, le calage a été réalisé en considérant les directions d'écoulement obtenues lors des simulations aux directions d'écoulement déduites de la morphologie du panache de contamination en TCE à partir des zones sources (figures 3.7 à 3.9). Un soin particulier a aussi été porté à l'obtention d'une position adéquate du point singulier du système d'écoulement, situé sur la ligne de partage des eaux à l'endroit où l'écoulement de l'eau souterraine converge en provenance du nord et du sud pour ensuite se diriger vers l'est et l'ouest. Ce point est situé à la limite des terrains de RDDC Nord et de SNC TEC.

Deux modèles d'écoulement ont été générés : un modèle représentant les conditions qui prévalaient en 2001 avec le régime de pompage des puits d'alimentation de la Garnison Valcartier (P-2, P-4 et P-5) et un autre modèle, pour lequel l'effet du pompage additionnel du

nouveau puits d'alimentation P-7, mis en fonction au début 2002, est considéré. Bien que le puits P-5 était encore en opération en 2001, ce puits est alors utilisé uniquement pour agir comme une barrière hydraulique limitant la migration du panache de TCE dissous. L'eau pompée par le puits P-5 est contaminée par le TCE et n'approvisionne plus le système d'alimentation en eau potable de la Garnison Valcartier.

Le modèle calé permet de représenter l'écoulement de l'eau souterraine dans le système aquifère du secteur Valcartier, à la fois au niveau des directions et des vitesses d'écoulement. À partir du modèle d'écoulement calé, une technique appelée « traçage de particules » permet de déterminer le cheminement de l'écoulement (en aval ou en amont hydraulique) en utilisant des « particules » relâchées dans le modèle d'écoulement et ce, en partant d'un endroit d'intérêt. Cette technique a d'abord permis de déterminer les aires d'alimentation des différents puits de captage d'eau potable de la Garnison Valcartier (P-2, P-4, P-5 et P-7). Le traçage de particules a aussi été utilisé pour déterminer les directions d'écoulement et le temps de migration de la contamination à partir des différentes zones sources potentielles de contamination.

Finalement, le modèle numérique a été utilisé pour réaliser des simulations simplifiées du transport de masse de TCE. Ces simulations ont été effectuées en spécifiant des concentrations constantes aux différentes zones sources dans le modèle en cinq endroits distincts pour représenter la migration du TCE à partir des principales zones sources potentielles (Lagune C, Secteur 214 et 3 zones sources distinctes à RDDC Nord). Le transport de masse a été simulé en assignant une dispersion hydrodynamique représentative de l'échelle du modèle, mais sans considérer la dégradation du TCE, ni son retard pouvant être causé par l'adsorption (Gelhar *et al.*, 1992). Ces conditions de simulation du transport du TCE fournissent des résultats montrant la migration maximale du TCE à partir des zones sources, tant au niveau des concentrations relatives par rapport aux zones sources qu'au niveau des distances parcourues dans le système aquifère après un temps de migration fixe.

La période à laquelle les différentes zones sources potentielles de contamination en TCE ont débuté leurs émissions de TCE dissous est indéterminée. Les simulations du transport de masse ont donc été faites sur un temps total de 60 ans qui représente la période jugée maximale durant

laquelle les zones sources ont pu être actives dans le secteur. Il est peu probable que la contamination en TCE dans le secteur puisse avoir été causée par des émissions antérieures aux années 1940, puisque la production industrielle du TCE a débuté peu avant cette période et que les activités industrielles dans le secteur Valcartier ont également débuté à cette époque. Selon les conditions utilisées lors des simulations du transport de masse de TCE, les résultats après 60 ans de transport représentent l'étendue maximale de la migration du TCE à partir des zones sources. Les résultats du transport de masse permettent d'identifier si ces émissions ont pu atteindre les milieux récepteurs, particulièrement les municipalités de Shannon et de Québec (Val-Bélair) ainsi que les puits d'alimentation de la Garnison Valcartier. Le transport de masse a permis de déterminer les conditions de transport de la contamination en TCE dissous et d'évaluer l'évolution de cette contamination.

4.2 MODÈLE CONCEPTUEL

Une fois que les objectifs de la modélisation sont définis, le développement d'un modèle conceptuel représentatif et complet est nécessaire pour assurer le succès des travaux de modélisation numérique. Le modèle conceptuel regroupe toute les informations utiles à la représentation des phénomènes physiques et chimiques à simuler. Selon les objectifs des travaux, la dimension du domaine de modélisation est d'abord déterminée. Le choix des conditions aux limites est inclus dans le modèle conceptuel. L'étude des données disponibles, principalement les données piézométriques, les propriétés des matériaux géologiques et les valeurs de recharge servent à définir le modèle conceptuel. Un modèle conceptuel ne cherche pas à inclure toutes les variations observées dans les données de terrain, il vise plutôt à simplifier et à synthétiser les résultats disponibles, sans pour autant rendre le problème trop simpliste (Anderson and Woessner, 1992). Les différentes étapes pour la définition du modèle conceptuel, sont les suivantes :

- 1) Délimiter le domaine de modélisation, ce qui implique le choix des conditions aux limites;
- 2) Définir les unités hydrostratigraphiques;
- 3) Établir le bilan d'eau;
- 4) Définir le système d'écoulement.

Le concept d'unités hydrostratigraphiques a été introduit par Maxey (1964) et Anderson et Woessner (1992) le définissent comme suit : les unités hydrostratigraphiques regroupent les unités géologiques de propriétés hydrauliques similaires.

4.2.1 APPROCHE DÉTAILLÉE POUR LE MODÈLE DE VALCARTIER

Pour le modèle d'écoulement et de transport de masse de Valcartier, les unités hydrostratigraphiques représentées sont : le sable deltaïque, le silt prodeltaïque, le silt argileux glaciomarin ainsi que le sable et gravier proglaciaire. Certaines simplifications ont été faites lors de l'assignation des unités hydrostratigraphiques dans le modèle.

Principalement, la couche silteuse prodeltaïque constitue un regroupement de plusieurs matériaux silto-argileux, soit une succession de matériaux granulaires passant de sable silteux à silt argileux. Le caractère régional de la modélisation et la complexité des variations observées dans les descriptions de forages recoupant cette unité exigeaient un regroupement de tous ces matériaux dans une seule unité hydrostratigraphique dans le modèle.

Aussi, l'unité de silt glaciomarin est moins bien caractérisée dans le secteur. Son absence a été présumée dans la partie nord du site puisqu'un nombre très faible d'observations sont disponibles, même dans les forages les plus profonds. Anderson et Woessner (1992) indiquent que la connaissance du milieu de déposition des matériaux à l'étude aide à définir le modèle conceptuel. Les caractéristiques du milieu de déposition de l'aquifère principal de sable deltaïque ont servi au développement du modèle conceptuel. Ceci a mené à l'intégration d'une zonation régionale des conductivités hydrauliques au sein de l'unité hydrostratigraphique, latéralement et en profondeur. Cette zonation a aussi été observée lors de l'analyse spatiale des données de conductivités hydrauliques obtenues avec les résultats des essais de perméabilité.

Pour établir le bilan en eau d'un système aquifère il faut identifier les apports et les pertes en eau dans le domaine de modélisation. La recharge par les précipitations, l'interaction des aquifères avec les eaux de surface (recharge et décharge) et les activités de pompage de l'eau souterraine

sont toutes des quantités d'eau qu'il faut évaluer initialement. Pour l'aquifère de Valcartier, la recharge a été estimée à partir de valeurs calculées avec les données de précipitations (Martel *et al.*, 2000). L'utilisation d'hydrogrammes de puits d'observation installés dans la nappe libre régionale et supérieure a aussi permis de quantifier la recharge. Les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface ont été considérées pour deux cours d'eau : la rivière Jacques-Cartier et la rivière Nelson. Les observations de terrain et l'importance de la rivière Jacques-Cartier démontrent que celle-ci constitue une importante zone de décharge de l'aquifère libre régional à l'ouest du secteur. Pour la rivière Nelson, l'interaction avec les eaux souterraines est variable et moins bien connue. L'observation de cette rivière sur le terrain indique que le cours d'eau est superficiel et le débit est bien inférieur à celui de la rivière Jacques-Cartier. Conceptuellement, ce cours d'eau draine en partie l'eau souterraine de la nappe libre supérieure (au-dessus de la couche de silt argileux) dans le secteur sud-est du modèle. Par contre à certains endroits, aucun silt argileux n'est présent dans la séquence stratigraphique, principalement au nord-est du secteur. La rivière Nelson est considérée en connexion hydraulique superficielle avec la nappe libre supérieure. Lorsque le silt argileux est présent, la rivière n'influence pas l'écoulement de l'eau souterraine dans la nappe semi-captive principalement au sud-est du modèle dans le secteur de l'arrondissement de Val-Bélair.

Plusieurs puits d'alimentation en eau potable à grand débit (capacités > 1000 m³/j) sont présents dans le secteur de Valcartier et subviennent aux besoins en eau potable du Ministère de la Défense Nationale. Historiquement, les puits P-2, P-4 et P-5 ont captés de grandes quantités d'eau souterraine dans l'aquifère deltaïque. Plus récemment, suite à la problématique de contamination par du TCE au puits P-5 et à la menace de contamination par la migration du TCE en direction du puits P-2, un nouvel ouvrage de captage a été mis en fonction; le puits P-7. Ces puits sont considérés dans le modèle conceptuel puisqu'ils exploitent des quantités importantes d'eau souterraine. Il existe de nombreux autres ouvrages de captage de l'eau souterraine dans le secteur de Valcartier. Ces ouvrages sont principalement des puits privés d'alimentation en eau potable dans les municipalités de Shannon et de Québec (arrondissement Val-Bélair). Étant donné les faibles débits d'exploitation de ces ouvrages, ceux-ci n'influencent que très localement l'écoulement de l'eau souterraine, ils ont donc été ignorés lors de la modélisation. Des ouvrages de captage à plus forts débits sont aussi présents dans le secteur sud-est à Val-Bélair. Cependant,

ces ouvrages sont à l'extérieur du domaine de modélisation et leur influence n'a pas été considérée dans le modèle conceptuel.

4.3 DOMAINE DE MODÉLISATION

Le secteur compris dans le modèle est situé entre la rivière Jacques-Cartier à l'ouest, le mont Brillant et l'arrondissement de Val-Bélair à l'est et le mont Rolland-Auger au sud. La limite nord du modèle est située à environ 500 m au nord du secteur des poudrières de la Garnison Valcartier. Puisque des ouvrages de pompage à forts débits d'exploitation sont actifs dans le domaine de modélisation, le maillage s'étend à une distance suffisamment grande des puits d'alimentation pour éviter que l'effet du pompage n'atteigne les limites du modèle. La figure 4.1 montre le domaine de modélisation vu en plan. La superficie totale du modèle est légèrement inférieure à $12\,500\,000\text{ m}^2$ ($12,5\text{ km}^2$). Le maillage s'étend sur environ 4500 m en direction est-ouest et sur environ 3300 m en direction nord-sud. La nature des limites imposées aux extrémités du modèle est décrite à la section 4.4.

4.3.1 MAILLAGE EN DEUX DIMENSIONS

Une fois les dimensions du maillage choisies, la discrétisation en deux dimensions est définie. Cette étape consiste à établir les dimensions des éléments triangulaires en plan qui découperont ce modèle et où des valeurs seront calculées numériquement. Ce maillage 2D est ensuite projeté en profondeur pour définir l'altitude des différentes couches représentant les unités hydrostratigraphiques comprises dans le modèle. La discrétisation établie dans le maillage 2D est utilisée pour construire chacune des couches. Il s'agit d'une étape importante puisqu'un niveau de discrétisation trop faible peut amener des difficultés lors de la convergence des équations à résoudre à chacun des éléments. Le maillage 2D a été développé avec des zones de discrétisation plus fines aux endroits où la charge ou la concentration sont susceptibles de varier plus rapidement. Ces zones discrétisées plus finement sont situées à proximité des puits d'alimentation (P-2, P-4, P-5 et P-7), où les plus petits côtés des éléments triangulaires planaires sont de 10 m et le long du panache de TCE dissous, où les plus petits côtés des éléments triangulaires sont de 15 m. Une discrétisation plus fine formée d'éléments de 15 m de côté est

aussi spécifiée en bordure de la couche silteuse prodeltaïque puisqu'un gradient hydraulique important doit être reproduit par le modèle dans ce secteur. Au total, le maillage 2D comporte 35 568 éléments dont les côtés varient de 10 m aux puits de pompage, jusqu'à 50 m de côté à la bordure extérieure du domaine de modélisation. Le maillage 2D est présenté à la figure 4.1 et il représente l'étendue du maillage en plan ainsi que la discrétisation du secteur inclus dans la modélisation.

4.3.2 MAILLAGE EN TROIS DIMENSIONS

À l'aide du maillage 2D, le maillage 3D est défini en projetant les différentes couches qui représentent les unités hydrostratigraphiques. Tel que mentionné préalablement, quatre unités hydrostratigraphiques sont incluses dans le modèle : le sable deltaïque, le silt prodeltaïque, le silt argileux glaciomarin ainsi que le sable et gravier proglaciaire. La complexité et la variabilité des recoupements et des épaisseurs de chacune des unités ont demandé une méthodologie précise et détaillée afin de construire le maillage 3D.

4.3.2.1 DÉFINITION DES UNITÉS HYDROSTRATIGRAPHIQUES

À l'aide des descriptions stratigraphiques nombreuses et détaillées, des coupes géologiques ont été construites dans tout le secteur de Valcartier, suivant plusieurs orientations. Sur cette base, une interprétation de la géométrie des différentes unités a été faite et des regroupements ont permis de définir les contacts entre chacune des unités le long de ces coupes géologiques. La première couche qui a été construite dans le modèle est celle qui représente le sol pour laquelle les courbes de niveaux topographiques et les valeurs d'altitude du sol (obtenues par arpentage) ont servi à l'interpolation des altitudes du terrain naturel sur tout le domaine.

La deuxième étape entreprise a été de construire la couche du modèle représentant la surface du roc. Les données de profondeur au roc, les coupes géologiques et l'interprétation manuelle aux endroits où les informations étaient moins denses ont permis de définir l'altitude de la surface du roc sur toute l'étendue du domaine. Une fois les couches représentant le sol et le roc construites, les différentes unités hydrostratigraphiques comprises dans le maillage 3D peuvent être définies.

L'approche préconisée a été de travailler en spécifiant les épaisseurs des unités et en ajoutant les valeurs d'épaisseurs en débutant par la base du modèle, c'est-à-dire à partir de la couche du maillage représentant le roc. L'approche par addition des épaisseurs a pour avantage d'éviter les intersections non-souhaitées entre les couches lorsque le maillage 3D est généré. Ainsi, les altitudes de l'unité proglaciaire ont été déterminées à partir des descriptions stratigraphiques, des coupes géologiques et à l'aide d'interprétation personnelle. Les épaisseurs interpolées de l'unité proglaciaire ont été ajoutées à la couche représentant le roc pour obtenir la couche de l'unité proglaciaire. Une épaisseur minimale de 1,5 m a été spécifiée pour l'unité proglaciaire à partir des observations de terrain.

Par la suite, la couche qui représente le silt argileux glaciomarin a été générée. Selon les observations stratigraphiques, cette couche n'est pas présente sur toute l'étendue du domaine de modélisation. Une épaisseur minimale de 50 cm a été assignée à la couche représentant le silt glaciomarin. Les zones où le silt argileux glaciomarin est absent ont été spécifiées une fois le maillage 3D complété en assignant les propriétés hydrauliques du matériel deltaïque sus-jacent par assignation de matériel dans le fichier de matériel du simulateur.

L'unité silteuse prodeltaïque est présente uniquement dans le secteur à l'est du domaine de modélisation. Les topographies inférieure et supérieure sont connues et selon la compréhension du contexte hydrostratigraphique, celle-ci revêt une grande importance au niveau de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de masse. Une approche particulière a été suivie pour inclure cette unité dans le maillage 3D. D'abord, les altitudes des surfaces supérieure et inférieure de la couche silteuse ont été déterminées à l'aide des descriptions stratigraphiques et des coupes géologiques. Les altitudes de la couche silteuse prodeltaïque ont été interpolées en spécifiant dans le reste du domaine de modélisation de « fausses » valeurs d'altitudes de 160 m. Une fois l'interpolation des altitudes complétée, les « fausses » valeurs d'altitudes de 160 m assignées au maillage ont été isolées et celles-ci ont été modifiées suivant une méthodologie différente pour la couche représentant les surfaces supérieure et inférieure de la couche silteuse prodeltaïque. Ces valeurs ont été remplacées par la valeur de la moyenne arithmétique entre l'altitude du sol et du roc pour la couche du maillage représentant la base de l'unité silteuse

prodeltaïque et par la somme de la moyenne arithmétique entre l'altitude du sol et du roc avec 50 centimètres pour la couche du sommet de l'unité de silt prodeltaïque. Une fois le maillage 3D généré, les propriétés des matériaux à l'extérieur de la zone où l'unité silteuse prodeltaïque est présente ont été modifiées en spécifiant les propriétés du sable deltaïque par sélection manuelle des éléments du maillage.

L'unité de sable deltaïque est la plus importante en terme d'épaisseur et d'étendue dans le maillage. À l'est, l'unité est recoupée par la couche silteuse prodeltaïque. Lorsque présente, l'unité est comprise généralement entre le sol et l'unité de silt argileux glaciomarin et jusqu'au sable et gravier proglaciaire lorsqu'absente. À l'est, l'unité est recoupée par l'unité formée de la couche silteuse prodeltaïque. Une fois le maillage 3D généré, l'unité deltaïque a été découpée en 16 zones de conductivités hydrauliques par sélection manuelle des éléments à partir de l'interpolation des résultats des essais de perméabilité (section 3.1.3). Les zones de conductivités hydrauliques sont divisées en profondeur en deux couches dans l'unité deltaïque. Les zones de conductivités hydrauliques au sein de l'unité deltaïque représentent les caractéristiques héritées du mode de déposition des sédiments.

4.3.2.2 DÉFINITION DU MAILLAGE 3D À PARTIR DE CHACUNE DES COUCHES

Le maillage en trois (3) dimensions a été défini en utilisant les couches de roc, de silt argileux glaciomarin, , de sable deltaïque recoupée par la couche silteuse prodeltaïque. L'approche utilisée pour générer le maillage 3D est de reproduire le maillage 2D plusieurs fois dans la direction verticale en partant de la base du domaine (contact entre les sédiments et les dépôts meubles) jusqu'au sommet du modèle qui est la surface du sol. La superposition de plusieurs « couches » du maillage 2D produit un maillage tridimensionnel. Une discrétisation verticale du maillage 3D a été spécifiée en tenant compte des gradients hydrauliques verticaux à reproduire lors des simulations : l'unité proglaciaire est divisée en 4 couches, le silt glaciomarin en 2 couches, l'unité deltaïque en 10 couches et l'unité silteuse prodeltaïque en 6 couches. Au total, le maillage est donc composé de 30 couches.

Le maillage comporte 1 067 040 éléments triangulaires. Le tableau 4.1 montre la distribution des éléments pour chacune des unités et des sous-unités. La discrétisation verticale plus fine se trouve dans les unités deltaïque et prodeltaïque. Ce choix s'explique par le fait que les équations représentant les saturations variables dans la partie supérieure du modèle demandent une plus grande discrétisation dans les premières couches du modèle (dans l'unité deltaïque). Une discrétisation plus fine favorise la convergence des équations lors des simulations. Cette condition s'applique aussi pour le transport de masse qui se fait principalement dans les unités deltaïques et prodeltaïque. La discrétisation verticale plus fine est aussi souhaitable afin de favoriser la convergence de la résolution numérique des équations de transport de masse. La figure 4.2 montre le modèle numérique en trois dimensions ainsi généré, de même qu'une section longitudinale dans le modèle illustrant la superposition du maillage 2D.

Une fois le maillage 3D défini par la projection du maillage 2D avec les altitudes respectives de chacune des couches et la division de chacune de celles-ci en sous-couches, un travail d'assignation des propriétés des matériaux a été entrepris. Tel que mentionné, certaines couches telles que celles représentant le silt glaciomarin et l'unité silteuse prodeltaïque ont été définies au départ sur toute l'étendue du modèle. Puis, par assignation de propriétés hydrauliques différentes, ces couches ont été modifiées et découpées. De la même façon, l'étude géostatistique réalisée avec les données de conductivités hydrauliques dans les sables deltaïques a démontré une zonation des conductivités hydrauliques. Le matériel deltaïque a été divisé en deux sous-unités : l'unité deltaïque supérieure et l'unité deltaïque inférieure. Neuf zones de conductivités hydrauliques divisent l'unité deltaïque supérieure tandis que sept zones de conductivités hydrauliques divisent l'unité deltaïque inférieure. Les figures 4.3 et 4.4 montrent la distribution de ces zones. Les zones plus à l'est sont caractérisées par des conductivités hydrauliques plus faibles que les zones à l'ouest du secteur.

4.4 DESCRIPTION DES CONDITIONS AUX LIMITES

4.4.1 CONDITIONS AUX LIMITES POUR LE MODÈLE D'ÉCOULEMENT

Les conditions aux limites du modèle sont spécifiées en bordure du domaine de modélisation ainsi qu'à la surface du maillage. Les limites doivent être assez éloignées des secteurs où des sollicitations sont appliquées dans le modèle, comme par exemple pour un puits d'alimentation. Les conditions aux limites doivent aussi être réalistes du point de vue hydraulique. Enfin, autant que possible, elles doivent être situées dans des secteurs où les points de contrôle sont assez nombreux et fiables pour s'assurer de la pertinence des conditions imposées. La figure 4.1 montre l'étendue horizontale du domaine modélisé sous forme de maillage en deux dimensions avec les différentes conditions aux limites spécifiées dans le modèle. Deux types de conditions aux limites sont présentes : type 1 (Dirichlet) qui sont les charges hydrauliques imposées; et type 2 (Neuman) pour la recharge et les limites à flux nuls. Des conditions limites distinctes sont assignées dans les deux aquifères séparés par la couche silteuse prodeltaïque, la nappe libre supérieure et la nappe semi-captive. Les conditions aux limites C, H, et K sont des charges imposées dans la nappe semi-captive avec des valeurs basées sur la carte piézométrique. Les conditions aux limites A, F, G, J, M, et N sont des charges imposées dans la nappe libre. Les limites A et F représentent respectivement les niveaux d'eau moyens dans les rivières Jacques-Cartier et Nelson tandis que les limites G, J, M et N sont basées sur la carte piézométrique. En imposant des charges dans les rivières, celles-ci jouent alors le rôle de « drains » vers lesquels l'eau souterraine aura tendance à converger. Enfin, les limites B, D, E, I, et L sont des limites à flux nuls. Les limites B, D, I et L représentent des lignes d'écoulement d'après la carte piézométrique et l'écoulement suit donc ces limites sans les traverser. Quant à la limite E, elle représente la limite physique de l'aquifère au contact du Mont Brillant. La dernière condition aux limites est la recharge qui est considérée constante lors des simulations et qui est appliquée uniformément à la surface du maillage, qui correspond à la surface du sol. La base du modèle reposant sur le socle rocheux sous-jacent est supposée imperméable. Le tableau 4.2 résume les conditions utilisées pour les limites.

4.4.2 CONDITIONS AUX LIMITES POUR LE TRANSPORT

Les sept sources potentielles de TCE dissous présentes dans le secteur Valcartier ont été intégrées dans le modèle. Les zones sources sont représentées dans le modèle par des plans d'où le TCE est émis. Le modèle ne tente donc pas de représenter la géométrie exacte des zones sources connues telles que le secteur 214 ou la lagune C. Dans le cas des ou de la zone source à RDDC Nord, leur nature exacte n'est pas encore définie. Les zones sources ont donc été positionnées dans le modèle de façon à représenter les émissions hors de RDDC Nord, sans tenter de représenter exactement les zones sources à cet endroit qui peuvent en fait être plus nombreuses que dans le modèle. Des concentrations imposées ont été assignées à chacune des sources dans le maillage. Les concentrations imposées sont toutes d'une valeur égale de 50 000 µg/L, qui est de l'ordre de la concentration maximale observée historiquement sur le terrain. Le choix de concentrations identiques pour chacune des sources amène la simulation de contributions équivalentes pour un volume équivalent d'eau contaminée. Il s'agit d'une simplification qui a pour objectif de quantifier les contributions relatives de chacune des sources lors de la formation du panache de TCE dans le modèle. L'objectif des simulations de transport de masse n'est pas de représenter les concentrations mesurées sur le terrain, mais simplement la morphologie générale du panache. De plus, nous ne disposons pas d'informations suffisantes pour distinguer les concentrations de chacune des zones sources, ni pour spécifier exactement quand ces zones sources ont commencé à émettre.

Les instabilités des solutions numériques de transport proviennent principalement de l'estimation des concentrations en amont lors de la résolution numérique et peuvent entraîner l'apparition de concentrations négatives (Zheng et Bennett, 2002). Pour certaines conditions, de la masse peut aussi être faussement introduite aux limites du modèle sans que l'utilisateur n'ait spécifié de concentrations ou de flux imposés. Pour éviter ce type de problème numérique lors des simulations de transport de masse avec le présent modèle, des conditions de flux de masse nul aux limites à charges constantes à l'entrée du modèle ont été spécifiées (secteur nord-est et sud). Un flux de masse nul a aussi été spécifié sur toute la surface supérieure du modèle pour éviter l'apport de masse en provenance de la surface du modèle via la condition de flux d'eau imposé qui représente la recharge de l'aquifère.

4.5 SIMULATEUR NUMÉRIQUE FRAC3DVS

Le simulateur numérique FRAC3DVS a été développé à l'Université de Waterloo principalement pour permettre la simulation de l'écoulement dans le roc en discrétisant les équations décrivant l'écoulement dans des réseaux de fractures discrètes. Le modèle résout aussi les équations de l'écoulement en conditions saturées et à saturations variables pour un milieu poreux. Les simulations peuvent être réalisées en régime transitoire ou permanent, en 1, 2 ou 3 dimensions (Therrien et Sudicky, 1996). Pour solutionner un système aquifère à saturations variables, les équations décrivant les phénomènes physiques qui contrôlent l'écoulement de l'eau souterraine doivent d'abord être définies. Ces équations représentent les relations entre la saturation, la perméabilité et la charge hydraulique dans l'aquifère. Le transport de masse est aussi représenté à l'aide d'équations simulant les processus qui le contrôle. Ensuite, une méthode numérique permet de résoudre les systèmes d'équations solutionnant l'écoulement de l'eau souterraine et le transport de masse pour un système aquifère donné. Les prochains paragraphes décrivent les équations résolues par le modèle FRAC3DVS pour simuler l'écoulement dans un milieu poreux ainsi que le transport de masse. La démarche est tirée et adaptée de Therrien et Sudicky (1996).

4.5.1 ÉQUATIONS REPRÉSENTANT L'ÉCOULEMENT À SATURATIONS VARIABLES DE L'EAU SOUTERRAINE EN TROIS DIMENSIONS

L'écoulement à saturations variables en régime transitoire pour un milieu poreux est représenté par l'équation de Richard (Cooley, 1983; Huyakorn et al., 1984):

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} k_{rw} \frac{\partial(\psi + z)}{\partial x_j} \right) \pm Q = \frac{\partial}{\partial t} (\theta_s S_w), i, j = 1, 2, 3 \quad (4.1)$$

Avec K_{ij} le tenseur de conductivité hydraulique saturé, $\psi = \psi(x_i, t)$ la charge de pression en fonction de la distance x et du temps t , z la charge d'élévation, $k_{rw} = k_{rw}(S_w)$ la perméabilité

relative du milieu poreux qui est fonction de la saturation en eau S_w , et θ_s la teneur en eau saturée (porosité). La relation qui associe la teneur en eau à la saturation est la suivante :

$$S_w = \frac{\theta}{\theta_s} \quad (4.2)$$

Pour résoudre l'équation non-linéaire 4.1, des relations constitutives sont développées pour relier la saturation en eau S_w à la charge de pression ψ qui constituent les inconnues de la relation (van Genuchten, 1980; Mualem, 1976).

$$S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha P_c)^n} \right]^m, m = 1 - \frac{1}{n} \text{ avec } 0 < m < 1 \quad (4.3)$$

La perméabilité relative à l'eau k_{rw} exprime la capacité du milieu poreux à permettre la circulation des fluides par rapport à son degré de saturation en eau :

$$k_{rw} = \sqrt{S_e} \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (4.4)$$

Les coefficients α et m sont obtenus à partir de l'ajustement des équations 4.3 et 4.4 à des observations expérimentales. Des valeurs typiques de ces coefficients pour différents matériaux sont disponibles dans une compilation de Carsel et Parrish (1988).

Les autres variables de l'équation 4.3 et 4.4 sont :

P_c : pression capillaire ($P_c = -\psi$)

S_e : $(S_w - S_{wr}) / (1 - S_{wr})$ saturation effective en eau

S_{wr} : saturation en eau résiduelle

L'écoulement à saturations variables dépend du degré de saturation du milieu poreux. En terme très général, lorsque le système est constitué de deux fluides dont l'air et l'eau, l'écoulement de

l'eau est facilité avec l'augmentation de la saturation en eau. L'écoulement est maximal en condition de saturation complète, i.e. lorsque $S_w = 1$.

4.5.2 ÉQUATIONS REPRÉSENTANT LE TRANSPORT DE SOLUTÉ EN TROIS DIMENSIONS

Le simulateur FRAC3DVS permet aussi de simuler le transport d'un soluté dans un milieu poreux à saturations variables.

L'équation de Bear (1972) représente le transport en trois dimensions pour un milieu à saturations variables.

$$\theta_s S_w R \frac{\partial c}{\partial t} + q_i \frac{\partial c}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta_s S_w D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) + \theta_s S_w R \lambda c = 0, i, j = 1, 2, 3 \quad (4.5)$$

Avec

$c = c(x_i, t)$: la concentration du soluté (M/L^3)

D_{ij} : coefficient de dispersion hydrodynamique (L)

λ : constante de dégradation du premier ordre ($1/T$)

La relation décrivant le retard (R) du soluté est tirée de Freeze et Cherry (1979) :

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta_s S_w} K_d \quad (4.6)$$

Avec

ρ_b : densité globale sèche du matériel (M/L^3)

K_d : coefficient de distribution

Le terme de flux q_i de l'équation 4.5 est défini par l'équation de Darcy généralisée pour l'écoulement à saturation variable :

$$q_i = -K_{ij} k_{rw} \frac{\partial(\psi + z)}{\partial x_j} \quad (4.7)$$

tandis que la dispersion hydrodynamique est définie par l'équation suivante (Bear, 1972) :

$$\theta_s S_w D_{ij} = (\alpha_l - \alpha_t) \frac{q_i q_j}{|q|} + \alpha_t |q| \delta_{ij} + \theta_s S_w \tau D_d \delta_{ij} \quad (4.8)$$

Avec les variables définies comme suit :

α_l : dispersivité latérale (L)

α_t : dispersivité transversale (L)

τ : tortuosité de la matrice

D_d : Coefficient de diffusion du soluté dans l'eau (L^2/T)

δ_{ij} : Delta de Kronecker

4.5.3 RÉOLUTION NUMÉRIQUE DE L'ÉQUATION DE L'ÉCOULEMENT À SATURATIONS VARIABLES

La méthode de résolution numérique de l'équation à saturation variable (équation 4.1) est basée sur la méthode des volumes de contrôle par éléments finis (Kropinski, 1990; Forsyth, 1991). Cette méthode permet de solutionner par itérations en suivant la méthode de linéarisation de Newton-Raphson (Forsyth et Simpson, 1991). Ensuite, la matrice d'équations linéaires est solutionnée à l'aide du solveur préconditionné ORTHOMIN.

En premier lieu, une fonction d'approximation de la charge de pression est définie de la façon suivante : x_i ($i = 1, 2, 3$) représente les coordonnées spatiales, tandis que I et J sont les indices des nœuds allant de 1 à n , n étant le nombre de nœuds. La même approche d'approximation est utilisée pour estimer la saturation en eau :

$$\psi(x_i, t) = \sum_J N_J(x_i) \psi_J(t) \quad (4.9)$$

L'équation de Richard (équation 4.1) est discrétisée à l'aide de la technique de Galerkin (Huyakorn et Pinder, 1983).

$$\int_V \left(\frac{\partial}{\partial x_i} \left[K_{ij} k_{rw} \frac{\partial(\psi + z)}{\partial x_j} \right] + Q - S_s S_w \right) N_I dV = 0, I = 1, \dots, n \quad (4.10)$$

En considérant que l'équation est appliquée au nœud I et que le temps est discrétisé en suivant la technique des différences finies, la relation suivante est obtenue :

$$\int_V \left(S_s S_w \frac{\partial \psi}{\partial t} + \theta_s \frac{\partial S_w}{\partial t} \right) N_I dV = \left(S_s S_w^{L+1} \frac{(\psi^{L+1} - \psi^L)}{\Delta t} + \theta_s \frac{(S_w^{L+1} - S_w^L)}{\Delta t} \right) \int_V N_I dV \quad (4.11)$$

avec V le volume de contrôle associé au nœud I, L le temps et Δt le pas de temps. Avec l'application du théorème de la divergence au terme gauche de l'équation 4.10 et en appliquant la loi du flux de Darcy dans un milieu poreux, l'équation suivante est obtenue :

$$\int_V \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K_{ij} k_{rw} \frac{\partial(\psi + z)}{\partial x_j} \right] N_I dV = - \int_V K_{ij} k_{rw} \frac{\partial(\psi + z)}{\partial x_i} \frac{\partial N_I}{\partial x_i} dV + \int_B q^* N_I dB \quad (4.12)$$

En discrétisant l'équation d'écoulement à saturation variable pour un nœud I, la relation devient :

$$\left(S_s S_w \frac{(\psi^{L+1} - \psi^L)}{\Delta t} + \theta_s \frac{(S_w^{L+1} - S_w^L)}{\Delta t} \right) V_I = \sum_{J \in \eta_I} (\gamma_{IJ} \lambda_{IJ} \Gamma_{IJ})^{L+1} + Q_I^{L+1} \quad (4.13)$$

le terme droit de l'équation 4.13 est relié à V_I , le volume d'influence au nœud I

$$V_I = \int_V N_I dV \quad (4.14)$$

avec le terme Γ_{IJ} étant une quantité nodale dépendante de la charge de pression et d'élévation :

$$\gamma_{IJ} = (\psi_J + z_J - \psi_I - z_I) \quad (4.15)$$

La pondération en amont est appliquée avec Γ_{IJ} considéré comme une valeur pondérée de la perméabilité relative, il en résulte la valeur λ_{IJ} . La pondération en amont assure une meilleure stabilité de la solution :

$$\begin{aligned} \lambda_{IJ} &= k_{rwJ} \text{ si } \Gamma(\psi_J + z_J - \psi_I + z_I) > 0 \\ \lambda_{IJ} &= k_{rwI} \text{ si } \Gamma(\psi_J + z_J - \psi_I + z_I) < 0 \end{aligned} \quad (4.16)$$

Avec :

$$\Gamma_{IJ} + K_{IJ} \int_V \frac{\partial N_J}{\partial N_J} \frac{\partial N_I}{\partial N_I} dv \quad (4.17)$$

Le terme Q de sources et pertes dans le domaine est défini par la relation suivante :

$$Q_I = \int_V Q N_I dv \quad (4.18)$$

Afin de linéariser l'équation 4.13, la technique d'approximation numérique de Newton-Raphson est utilisée (Huyakorn et Pinder, 1983) :

$$f_I^r = \left(S_s S_w^r \frac{(\psi^r - \psi^L)}{\Delta t} + \theta_s \frac{(S_w^r - S_w^L)}{\Delta t} \right) v_I - \sum_{J \in \eta_I} (\gamma_{IJ} \lambda_{IJ} \Gamma_{IJ})^r + Q_I^r \quad (4.19)$$

Avec r qui représente l'étape à laquelle se situe le processus itératif. L'application de la méthode de Newton-Raphson à l'équation précédente amène la création de la matrice suivante :

$$F_{IJ}^r \Delta \psi_J^{r+1} = -f_I^r \quad (4.20)$$

Finalement, le Jacobien de la matrice est défini avec :

$$F_{IJ}^r = \frac{\partial f_I^r}{\partial \psi_J^R} \quad (4.21)$$

Le processus itératif continue jusqu'à l'atteinte du critère de convergence des charges de pression à chacun des nœuds du maillage $\Delta \psi_J^{r+1}$. La convergence de la solution numérique est aussi assurée par le suivi de l'évolution du résidu f_I^r . Puisque la méthode de Newton-Raphson demande de calculer le Jacobien de la matrice, le temps de calcul peut devenir important. Dans le simulateur FRAC3DVS, le Jacobien est estimé numériquement (Kropinski, 1990; Forsyth et Simpson, 1991). Les éléments à géométrie simple utilisés lors de la discrétisation permettent l'utilisation de la méthode des coefficients d'influence pour résoudre analytiquement les intégrales de l'équation 4.12 (Frind, 1982; Huyakorn *et al.*, 1984). Le solveur ORTHOMIN sert à résoudre le système d'équations final et il est basé sur une factorisation ILU de la matrice qui est ensuite résolue par l'élimination de Gauss.

4.5.4 RÉOLUTION NUMÉRIQUE DE L'ÉQUATION DU TRANSPORT DE SOLUTÉ DANS UN MILIEU POREUX À SATURATIONS VARIABLES

L'équation de transport (équation 4.5) est linéaire et pour la solutionner, la procédure basée sur la méthode de Galerkin nommée *time-marching* est utilisée (Huyakorn et Pinder, 1983). Tout comme pour la solution de l'écoulement, un bilan de masse est effectué pour s'assurer de l'exactitude de la solution.

Les équations de transport sont solutionnées par le même solveur pré conditionné ILU ORTHOMIN (Behie and Forsyth, 1984).

4.6 CRITÈRES DE CONVERGENCE SPÉCIFIÉS POUR LE MODÈLE DE VALCARTIER

Divers critères et paramètres peuvent être ajustés pour contrôler la convergence de simulations d'écoulement de l'eau souterraine lors de l'utilisation de FRAC3DVS. Ces critères permettent d'atteindre un certain niveau de précision pour la solution obtenue tout en contrôlant le temps des simulations. Un bon contrôle des paramètres de convergence permet donc de faire un compromis entre la précision et le temps de calcul. Le détail des divers critères existants pour contrôler les simulations avec FRAC3DVS est présenté dans le manuel du simulateur (Therrien *et al.*, 2001)

4.6.1 SIMULATIONS DE L'ÉCOULEMENT

Deux types de critères de convergence doivent être spécifiés dans le fichier de commandes lors des simulations de l'écoulement de l'eau souterraine avec FRAC3DVS. Le premier critère est celui du *solveur* de l'écoulement. Ce critère a été fixé à 10^{-7} pour les simulations avec le modèle de Valcartier. Lors des simulations de l'écoulement à saturations variables, deux autres critères de convergence doivent être spécifiés, le critère de convergence absolue de Newton et un critère de convergence du résiduel de la méthode de Newton. Pour les simulations, ces deux critères ont été fixés à 10^{-4} . Cette valeur est plus élevée que les valeurs couramment spécifiées, mais puisque le maillage comporte un nombre important d'éléments, un plus faible critère amènerait un temps de simulation trop important. De plus, l'étude des bilans de masse indique que la convergence était atteinte lors des simulations.

L'épsilon du Jacobien a été fixé à une valeur de 0,0016. Dans le manuel de FRAC3DVS (Therrien *et al.*, 2001), il est recommandé d'utiliser une valeur égale à environ 10^{-5} fois la charge de pression dans le modèle. Le dernier paramètre qui a été précisé dans le fichier de commande lors des simulations est le facteur de relaxation (*underrelaxation factor*). L'option de calcul du facteur de relaxation, *compute underrelaxation factor*, a été utilisée et une limite de 500 a été assignée avec la commande *compute underrelaxation factor limit*.

4.6.2 SIMULATIONS DU TRANSPORT DE MASSE

Le critère de convergence de la simulation de transport a été fixé à 1×10^{-10} . La convergence est obtenue lorsque l'erreur maximale résiduelle absolue de la solution de transport atteint cette valeur (Therrien *et al.*, 2001). Des valeurs plus grandes pour le critère de convergence ont été testées, mais le bilan de masse de la solution de transport montrait alors des pourcentages d'erreur importants. Les simulations de transport de masse ont été réalisées avec une pondération en amont des vitesses d'écoulement à l'aide de l'option de FRAC3DVS *upstream weighting of velocities*.

4.7 AUTRES OUTILS INFORMATIQUES UTILISÉS

4.7.1 INTERFACE GRAPHIQUE *GROUNDWATER MODELING SYSTEM*

Le logiciel GMS a servi d'interface graphique pour la construction du maillage représentant le système aquifère de Valcartier. Ce logiciel a été développé par Brigham Young University (BYU, 2000) pour le Département de la Défense Américaine. La version 3.1 du logiciel a été utilisée dans le cadre de ce projet. GMS comporte des outils géostatistiques qui permettent la création de surfaces représentant les différentes unités hydrostratigraphiques présentes dans le modèle. La discrétisation des éléments est spécifiée dans le logiciel ponctuellement ou le long d'un segment afin de définir les zones pour lesquelles un maillage plus fin est nécessaire. Ce logiciel a aussi servi à assigner les conditions aux limites une fois le maillage construit. Il est à noter que FRAC3DVS comporte des fonctionnalités qui permettent d'utiliser certains fichiers provenant directement de GMS ou suite à quelques modifications mineures.

4.7.2 LOGICIEL DE VISUALISATION TECPLOT

FRAC3DVS génère un ensemble de fichiers de sortie une fois la simulation numérique complétée. Ces fichiers peuvent être consultés dans un éditeur de texte ou dans un tableur. Cependant, ces données doivent aussi être analysées et représentées graphiquement en trois dimensions pour bien comprendre les résultats des simulations numériques. Deux choix sont alors possibles lorsque FRAC3DVS est utilisé, un exécutable permet de traduire les fichiers de

sortie en fichiers lisibles par GMS ou par TECPLOT. Le logiciel TECPLOT (Amtec Engineering, Inc., 2001) est un logiciel de visualisation de données utilisé dans plusieurs domaines scientifiques. Il permet une visualisation rapide, efficace et avancée des données provenant, entre autre, de simulations numériques. Le fichier généré par FRAC3DVS est lisible dans TECPLOT et comporte les informations suivantes: la position en X et en Y, l'élévation en Z, la numéro de matériel, la charge hydraulique, la saturation, la composante en X, Y et Z de la vitesse, et quand du transport de masse a été effectué, la concentration en TCE. Le maillage en 3 dimensions peut être exploré dans TECPLOT par des coupes transversales, longitudinales et selon une élévation fixe. Cet outil permet donc de s'assurer de la cohérence des résultats provenant des diverses simulations numériques. De plus, des fonctions de TECPLOT permettent d'effectuer du traçage de particules en tout point du domaine d'écoulement modélisé. Des contours et des isosurfaces peuvent aussi être générés pour toutes les données disponibles.

4.8 CALAGE DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT

Afin de s'assurer que le modèle représente bien le système aquifère étudié, le calage du modèle est fait en modifiant les paramètres pour permettre de minimiser l'écart entre les charges hydrauliques simulées et les charges hydrauliques mesurées. Le calage d'un modèle se fait en ajustant les paramètres du modèle simulé pour s'approcher de l'ensemble des données mesurées, jusqu'à l'atteinte d'une cible de calage. Les valeurs de charges hydrauliques simulées pour plusieurs points d'observation sont écrites dans le fichier de résultats afin de vérifier l'effet des différentes modifications des paramètres du modèle sur l'évolution de l'erreur. Au total, 582 points d'observation ont été inclus dans le modèle afin de comparer les charges hydrauliques mesurées et simulées. Ces points d'observation correspondent aux différents puits d'observation présents dans le secteur Valcartier. Le calage du modèle numérique du secteur Valcartier a été effectué en faisant varier les trois paramètres suivants, selon une démarche d'essais et erreurs :

- Propriétés des matériaux : conductivités hydrauliques (K_x , K_y et K_z pour chacune des zones de conductivités hydrauliques);
- Recharge : valeur de la recharge appliquée à la surface du maillage;

- Paramètres représentant les saturations variables : paramètres de van Genuchten (1980) décrivant les propriétés capillaires des matériaux selon la saturation en eau.

Avant de procéder au calage d'un modèle, un objectif de calage doit être établi. Dans le cas du présent modèle, une erreur RMS (*root mean square*) correspondant à moins de 5% de l'écart maximum de la charge hydraulique pour tout le modèle était le critère de calage. Les charges hydrauliques dans le domaine modélisé varient entre 175 m et 156.5 m, pour un écart maximum de 18,5 m. Le critère d'erreur indiquant un modèle bien calibré est donc environ de 1 m d'erreur RMS (plus précisément 0,925 m).

Le tableau 4.2 résume les paramètres utilisés dans le modèle calé. La figure 4.5 fait la représentation graphique de la comparaison entre les charges mesurées et simulées et permet de visualiser l'erreur du modèle en fonction des charges hydrauliques. Ce graphique montre que, généralement, le modèle représente de façon satisfaisante les observations de terrain. En effet, les différentes erreurs du modèle calé par rapport aux charges hydrauliques mesurées sont de 0,3 m pour l'erreur moyenne, une erreur absolue de 1,21 m et une erreur RMS de 1,41 m.

4.8.1 CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES

Dans le modèle de Valcartier, 19 zones de conductivités hydrauliques sont définies, dont 16 zones uniquement pour représenter la variation des conductivités hydrauliques au sein de l'unité deltaïque. Lors du calage du modèle, les conductivités hydrauliques initiales ont été modifiées pour atteindre le critère d'erreur minimale fixée au départ. Lors de l'application de la méthode de calage par essais et erreurs, il est important de s'assurer que les valeurs spécifiées dans le modèle demeurent réalistes par rapport aux conductivités hydrauliques mesurées sur le terrain.

L'étude de l'effet du changement des conductivités hydrauliques sur les charges hydrauliques simulées lors du calage du modèle d'écoulement a grandement facilité l'atteinte du critère d'erreur. Généralement, l'augmentation des conductivités hydrauliques dans l'unité deltaïque amène une diminution des charges hydrauliques simulées. L'augmentation de la conductivité hydraulique de l'unité proglaciaire amène aussi une diminution des charges hydrauliques

simulées. Les modifications de la conductivité hydraulique de l'unité silteuse prodeltaïque ont permis de représenter le gradient hydraulique vertical à travers le silt. Pour atteindre cet objectif, une conductivité hydraulique plus faible que la valeur initiale a dû être spécifiée à l'unité silteuse prodeltaïque. Lors des dernières simulations, une attention particulière a été portée à l'unité deltaïque dans le secteur ouest du modèle. Dans ce secteur, le modèle sous-estime légèrement la charge hydraulique tel que montré dans la moitié gauche de la figure 4.8. L'ajustement des conductivités hydrauliques de l'unité deltaïque dans le secteur a permis de minimiser l'erreur en un endroit spécifique du domaine de modélisation.

Les valeurs de conductivités hydrauliques assignées dans le modèle calé pour l'unité deltaïque varient entre $3,0 \times 10^{-6}$ m/s et $3,0 \times 10^{-4}$ m/s. La conductivité hydraulique de l'unité proglaciaire dans le modèle calé est de $3,0 \times 10^{-4}$ m/s. Les valeurs de conductivités hydrauliques verticales K_z assignées dans les unités deltaïque et proglaciaire sont d'un ordre de grandeur plus petites que les conductivités hydrauliques horizontales K_x et K_y . Ces valeurs varient donc entre $3,1 \times 10^{-7}$ m/s et $3,0 \times 10^{-5}$ m/s. La conductivité hydraulique horizontale de l'unité de silt glaciomarin est de $5,0 \times 10^{-5}$ m/s et la conductivité hydraulique verticale est de 5×10^{-6} m/s. Initialement la valeur de conductivité hydraulique du silt glaciomarin était beaucoup plus faible, mais cette valeur a dû être augmentée considérablement lors du calage du modèle numérique. La continuité de la couche a probablement été surestimée dans le modèle conceptuel. La valeur de conductivité hydraulique calée représente donc une valeur effective de ce paramètre. Pour la couche silteuse prodeltaïque, la conductivité hydraulique horizontale assignée dans le modèle calé est de $1,0 \times 10^{-7}$ m/s tandis que la conductivité hydraulique verticale est de 1×10^{-9} m/s. La conductivité hydraulique verticale de la couche silteuse prodeltaïque est de deux ordres de grandeur plus petite que la conductivité hydraulique horizontale afin de bien représenter les gradients hydrauliques verticaux observés à travers la couche silteuse prodeltaïque entre la nappe libre supérieure et la nappe semi-captive, principalement à RDDC Nord et sur les terrains de SNC TEC. Puisque la couche silteuse prodeltaïque est constituée de couches de matériaux variables, il est normale qu'elle ait une forte anisotropie entre les propriétés horizontales et verticales.

4.8.2 RECHARGE

La valeur de recharge estimée initialement est d'environ 250 mm/an (Martel *et al*, 2000). Après le calage, une recharge de 350 mm/an a été spécifiée au modèle. Dans le contexte particulier de l'aquifère de Valcartier, ce taux de recharge est réaliste. En effet, le contexte topographique amène en quantité l'eau de ruissellement provenant des monts Rolland-Auger et Brillant, qui contribue à la recharge du système aquifère. Lors du calage, le taux de recharge a donc été initialement spécifié à 250 mm/an, puis à 300 mm/an et enfin à 350 mm/an pour le modèle calé. L'effet du changement de la valeur de recharge lors des simulations est l'augmentation générale des charges hydrauliques simulées.

4.8.3 PROPRIÉTÉS CAPILLAIRES DE MATÉRIAUX

L'assignation des propriétés capillaires des matériaux est importante pour s'assurer que les simulations de l'écoulement à saturations variables représentent les saturations présentes dans les matériaux du modèle. Le simulateur FRAC3DVS permet de simuler des conditions de saturations variables. Les paramètres nécessaires à ces simulations sont spécifiés dans le fichier de matériaux *mprops*. Il est possible de spécifier des valeurs tabulées décrivant la relation entre la saturation en eau et la charge de pression ainsi que la relation entre la perméabilité relative à l'eau et la saturation en eau. Des valeurs tabulées ont été spécifiées pour l'unité silteuse prodeltaïque et de silt glaciomarin en prenant des valeurs semblables à celles utilisées dans des travaux de modélisation dans un autre secteur de la Garnison Valcartier (Mailloux, 2002). Les propriétés capillaires des sables deltaïque et proglaciaire ont été spécifiées en indiquant les paramètres des relations développées pour décrire la saturation en fonction de la charge de pression (van Genuchten, 1980) et une valeur de saturation en eau résiduelle. Le tableau 4.2 indique les propriétés capillaires spécifiées dans le modèle numérique calé.

Lors des premières simulations, des valeurs tabulées étaient spécifiées initialement pour tous les matériaux présents dans le modèle. Des problèmes de convergence ont alors été rencontrés. Dans le but d'éviter ces problèmes de convergence, des valeurs de α (alpha), β (bêta) et γ (gamma), ainsi que S_{wr} (saturation en eau résiduelle) ont été assignées pour les matériaux sableux. Encore

une fois, des problèmes de convergence se sont présentés. En conservant les mêmes valeurs de paramètres capillaires, mais en sélectionnant l'option de FRAC3DVS qui permet d'utiliser la relation de Brooks et Corey (1964) pour calculer la relation entre la saturation en eau et la charge de pression, les problèmes de convergence ont été résolus. Les saturations en eau simulées dans le modèle calé se distribuent correctement dans le modèle. Généralement, les premiers mètres du maillage sont à saturation résiduelle, la saturation en eau augmente ensuite progressivement dans la franche capillaire, pour atteindre une saturation en eau complète dans l'aquifère.

Dans le secteur sud-est du modèle où les épaisseurs du maillage sont plus faibles et où surtout les conductivités hydrauliques sont moins grandes, les premiers mètres du modèle montrent des saturations en eau plus grandes que la saturation résiduelle. Une attention particulière a été portée lors du calage pour s'assurer que ce secteur plus sensible ne soit pas complètement saturé en eau. D'ailleurs, des modifications aux conductivités hydrauliques ont été effectuées lors du calage pour abaisser quelque peu les saturations en eau simulées dans les premières couches du modèle de ce secteur.

4.8.4 POINT SINGULIER D'ÉCOULEMENT DE L'EAU SOUTERRAINE

Lors du calage du modèle d'écoulement, l'objectif principal est de minimiser l'erreur entre les charges hydrauliques simulées et les charges hydrauliques mesurées. Cependant, le modèle a été calé non seulement en tenant compte de l'erreur entre les simulations et les observations, mais aussi en comparant les patrons d'écoulement simulés et observés à des endroits précis et sensibles sur le site. Le panache de contamination en TCE du secteur Valcartier procure une information exceptionnelle sur les directions d'écoulement à partir des zones sources de contamination. Cette information a été particulièrement importante pour bien caler le modèle par rapport aux conditions d'écoulement indiquées par le panache de contamination dans le secteur 214 de SNC TEC et à RDDC Nord. Pour le cas de Valcartier, la présence d'un panache de TCE dissous constitue en quelque sorte un « essai de traceur » à grande échelle qui doit être représenté par le modèle. De plus, puisque certaines zones sources chevauchent la ligne de partage des eaux, il est important que le modèle puisse reproduire correctement l'écoulement de l'eau souterraine à proximité de cette ligne.

La position du point singulier de l'écoulement de l'eau souterraine a donc été considérée en détail dans le processus de calage du modèle d'écoulement du secteur Valcartier. Ce point singulier est l'endroit sur la ligne de partage des eaux souterraines où l'écoulement converge à la fois du nord et du sud pour ensuite diverger vers l'ouest et l'est. Ce point est situé entre les propriétés de RDDC Nord et de SNC TEC. Ainsi, dans le processus de calage du modèle, une fois que l'erreur RMS s'est approchée de la valeur du critère de 1 m, les conditions aux limites ont ensuite été légèrement modifiées pour pouvoir représenter correctement le patron d'écoulement à partir des zones sources de RDDC Nord et de SNC-TEC. La position du point singulier a aussi une influence importante sur le temps de transport du TCE puisqu'à proximité de la ligne de partage des eaux souterraines, les vitesses d'écoulement de l'eau souterraine sont généralement beaucoup plus faibles qu'ailleurs dans l'aquifère.

4.8.5 BILAN VOLUMÉTRIQUE DU MODÈLE CALÉ ET TEMPS DE SIMULATION

Plus d'une centaine de simulations de l'écoulement de l'eau souterraine ont été réalisées au cours du processus de calage du modèle numérique. Le temps de simulation varie en fonction du type des changements apportés au modèle de la précédente simulation. Pour faciliter la convergence des solutions numériques, les charges initiales d'une simulation utilisaient les charges simulées de la simulation précédente dans un fichier de départ (*.hin*). Les temps de simulation de l'écoulement de l'eau souterraine sont très variables passant d'environ 10 à 50 minutes avec un ordinateur Pentium IV doté de 600 mega-octets de mémoire vive (Random Access Memory). Les changements importants des conditions aux limites de premier type exigent un plus grand temps de simulation pour converger.

Un modèle calé doit avoir un bilan en eau équilibré entre les apports et les pertes. Les fichiers de sortie de FRAC3DVS contiennent des informations des bilans de masse calculés lors de la convergence de la solution numérique. Le bilan en eau est fonction des critères de convergence mais aussi du modèle conceptuel développé. Un bilan en eau montrant plus de 0,1% de différence entre les apports et les pertes peut indiquer des problèmes de convergence mais une valeur jusqu'à 1% de différence est considérée acceptable (Konikow, 1978; Anderson et Woessner, 1992). Le tableau 4.3 indique les différents apports et pertes pour le modèle calé de

Valcartier. La différence est de $1,27 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ($10,97 \text{ m}^3/\text{an}$), soit en pourcentage une différence de 0,016 %. Le bilan de masse respecte le critère de 0,1% de différence entre les apports et les pertes en eau dans le système. Cependant, des valeurs beaucoup plus faibles sont rapportées dans certaines études de modélisation numérique utilisant FRAC3DVS (Lepage, 1996; Larose-Charette, 2000). Un meilleur bilan de masse aurait pu être atteint en spécifiant des critères de convergence plus petits pour atteindre la convergence de la solution numérique. Par contre, les temps de simulation auraient été beaucoup plus grands, ce qui aurait limité le nombre de simulations possibles lors du processus de calage du modèle. Le compromis a donc été d'accepter le bilan de masse à cette valeur et de pouvoir procéder à un nombre plus grand de simulations pour un temps donné.

4.9 ÉTUDE DE SENSIBILITÉ DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT

Une étude de sensibilité des paramètres ayant servi au calage du modèle permet d'identifier les paramètres qui ont le plus d'influence sur la solution obtenue. Cet exercice permet aussi de s'assurer que la solution calée est bien celle pour laquelle l'erreur est minimale. L'étude de sensibilité est réalisée en changeant systématiquement un paramètre de calage à la fois et en comparant les diverses solutions obtenues pour les simulations faites avec ces différentes valeurs du paramètre. Le tableau 4.4 documente les paramètres et conditions aux limites modifiés lors de l'étude de sensibilité du modèle.

4.9.1 SENSIBILITÉ AUX CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES ET À LA RECHARGE

En premier lieu, une analyse de sensibilité a été faite en faisant varier la recharge et les conductivités hydrauliques. La valeur calée de recharge étant de 350 mm/an, les valeurs de 200, 250, 300, 400 et 450 mm/an ont été utilisées dans l'étude de sensibilité. Ces valeurs correspondent aux recharges normales d'une nappe libre au Québec dans un contexte hydrogéologique similaire au secteur Valcartier. Ensuite, les valeurs de conductivités hydrauliques ont été modifiées simultanément pour toutes les zones de plus 10%, 20% et 30 % et de moins de 10%, 20%, 30%, 40% . L'évolution de l'erreur pour ces deux analyses de sensibilité est présentée graphiquement pour chacun des cas à la figure 4.6. Les graphiques montrent bien

que la recharge de 350 mm en combinaison avec les conductivités hydrauliques du modèle calé minimise l'erreur moyenne, absolue et RMS. Ceci indique que le modèle est bien calé selon les paramètres de recharge et de conductivité hydraulique.

4.9.2 SENSIBILITÉ AU CHANGEMENT DES CONDITIONS AUX LIMITES

La deuxième étape de l'étude de sensibilité a été de vérifier l'effet du changement des charges hydrauliques imposées aux limites du modèle. Les conditions aux limites pour 5 cas différents ont été diminuées de 0.5 m, 1 m, 1.5 m et 2 m et augmentées de la même façon. L'évolution de l'erreur obtenue pour ces cas à la figure 4.7 montre que les différentes conditions aux limites testées minimisent généralement l'erreur RMS. Seuls les changements aux limites A+M+N montrent qu'une valeur plus élevée des charges hydrauliques imposées à celles-ci aurait minimisé l'erreur RMS. Cependant, l'effet de cette limite sur le patron d'écoulement de l'eau souterraine dans le modèle était important et le changement de cette valeur déplaçait significativement la ligne de partage de eaux et rendait la solution moins représentative dans le secteur des zones sources. Cette limite a donc été fixée à la valeur retenue lors du calage initial du modèle. Le tableau 4.5 décrit l'effet des différentes conditions aux limites du modèle sur l'écoulement simulé et les compromis réalisés.

Tel que discuté précédemment, la position du point singulier de convergence de l'écoulement est d'une grande importance pour bien représenter les directions d'écoulement de l'eau souterraine dans les zones sources de TCE. La position du point singulier a été vérifiée pour les différents cas simulés en changeant les charges imposées aux limites. Ceci nous a démontré la grande sensibilité de la position du point singulier par rapport aux conditions imposées aux limites. Le modèle calé final s'est révélé un bon compromis par rapport aux choix des conditions aux limites du modèle pour permettre à la fois de bien représenter la position du point singulier ainsi que de minimiser l'erreur entre les charges hydrauliques mesurées et simulées. La figure 4.8 montre la distribution en plan de l'erreur sur les charges hydrauliques pour l'ensemble du modèle calé. On constate que l'erreur est très faible dans le secteur le plus critique où sont localisées les zones sources de contamination à RDDC Nord et dans le Secteur 214. Cependant, un compromis a dû être fait dans les conditions aux limites de sorte que l'erreur est plus grande dans la partie ouest du modèle ainsi que dans la partie nord-est. Cette erreur a moins de conséquence sur les

prédictions faites par le modèle qu'une divergence qui aurait pu être localisée près des zones sources de contamination.

4.10 SIMULATION DU TRANSPORT DE MASSE

4.10.1 APPROCHE ET SIMPLIFICATIONS

Des simulations de transport de masse ont été complétées à l'aide du modèle numérique afin de vérifier si les sources identifiées lors des différentes phases de caractérisation environnementale sont suffisantes pour générer un panache de contamination comparable à celui observé sur le terrain. Le transport de masse sert aussi à définir la contribution respective des principales zones sources à la contamination de milieux récepteurs.

Pour les simulations du transport, cinq zones sources ont d'abord été spécifiées dans le modèle. Le tableau 4.6 indique la position de chacune des zones sources qui sont aussi montrées sur les figures illustrant les résultats des simulations du transport (figures 4.20 à 4.23). La simulation du transport n'a pas considéré toutes les zones sources potentielles identifiées dans le secteur Valcartier, mais uniquement un nombre restreint représentatif des localisations les plus susceptibles d'être à l'origine de la contamination en TCE. Ces sources ont été spécifiées en zones de concentrations constantes durant toute la simulation, avec une concentration imposée de 50 000 $\mu\text{g/L}$ pour toutes les sources. Puisque la concentration réelle du TCE émis par les zones sources n'est pas connue, une même valeur a été imposée arbitrairement à toutes les zones sources pour faciliter la comparaison des résultats entre les différentes zones sources.

Les simulations du transport ont considéré la dispersion hydrodynamique, mais le retard et la dégradation du TCE ne sont pas représentés dans le modèle. Une valeur de dispersivité horizontale de 10 m a été assignée, tandis que la dispersivité transversale a été fixée à 0,01 m et à 0,001 m pour la dispersivité transverse verticale. Ces valeurs ont été assignées suite à diverses simulations avec des coefficients de dispersivité variables. La valeur de la dispersivité horizontale tient compte de l'effet d'échelle (*scale effect*) qui est observé lorsqu'un panache migre sur une grande distance dans un aquifère (Zheng et Bennett, 2002; Gelhar *et al.*, 1992) Les autres conditions aux limites pour le transport sont : flux de masse nul à la surface du

maillage, concentrations fixes de $0 \mu\text{g/L}$ aux limites d'écoulement à charges imposées par lesquelles de l'eau pénètre dans le modèle, soient les limites dans la nappe semi-captive au nord-est et dans la nappe libre et semi-captive à la limite sud-est (flancs du Mont Rolland-Auger). Ces conditions aux limites permettent de s'assurer qu'aucune masse de TCE n'entre dans le modèle à d'autres endroits qu'aux sources à concentrations imposées. Les simulations ont été complétées sur 60 ans. Ce temps a été choisi puisqu'il représente le temps maximal estimé depuis lequel du TCE aurait pu être mis en contact avec l'eau souterraine en tenant compte de l'historique des activités dans le secteur. Nous ne disposons pas d'informations suffisantes sur les zones sources pour spécifier des périodes d'émission distinctes pour chacune des zones sources. Aussi, les zones sources spécifiées dans le modèle sont localisées sous la couche silteuse prodeltaïque. Le modèle ne tente donc pas de représenter le transport à travers la couche silteuse mais uniquement sous cette couche. Lefebvre et al. (2003) ont montré que le transport de TCE se fait surtout sous la couche silteuse dans ce secteur.

4.10.2 DISCRÉTISATION DU TEMPS (*TIMESTEP*)

Lors de la simulation du transport de masse, le temps doit être discrétisé et une solution de transport doit être calculée à chacun des pas de temps. Le choix des pas de temps est critique pour éviter des problèmes d'oscillation artificielle et de dispersion numérique (Zheng et Bennett, 2002). Une vérification du nombre de courant lors des simulations de transport de masse permet de minimiser la dispersion numérique. Le nombre de courant peut être interprété comme le nombre d'éléments ou la fraction d'un élément du maillage qui peut être parcouru dans un pas de temps. Le nombre de courant (*Courant number*) ne doit généralement pas dépasser la valeur de 1. Le nombre de courant est défini comme suit :

$$C_r = \frac{v\Delta t}{\Delta x} \quad (5.1)$$

Avec

C_r : nombre de Courant

Δt : pas de temps (s)

Δx : distance parcourue (m)

v : vitesse d'écoulement de l'eau souterraine (m/s)

Le choix d'un pas de temps (Δt) peut se faire en utilisant l'équation suivante (Zheng et Bennett, 2002). Le nombre de courant (C_r) le plus fréquemment utilisé est fixé à 1 (Zheng et Bennett, 2002; Voss, 1984; Kipp, 1987) :

$$\Delta t = C_r \frac{\Delta x}{v_x} \quad (5.2)$$

Δx : distance parcourue (m)

v_x : vitesse d'écoulement de l'eau souterraine selon x (m/s)

Le nombre de Peclet (Pe) permet de déterminer si une simulation de transport est dominée par l'advection ou la dispersion. Le nombre de Peclet s'exprime comme suit :

$$Pe = \frac{\Delta x}{\alpha_L} \quad (5.3)$$

Δx : distance parcourue (m)

α_L : coefficient de dispersion longitudinal (m)

Plus le maillage est serré, plus le nombre de Peclet est petit, ce qui limite les phénomènes d'oscillation de la solution de transport. Un nombre de Peclet plus petit ou égal à 2 élimine essentiellement l'oscillation de la solution (Huyakorn et Pinder, 1983).

La dispersion numérique pose problème pour les méthodes de solution de l'équation de transport de masse de type Eulérienne. Les méthodes Lagrangienne ou mixte Lagrangienne-Eulérienne ne souffrent pas de dispersion numérique, par contre le pas de temps influe directement sur l'exactitude de la solution de traçage de particules (Zheng et Bennett, 2002). Le simulateur FRAC3DVS calcule les nombres de Courant et signale par un avertissement le dépassement de la valeur spécifiée.

Dans le simulateur FRAC3DVS, une méthode de pas de temps adaptés (*adaptive timestep procedure*) peut être utilisée. Cette méthode a été retenue pour la résolution numérique du transport de masse pour le modèle de Valcartier. Le pas de temps initial est de 0,01 seconde et le transport de TCE est simulé sur une période de $1,89 \times 10^9$ secondes ou environ 60 ans. Un contrôle du pas de temps permet de limiter l'incrément du temps en fonction du pourcentage maximal de variation des concentrations en soluté aux nœuds du modèle à chacune des itérations (Therrien *et al.*, 2001). Le changement de concentration (DCONC_ALLOWED) a été fixé à 5%. Un changement plus grand que 5% de la concentration à un nœud du maillage amène la réduction du pas de temps, tandis qu'une variation de moins de 5% de la concentration à chacun des nœuds engendre une augmentation du pas de temps. La grandeur du pas de temps maximal fixé à FRAC3DVS pour les simulations de transport de masse est de 30 jours. Un total de 741 itérations ont été nécessaires pour atteindre la convergence des simulations de transport. Un temps de calcul d'environ 24 heures est nécessaire pour atteindre la convergence des simulations de transport de masse avec un ordinateur doté d'un processeur Pentium IV et 2 giga-octets de mémoire vive (Random Access Memory).

Le discrétisation du temps lors de la solution numérique de l'équation de transport a été basée sur une méthode dite *fully implicit time-weighting*. Cette méthode limite les oscillations numériques, mais rend la solution plus sensible à la dispersion numérique (Therrien *et al.*, 2001).

4.10.3 BILAN DE MASSE

Le calcul du bilan de masse est effectué à chacune des itérations. Le pourcentage d'erreur entre la masse introduite et la masse initiale à chacun des pas de temps renseigne quant à la convergence et l'exactitude de la solution. Le pourcentage d'erreur calculé varie entre $1,05 \times 10^{-9}$ % et 1,70 %. De façon générale, les plus grands pourcentages d'erreur sont observés pour les pas de temps les plus grands et sont plus importants dès la seconde moitié des simulations de transport de masse. La masse initiale dans le système est de 5427,73 kg et après 60 ans, la masse dans le système est de 54 880,90 kg soit dix fois plus. Ces valeurs de masse de TCE diffèrent grandement de valeurs de masses estimée de TCE dans le panache (Lefebvre *et al.*, 2003), soit de l'ordre de 1500 kg. Cette différence majeure s'explique entre autres, par le fait que les

concentrations imposées aux sources dans le modèle sont beaucoup plus importantes que les concentrations actuellement mesurées dans le panache de TCE dissous. De plus il semble que le simulateur montre des erreurs de calcul du bilan de masse de soluté lorsque ce dernier atteint une limite du modèle. Ce problème est maintenant résolu dans les nouvelles versions du simulateur numérique actuellement disponible. Le tableau 4.7 présente le détail du bilan de masse des simulations de transport.



5. RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE ET DISCUSSION

5.1 RÉSULTATS DES SIMULATIONS DE L'ÉCOULEMENT DE L'EAU SOUTERRAINE

5.1.1 ÉCOULEMENT DE L'EAU SOUTERRAINE

Le système d'écoulement de l'eau souterraine dans le secteur de Valcartier est complexe et le premier défi de la modélisation numérique est d'arriver à le représenter correctement. Le modèle calé représente bien les charges hydrauliques mesurées sur le terrain. La figure 5.1 montre que, qualitativement, le modèle représente bien le patron d'écoulement dans l'ensemble du domaine modélisé. Le secteur nord-est constitue la zone où le modèle est un peu moins précis dans la représentation du système naturel. Cependant ce secteur est situé à l'extérieur de la zone importante relativement au transport de TCE et les simulations de transport de TCE ne sont pas affectées par les résultats du modèle dans le secteur nord-est. La figure 5.2 montre une vue en trois dimensions des charges hydrauliques simulées.

Les figures 5.3 et 5.4 montrent des cartes des vitesses d'écoulement simulées dans le domaine modélisé. Ces cartes de vitesses ont été construites en calculant le module des composantes horizontales (en x et y) de la vitesse d'écoulement. La composante verticale de la vitesse d'écoulement n'est pas considérée dans ces cartes. La figure 5.3 montre les vitesses dans l'unité proglaciaire tandis que la figure 5.4 présente les vitesses au cœur de l'unité deltaïque. De façon générale, les vitesses simulées sont plus élevées dans l'unité proglaciaire puisque la conductivité hydraulique imposée dans le modèle y est plus grande que dans l'unité deltaïque. Les valeurs relatives des conductivités hydrauliques dans le modèle sont en fait l'inverse des mesures de terrain qui montrent de plus grandes valeurs dans l'unité deltaïque. Cependant, il n'a pas été possible de caler le modèle avec de telles conditions. Une explication possible est que le modèle n'a pas su bien représenter l'effet du silt glaciomarin situé entre les unités deltaïque et proglaciaire, tant au niveau de sa distribution que de ses propriétés hydrauliques. On peut donc considérer les conditions utilisées dans le modèle calé représentent l'effet combiné du silt glaciomarin et des sables et graviers proglaciaires. Ainsi, les propriétés utilisées dans le modèle pour ces deux unités sont des propriétés « effectives » permettant de reproduire les conditions d'écoulement adéquatement mais avec des valeurs qui diffèrent des observations dans le cas de

la conductivité hydraulique des sables et gravier proglaciaires. Le besoin d'utiliser des valeurs élevées de conductivité hydraulique dans le modèle pourrait indiquer que le silt glaciomarin est en réalité moins continu et plus perméable que ce qui a été utilisé dans le modèle. La figure 5.3 montre que pour l'unité deltaïque, les vitesses varient en fonction de la position dans le domaine de modélisation, en raison des différentes zones de conductivités hydrauliques définies dans cette unité. De façon générale, les vitesses sont plus élevées en bordure des montagnes et dans le centre de la vallée glaciaire enfouie. Dans l'unité deltaïque, les vitesses sont généralement plus élevées à l'ouest qu'à l'est du modèle. Les vitesses horizontales simulées varient entre quelques mètres par année, notamment aux environs de la limite de partage des eaux, et 300 m/an.

La figure 5.5 représente les directions d'écoulement simulées à l'aide de vecteurs de longueur uniforme. Cette figure confirme les conditions d'écoulement par rapport aux déductions tirées de la carte piézométrique de la nappe libre, soit que l'écoulement converge généralement vers le centre du secteur pour ensuite se diriger soit vers l'ouest ou vers l'est. La figure 5.5 montre aussi la position des coupes verticales présentées à la figure 5.6 et qui illustrent la distribution verticale des charges hydrauliques simulées. Il peut être noté que le modèle représente bien l'effet de la couche silteuse prodeltaïque qui génère un gradient hydraulique vers le bas, ce qui avait été bien montré à la figure 2.3 montrant l'hydrostratigraphie du secteur. La figure 5.7 montre la saturation en eau simulée par les mêmes deux coupes verticales et indique que le modèle représente bien la partie non saturée du secteur au-dessus de la nappe libre. Enfin, la figure 5.8 montre une vue en trois dimensions des charges hydrauliques simulées. Cette figure permet de constater que la distribution des charges hydrauliques est variable non seulement horizontalement mais également verticalement, en grande partie à cause de la présence de la couche silteuse prodeltaïque. La simulation de l'écoulement en 2D, soit par une coupe verticale ou un plan horizontal, ne permettrait pas de représenter adéquatement la complexité de l'écoulement dans le système aquifère du secteur Valcartier. Il était donc absolument nécessaire d'utiliser un modèle d'écoulement 3D pour simuler l'écoulement dans ce système.

5.1.2 AIRES D'ALIMENTATION DES PUIITS DE CAPTAGE DE L'EAU SOUTERRAINE

Le logiciel TECPLOT a été utilisé pour faire le traçage de particules pour déterminer les aires d'alimentation des puits de pompage présents dans le secteur Valcartier. Les aires d'alimentation ont d'abord été déterminées avec le modèle d'écoulement dans lequel on représente le fonctionnement des puits d'approvisionnement de la Garnison Valcartier P-2, P-4 et P-5. Les aires d'alimentation présentées sur la figure 5.9 montrent le résultat pour un traçage de particule à une élévation de 150 m dans l'aquifère. Cet exercice a permis de vérifier le potentiel de contamination de ces puits d'alimentation par la migration éventuelle du panache de TCE. Les résultats montrent que les aires d'alimentation des puits P-2 et P-5 s'étendent dans le panache de TCE dissous, ce qui les rend vulnérables à la contamination. D'ailleurs, la contamination du puits P-5 a été constatée depuis 1997 tandis que certains des puits d'alerte en périphérie de P-2 sont déjà contaminés. Bien qu'en opération pour un certain temps pour servir de barrière hydraulique à la migration de la contamination en TCE, le puits P-5 n'est plus utilisé pour l'approvisionnement en eau potable. Le puits P-4 situé plus au nord des terrains de la Garnison Valcartier n'est pas susceptible d'être contaminé par le TCE puisque son aire d'alimentation s'étend vers le nord-est, soit en dehors de la limite connue du panache de TCE.

Un deuxième exercice de traçage de particules pour déterminer les aires d'alimentation des puits a été complété mais cette fois en ajoutant l'effet du pompage du nouveau puits d'alimentation P-7 en fonction depuis le début de l'année 2002 (figure 5.10). Les conclusions restent les mêmes pour les puits P-2, P-4 et P-5 et l'exercice permet de démontrer que l'aire d'alimentation du puits P-7 s'étend vers le nord-est, tout comme pour le puits P-4, ce qui le protège d'une éventuelle contamination par du TCE sous forme dissoute provenant du panache défini dans cette étude. Mentionnons qu'en date du présent mémoire, P-7 est le puits principal pour l'approvisionnement en eau du réseau d'aqueduc desservi par la Garnison Valcartier, tandis que le puits P-4 sert de puits d'appoint et que le puits P-2 n'est utilisé qu'en dernier recours.

Il est à noter que les aires d'alimentation délimitées par cette méthode sont maximales et que la limite à l'est des panaches est en fait la ligne de partage des eaux souterraines. En fait, l'aire d'alimentation réelle doit tenir compte de la recharge de l'aquifère qui se produit à l'intérieur de

l'aire d'alimentation, ce qui a pour effet de réduire les aires d'alimentation par rapport à ce qui est montré aux figures 5.9 et 5.10. Par contre, l'étendue des aires modélisées reste valable puisqu'elle est conservatrice en montrant l'étendue maximale des aires d'alimentation.

5.1.3 MIGRATION DU TCE À PARTIR DES ZONES SOURCES PAR TRAÇAGE DE PARTICULES

Le traçage de particule inverse à partir des milieux récepteurs a été réalisé pour définir un temps de migration d'un contaminant par transport advectif à partir de chacune des zones sources présumées. La figure 5.11 montre les isochrones de transport advectif dans l'unité deltaïque à partir de Shannon et de Val-Bélair, les deux milieux récepteurs sélectionnés. Les isochrones représentent des lignes de temps égal de transport de masse du TCE à partir d'un point donné. Dans ce cas-ci les isochrones sont définies en allant vers l'amont, c'est-à-dire des milieux récepteurs vers les zones sources. Le traçage de particule est contrôlé par la direction et la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine et ne tient pas compte du retard et de la dégradation du contaminant, ni de la dispersion hydrodynamique. Des lignes d'écoulement reliant les zones sources aux milieux récepteurs indiquent le cheminement modélisé du TCE entre les zones sources et les milieux récepteurs.

Les résultats montrent que le temps de transport advectif de la lagune C à Shannon est d'environ 50 ans à la limite avec les terrains de la Garnison Valcartier. Par contre, le transport jusqu'à Shannon requiert entre 90 et 100 ans pour les zones sources présentes à RDDC Nord ainsi que pour le Secteur 214. Noter que le transport de masse donne un temps de migration de 25 ans entre la source modélisée représentant la Lagune C et Shannon (figure 5.13). Cette incohérence apparente des résultats de la modélisation est reliée au fait que le traçage de particule a été fait dans l'unité deltaïque alors qu'une partie du transport de masse se passe dans l'unité proglaciaire dans le modèle où l'écoulement est plus rapide. Le transport de masse, vu en plan, semble donc indiquer un transport plus rapide que le traçage de particules.

Du côté de la limite ouest de la ville de Québec (Val-Bélair), le même exercice a été fait en considérant la limite du milieu récepteur à une distance d'environ 500 m à l'intérieur de la ville de Québec. Cette position a été choisie à cause de la forme particulière de la limite entre les terrains de la Garnison Valcartier et de SNC TEC avec la ville de Québec qui forme une pointe

allant vers l'ouest. Le temps de transport pour les zones sources à l'est de RDDC Nord et pour le Secteur 214 jusqu'à cette position à l'intérieur de la ville de Québec oscille entre 90 et 100 ans. Si la limite extrême ouest de la ville de Québec était considérée, les temps de transport à partir des zones sources seraient plutôt de l'ordre de 30 à 40 ans.

Le traçage de particules a aussi été utilisé pour bien comprendre la migration du TCE dans le secteur des zones sources où l'écoulement est complexe et où le panache de TCE observé sur le terrain est tout aussi complexe. Le traçage a permis de confirmer différentes hypothèses quant à la migration du TCE. D'abord, le traçage de particules démontre l'effet des vitesses d'écoulement plus faibles à proximité de la ligne de partage des eaux, près de laquelle se retrouvent le Secteur 214 et les zones sources à l'est de RDDC Nord. Le transport advectif est donc très lent à proximité de ces deux zones sources et il augmente significativement lorsque les particules migrent vers l'ouest. Par contre, du côté est, les vitesses de migration des particules n'augmentent que très légèrement en s'éloignant de la limite de partage des eaux à cause des plus faibles conductivités hydrauliques dans le secteur. La migration du TCE est donc beaucoup plus lente de ce côté de la ligne de partage des eaux. Une autre hypothèse vérifiée par le traçage est que le panache de TCE présent dans l'aquifère de la Garnison Valcartier est constitué dans sa partie est (près de la guérite principale) de la jonction des panaches provenant des sources de RDDC Nord et du Secteur 214.

5.2 RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION SIMPLIFIÉE DU TRANSPORT DE MASSE

Les figures 5.12, 5.13 et 5.14 montrent les résultats de la simulation du transport de masse sous forme d'isosurfaces de concentrations $50 \mu\text{g/L}$ et $1000 \mu\text{g/L}$ après 10 ans, 25 ans et 60 ans. La figure 5.12 montre d'abord la migration après 10 ans. La zone source qui représente la lagune C produit le plus grand panache comparativement aux sources de RDDC Nord et du Secteur 214. Cette observation s'explique par les plus grandes vitesses d'écoulement à l'ouest du modèle comparativement aux zones sources situées près de la ligne de partage des eaux. Les résultats de la simulation de la migration du TCE après 25 ans montrent un élargissement du panache qui origine de la lagune C une fois qu'il atteint l'endroit où l'écoulement est contrôlé par une remontée du roc (figure 5.13). Dans ce secteur, l'écoulement de l'eau souterraine est de type radial, ce qui élargit le panache lorsqu'il dépasse la remontée du socle rocheux. À noter aussi que

ce panache qui origine de la lagune C atteint pratiquement la limite ouest de la Garnison Valcartier avec Shannon. Du côté des zones sources plus à l'est, celles-ci émettent toujours du TCE des côtés est et ouest de la ligne de partage des eaux. Les panaches qui transitent de ces sources (RDDC Nord et Secteur 214) vers l'ouest se rejoignent et forment un panache de plus en plus amalgamé. La migration du TCE des zones sources du secteur se fait plus rapidement vers l'ouest que vers l'est. Toutefois, un panache de contamination en TCE se dirige aussi vers l'est. Les panaches de TCE simulés après 60 ans montrent la configuration totale du panache simulé (figure 5.14). La figure 5.15 fait la comparaison de cette configuration du panache simulé avec l'extension du panache observé sur le terrain. La morphologie générale du panache simulé s'apparente grandement à celle du panache de TCE observé sur le terrain. Les zones sources considérées dans le modèle de transport sont donc suffisantes pour reproduire l'extension du panache observé sur le terrain.

La figure 5.16 montre l'extension maximale simulée de la contribution respective des différentes zones sources après 60 années de transport. Cette figure permet de déterminer graphiquement la contribution respective de chacune de ces sources à la contamination des milieux récepteurs. Ainsi, du côté de Shannon, la contribution après 60 ans de simulation provient uniquement de la lagune C tandis que les zones sources du Secteur 214 et de RDDC Nord transitent toujours vers l'ouest sur les terrains de la Garnison Valcartier, loin à l'est de Shannon. Les simulations de transport de masse indiquent aussi que les zones sources de la partie est de RDDC Nord ainsi que le Secteur 214 contribuent à la migration d'un panache de TCE dissous vers l'est du modèle. Cependant, le panache simulé de contamination transporté en direction est ne dépasse pas les limites caractérisées du panache qui a atteint l'extrémité ouest de la ville de Québec (Val-Bélair). Le modèle suggère donc que la migration ne devrait pas avoir dépassé les limites du panache identifiées sur le terrain. Cette limite du panache du côté est du secteur devrait cependant être précisée par des nouvelles données de terrain non équivoques, c'est-à-dire qui montreraient des concentrations nulles ou très faibles pour bien indiquer que la limite du panache est formellement identifiée.

D'autres observations peuvent être faites à partir de la figure 5.16 et de la comparaison des résultats des simulations avec les observations de terrain. D'abord, on note que le panache simulé

à partir de la zone source de la Lagune C a une origine située plus au sud que la position réelle de la Lagune C. Ceci est dû au fait que la zone source simulée a été placée en aval de la Lagune C car cette zone source est située en périphérie du modèle où les dépôts meubles sont minces. Il s'est avéré très difficile d'obtenir des résultats cohérents avec des simulations utilisant la position réelle de la Lagune C, d'où la différence entre la zone source réelle par rapport à celle utilisée dans le modèle. Un autre point de divergence entre le modèle et les observations se retrouve du côté est à la limite de la ville de Québec. À cet endroit le modèle prédit une migration vers le sud-est à partir des zones sources de RDDC Nord et du Secteur 214. Cependant, le panache de contamination observé semble plutôt se diriger vers l'est et la rivière Nelson et on note aussi qu'une partie du panache observé n'est pas expliqué par le transport simulé. De plus, dans ce secteur, le panache de concentration simulé avec une concentration supérieure à 50 µg/L excède grandement la limite observée lors de la caractérisation pour le panache émis du Secteur 214 mais surtout de RDDC Nord. Les concentrations émises de ces zones sources vers l'est de même que les durées d'émission réelles sont donc possiblement inférieures aux valeurs utilisées dans le modèle. Le panache de contamination doit cependant être encore précisé dans ce secteur où il manque des données. Le modèle est à cet endroit encore affecté par les limites et il s'avère moins précis près de ces limites. Enfin, les autres distinctions notées entre le modèle et le panache observé sont peut-être causées par le puits P-5. On note d'abord que juste à l'ouest de RDDC Nord, le panache du modèle émis par la zone source simulée à cet endroit bifurque vers le nord probablement à cause de l'effet du pompage dans le puits P-5. Ensuite, on note qu'il y a une bande assez large de la partie nord du panache observé avec des concentrations inférieures à 50 µg/L où le modèle n'a pas prédit la présence de TCE. La présence de contamination sur le terrain dans ce secteur pourrait être due au fait que le puits P-5 n'a pas intercepté toutes les émissions de TCE provenant de la partie nord de RDDC Nord, contrairement au modèle où cette interception est « parfaite ». Une autre explication pourrait être que certaines émissions de TCE proviennent de la limite extrême nord-ouest de RDDC Nord où le modèle n'avait pas représenté de zone source.

5.3 DISCUSSION SUR LES TRAVAUX DE MODÉLISATION NUMÉRIQUE

La modélisation numérique de l'écoulement et du transport est un outil puissant de compréhension d'un milieu aquifère ainsi qu'un outil de gestion et de prédiction de la migration de contaminants dans l'eau souterraine.

Le modèle développé pour l'aquifère de Valcartier est appuyé par un nombre important de données hydrogéologiques et hydrogéochimiques. Le niveau de confiance dans les simulations est donc amélioré par rapport aux travaux antérieurs (Martel *et al.*, 2000). La principale force de ce modèle est de représenter la stratigraphie complexe du site, ainsi que les directions d'écoulement de l'eau souterraine engendrées par ce contexte particulier. Le modèle conceptuel développé inclut tous les paramètres nécessaires à bien représenter les conditions observées sur le terrain, tout en synthétisant l'information. Par exemple, la couche silteuse prodeltaïque est représentée dans le modèle en une seule unité. L'étude des descriptions stratigraphiques de cette unité révèle cependant que cette couche passe de sable silteux à silt argileux. L'idée était donc d'inclure dans le modèle une couche qui regroupe tous ces matériaux dans une seule couche. Ceci illustre l'aspect de synthèse présent dans tout modèle conceptuel. Celui-ci tient aussi compte de la variation importante des conductivités hydrauliques dans l'unité deltaïque passant de grandes à l'ouest, à faibles vers l'est. Cette caractéristique joue un rôle important lors de l'évaluation des temps de transport et lors de simulation du transport de masse. De façon générale, la principale force du modèle conceptuel est d'être basé sur un ensemble de données fiables et bien distribuées sur le territoire.

Les conditions aux limites de charges constantes sont basées sur des observations obtenues sur le terrain. Les charges imposées à la rivière Jacques-Cartier, au sud et au sud-est du modèle sont basées sur de nombreuses observations de terrain. La limite nord-est de charges imposées dans la nappe libre et semi-captive est aussi basée sur l'étude piézométrique. Par contre, pour cette limite, les conditions d'écoulement dans le secteur sont moins bien définies. La condition de flux imposé utilisée pour représenter la recharge est aussi basée sur l'estimation de ce paramètre à partir des mesures des précipitations (Martel *et al.*, 2000), ainsi qu'à l'aide des hydrogrammes de

puits (Annexes de Lefebvre *et al.*, 2003). La valeur calée de 350 mm/an tient compte du contexte physiographique particulier du secteur Valcartier.

Le modèle calé représente bien l'écoulement de l'eau souterraine tout en minimisant l'erreur entre les charges hydrauliques mesurées et simulées. Au niveau de l'écoulement de l'eau souterraine, les derniers efforts lors du calage du modèle ont été concentrés sur le positionnement de la ligne de partage des eaux à l'est du secteur. Actuellement, le modèle calé représente précisément la position de cette particularité de l'écoulement. Il était primordial de représenter cette caractéristique, puisque certaines zones sources chevauchent cette ligne de partage. Ailleurs dans le modèle, l'écoulement est bien représenté par les charges hydrauliques simulées. Le gradient hydraulique vertical dirigé vers le bas au-dessus de la couche de silt est aussi bien représenté. La zone de fort gradient hydraulique en bordure de la couche de silt est présente dans les simulations, alors que le gradient simulée est légèrement plus faible que le gradient observé.

Une des incertitudes du modèle d'écoulement se trouve au niveau de l'unité proglaciaire. Cette unité est représentée par une seule couche dans le modèle. Les données d'essais de perméabilité disponibles dans cette unité démontrent une grande variabilité des valeurs de conductivités hydrauliques obtenues. Le processus de déposition de ce matériel géologique le rend hétérogène et anisotrope. Des zones de plus grandes conductivités hydrauliques peuvent être retrouvées à proximité des zones de plus faibles conductivités hydrauliques. Le nombre plus limité de points de contrôle dans l'unité proglaciaire entraîne une considération de cette unité avec une conductivité hydraulique unique dans le modèle. Le rôle de l'unité proglaciaire pourrait être étudié plus précisément et des zones de conductivités hydrauliques pourraient être incluses dans un modèle numérique amélioré.

Une vérification supplémentaire qui pourrait améliorer le niveau de confiance du modèle numérique de Valcartier serait de caler le modèle par rapport au débit de base de la rivière Jacques-Cartier. Le flux d'eau émis par le modèle dans la limite ouest représentant la rivière pourrait être comparé au débit de base déterminé par l'étude des hydrogrammes compilés de la rivière à partir des mesures de débits. L'accord entre les valeurs simulées et mesurées indiquerait la cohérence de la condition limite à l'ouest du modèle.

L'utilisation de la technique du traçage de particules a permis d'étudier en détail la migration du TCE à partir des zones sources. Les temps de transport calculés avec cette méthode offrent la possibilité d'étudier le rôle de chacune des sources par rapport à l'étendue actuelle de la zone contaminée. Les aires d'alimentation des puits ont aussi été déterminées avec cette technique indiquant que le puits P-2 est menacé par une éventuelle contamination par du TCE, tandis que le nouveau puits P-7, installé par le MDN est moins vulnérable à une contamination par du TCE. Le traçage de particules a été effectué à l'aide du logiciel TECPLOT. De façon générale, la technique est très efficace. Par contre, à certains endroits précis dans le modèle, le traçage de particules est plus problématique. Par exemple, dans le secteur de la remontée du roc, entre la lagune C et la Garnison Valcartier, les particules ont tendance à être arrêtées. L'algorithme d'interpolation de la trajectoire des particules dans TECPLOT semble en cause. Il faut donc rester vigilant lors du traçage et étudier attentivement les résultats obtenus afin d'éviter les interprétations erronées.

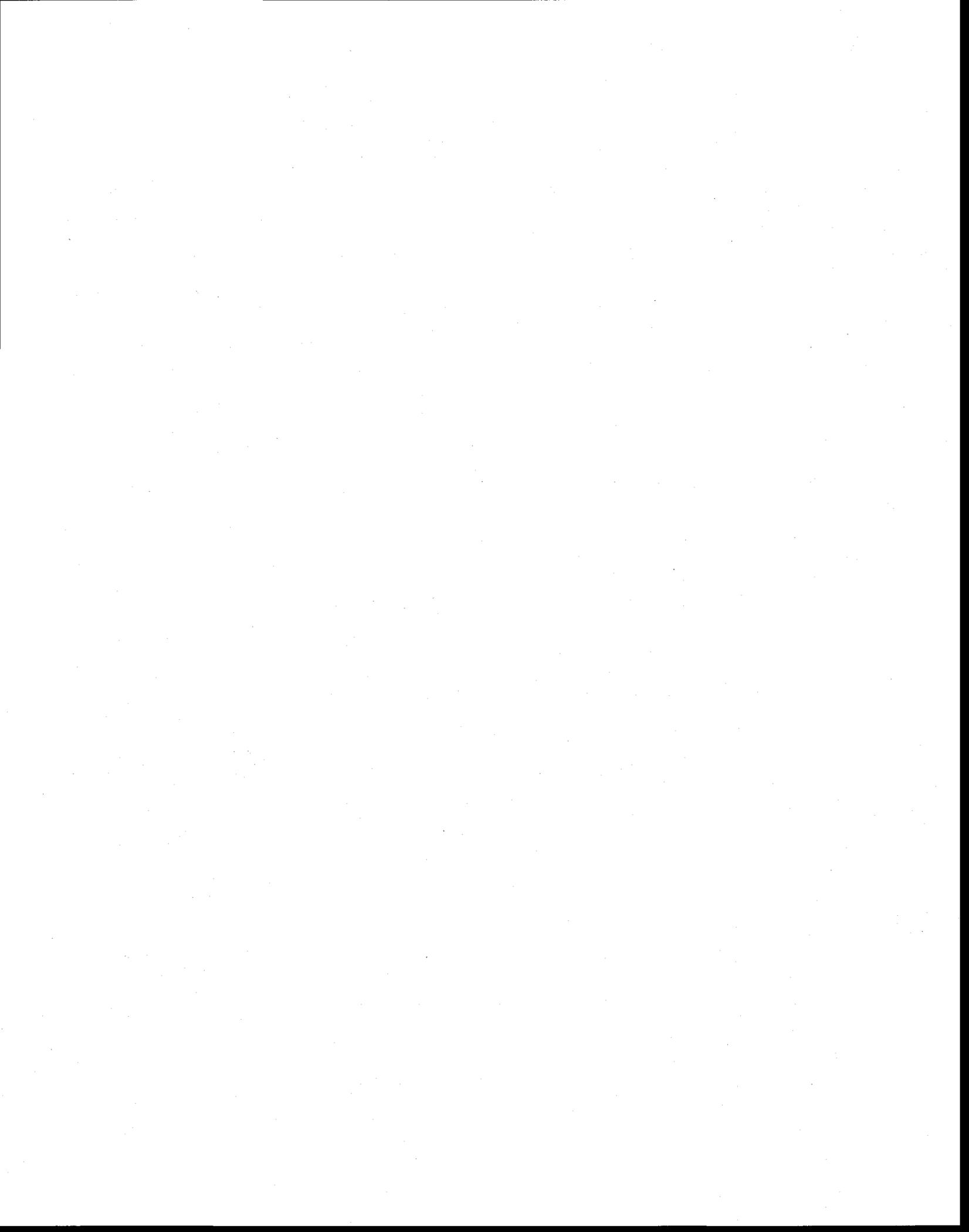
La présence et le rôle de l'unité silteuse prodeltaïque sont bien représentés dans le modèle. Il semble clair que cette unité a joué un rôle important lors de la migration du TCE dans l'eau souterraine. Le gradient hydraulique vertical, dirigé vers le bas, a amené la migration du TCE préférentiellement sous la couche et a provoqué une émission de TCE à la base du silt à RDDC Nord. Les simulations de transport de masse positionnent les sources sous la couche silteuse puisque les plus grandes concentrations observées se situent sous cette unité. Une étude locale complémentaire permettrait de vérifier plus spécifiquement et quantitativement les mécanismes de la migration du TCE à partir de la surface du terrain, ou du lieu d'émission, jusque sous la couche silteuse. Des zones de plus grandes conductivités hydrauliques et une topographie favorable de l'unité silteuse favorisent potentiellement la migration du TCE en profondeur dans l'aquifère.

Les simulations simplifiées du transport de masse permettent de représenter de façon générale la morphologie du panache d'eau souterraine contaminée dans le secteur de Valcartier. Le modèle renseigne aussi sur le temps de transport entre les différentes sources et les milieux récepteurs. Un temps de transport d'environ 25 ans est calculé entre la lagune C et Shannon, tandis que le

TCE émis à partir du secteur 214 et des sources de la RDDC Nord n'a atteint aucun milieu récepteur après 60 ans de simulation. Aussi, les simulations démontrent que le panache de TCE dissous présentement observé sur le terrain a été engendré par plusieurs sources.

Les simplifications apportées lors des simulations de transport entraînent plusieurs limitations quant à la solution obtenue. D'abord, la position des sources a été spécifiée à l'intérieur de l'aquifère et pour une étendue comprenant toute la zone source. Les volumes des sources spécifiées dans le modèle sont donc probablement surestimés par rapport à la réalité rencontrée sur le terrain. Les concentrations imposées aux sources ont été choisies en fonction de la plus grande concentration en TCE mesurée historiquement dans le secteur de Valcartier. Ces deux simplifications entraînent que le panache simulé comporte une masse de TCE, après 60 ans, bien supérieure à celle estimée lors de la caractérisation environnementale (Lefebvre *et al.*, 2003). Un autre facteur qui contribue à cette grande différence réside dans le choix d'une émission constante des sources sur 60 ans dans les simulations de transport. En situation réelle, le mode d'émission est probablement beaucoup plus transitoire et d'une durée plus courte et ce, pour chacune des sources. Cependant, il reste que l'approche suivie pour la modélisation du transport de masse a permis de vérifier des hypothèses émises lors de l'étude de la contamination en TCE, principalement au niveau de la contribution relative des zones sources à la formation du panache régional et au niveau de la contamination des milieux récepteurs.

Pour améliorer la compréhension des phénomènes qui régissent le transport du TCE dans le secteur Valcartier, un modèle de transport réactif pourrait être développé à une échelle plus locale pour tenter de représenter les processus de retard et de dégradation qui semblent avoir cours dans l'aquifère. D'abord, un sous-panache du panache régional devrait être sélectionné et les concentrations observées en TCE et produits de dégradation seraient reliées à une source unique. Il serait ainsi possible d'estimer les paramètres de retard à plus grande échelle, tout en tentant de déterminer des constantes de dégradation dans un secteur précis du panache. Ainsi il serait possible de caler le modèle de transport avec des concentrations mesurées sur le terrain.



6. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

La compréhension de la contamination de l'eau souterraine par des produits organiques s'avère un défi scientifique et technique majeur. Les avancées technologiques et les méthodes de caractérisation et de modélisation numérique permettent d'atteindre un niveau de connaissance et de compréhension avancé des aquifères. Dans le cas de la contamination de l'eau souterraine par du TCE à Valcartier, une combinaison de méthodes de caractérisation environnementale diverses et complémentaires, en plus du développement d'un modèle numérique 3D d'écoulement et de transport de masse, ont permis de définir le contexte et de quantifier les phénomènes physiques et chimiques.

Les objectifs de départ étaient de mieux définir le contexte géologique et hydrogéologique ainsi que de comprendre et d'expliquer la présence de la contamination de l'eau souterraine en TCE. Pour atteindre ces objectifs, des travaux se sont échelonnés à plusieurs niveaux. D'abord, des travaux de terrain ont permis de caractériser le milieu naturel. Au cours des années, plus de 659 puits d'observation ont été installés dans les dépôts meubles sur les terrains du MDN pour totaliser 809 puits d'observation dans tout le secteur.

L'étude attentive des descriptions stratigraphiques (forages à rotation-percussion Rotasonic, forages stratigraphiques, forages destructifs) a permis de préciser le contexte hydrostratigraphique du secteur. Au total, le milieu aquifère se divise en cinq (5) unités hydrostratigraphiques : 1) le till glaciaire reposant sur le socle rocheux, 2) le sable et gravier proglaciaire, 3) le silt glaciomarin à couverture discontinue, 4) le sable deltaïque recoupé par le 5) la couche silteuse prodeltaïque.

Une campagne intensive d'essais de perméabilité dans plus de 250 puits d'observation a été effectuée afin de quantifier la variation naturelle des conductivités hydrauliques dans les différentes unités hydrostratigraphiques. Le contexte de déposition deltaïque d'une grande partie des matériaux géologiques du secteur a amené une zonation des conductivités hydrauliques qui a été vérifiée par les nombreux essais hydrauliques. Tel qu'attendu, les conductivités hydrauliques de l'unité deltaïque sont plus grandes à l'ouest qu'à l'est, en bordure du paléo-delta. Des

variations des propriétés hydrauliques ont aussi été mesurées dans l'unité proglaciaire et dans l'unité semi-confinante composée principalement de silt argileux.

Le contexte hydrostratigraphique particulier sépare les dépôts meubles en aquifères libre et semi-captif. À l'ouest du secteur, l'aquifère libre est présent sur une épaisseur allant jusqu'à près de 40 m de sable saturé. À l'est du secteur, les sables d'origine deltaïque sont recoupés par une couche silteuse prodeltaïque qui engendre la présence d'une nappe semi-captive sous la couche silteuse, tandis qu'une nappe libre dite supérieure se trouve au-dessus de l'unité prodeltaïque. Un fort gradient hydraulique vertical est observé entre l'aquifère de surface et l'aquifère semi-captif, amenant un proportion de l'écoulement de la surface vers le bas, à travers la couche silteuse. Un gradient hydraulique horizontal important est aussi observé en bordure de la couche silteuse, où la nappe libre supérieure rejoint la nappe libre régionale. De façon générale, l'eau souterraine s'écoule du nord et du sud vers le centre du secteur. Une ligne de partage des eaux divise ensuite l'écoulement vers l'ouest et vers l'est. La présence de vallées glaciaires enfouies contrôle grandement l'écoulement de l'eau souterraine.

Un panache de TCE a été découvert en 1997 et de nombreuses phases de caractérisation ont suivi et ont permis de mieux définir l'ampleur de la contamination. Les résultats de l'échantillonnage de l'eau souterraine et de l'analyse chimique du TCE dans des puits d'observation, et par profilage avec le Geoprobe ont permis de bien définir l'étendue des zones contaminées. Le panache de TCE observé en 2001 mesure près de 4 km de la limite est des terrains du MDN près de Val-Bélair, jusqu'à Shannon à l'ouest. Du côté ouest, sa largeur atteint environ 600 m au total et atteint 300 m pour la zone montrant des concentrations plus grandes que 50 µg/L en TCE. La superficie totale du panache est estimée à environ 3,2 km² dont 1,3 km² avec des concentrations généralement au-dessus de 50 µg/L. Une estimation du volume d'eau contaminée indique que le panache serait formé d'environ 21 000 000 m³ d'eau contaminée par le TCE dissous. Plusieurs zones sources ont été identifiées dans le secteur de Valcartier. Chacune des sources de TCE contribue à la formation du panache de contamination régional présentement observé sur le terrain. Les zones sources principales identifiées dans le secteur Valcartier sont la lagune C et le secteur 214, sur le territoire de SNC TEC en plus des bâtiments 67 et 98 et le lagon bleu à RDDC Nord.

Afin de reproduire les phénomènes d'écoulement et de transport de masse observés sur le terrain, un modèle numérique a été développé. Le simulateur FRAC3DVS a été retenu pour reproduire les conditions de terrain. Ce simulateur est en mesure de simuler l'écoulement à saturations variables en une (1), deux (2) et trois (3) dimensions et ce, en régime transitoire ou permanent. Le milieu poreux peut être discrétisé selon l'approche des différences finies ou des éléments finis. Un modèle numérique régional a également été développé pour le secteur de Valcartier.

Le modèle numérique s'étend de Shannon à Val-Bélair et inclut le territoire de la RDDC-Valcartier, de SNC TEC et d'une partie de la Garnison Valcartier. Les conditions aux limites spécifiées dans le modèle sont des charges imposées à la rivière Jacques-Cartier et Nelson, ainsi que des charges imposées au sud et nord-est du modèle. Des flux nuls sont imposés au nord-ouest du modèle et en bordure du mont Brillant ainsi qu'à la base du modèle à la surface du roc. Un flux imposé est spécifié à la surface du maillage pour représenter la recharge de l'aquifère. Le maillage développé intègre quatre (4) unités hydrostratigraphiques : le sable proglaciaire, le silt glaciomarin, le sable deltaïque et la couche silteuse prodeltaïque. Au total, dix-neuf (19) zones de conductivités hydrauliques sont spécifiées dans le modèle afin de représenter la variation de la conductivité hydraulique dans l'aquifère, particulièrement dans le sable deltaïque. Les simulations de l'écoulement de l'eau souterraine ont été réalisées en régime permanent.

Le modèle a été calé par essais et erreurs en modifiant les conductivités hydrauliques, la recharge ainsi que les conditions aux limites, en cherchant à minimiser l'erreur entre les charges hydrauliques simulées et les charges hydrauliques mesurées. Une étude de sensibilité complète a été effectuée et celle-ci a démontré que le modèle est plus sensible aux changements de conductivités hydrauliques qu'aux changements de la recharge. De plus, des modifications aux conditions aux limites à charges imposées augmentent l'erreur entre les charges hydrauliques mesurées et simulées. Le modèle représente bien les caractéristiques de l'écoulement de l'eau souterraine. La ligne de partage des eaux identifiée à l'est du secteur est représentée avec le modèle calé. Des efforts supplémentaires, lors du calage du modèle, ont été nécessaires pour positionner cette ligne de partage correctement lors des simulations, puisque certaines zones sources se situent directement sur la ligne de partage de l'eau souterraine. Le modèle numérique

calé a servi à définir les aires d'alimentation des puits de la Garrison Valcartier. L'exercice montre que le puits P-2 est menacé par la migration du panache de TCE, puisque ce dernier se situe en bordure du panache de TCE dissous, tel que défini avec les données de 2001. Les puits P-4 et le nouveau puits P-7, tout deux situés plus au nord, sont à bonne distance du panache de TCE dissous et leurs aires d'alimentation s'étendent vers le nord-est où aucune contamination par du TCE dissous dans l'eau souterraine n'a été identifiée. Le traçage de particules a permis d'estimer des temps de transport advectif entre les différentes zones sources et les milieux récepteurs à l'est et à l'ouest du secteur Valcartier.

Des simulations de transport de masse ont été réalisées avec le modèle numérique. Des conditions aux limites de concentrations imposées à 50 000 µg/L aux cinq zones sources principales, ainsi que des conditions de flux de masse nuls à la surface du maillage, au nord-est, au sud-est et au sud du modèle ont été spécifiées afin d'éviter l'apport numérique de masse dans le modèle lors des simulations. L'objectif des simulations de transport est de vérifier si les sources identifiées lors de la caractérisation sont suffisantes pour générer un panache simulé de mêmes dimensions que celui observé sur le terrain. Le modèle a aussi pour objectif de déterminer la contribution relative de chacune des sources incluses dans le modèle sur les milieux récepteurs. Le modèle de transport ne visait pas à comparer les concentrations mesurées sur le terrain avec les concentrations simulées. Les simulations de transport de masse ont démontrées que les sources identifiées suffisent à générer le panache de TCE dissous observé sur le terrain. Les simulations ont aussi permis d'observer que les caractéristiques de l'écoulement de l'eau souterraine et la topographie du roc jouent un rôle important sur la migration du TCE à l'ouest de la lagune C en entraînant l'élargissement du panache. L'étude de la contribution relative des sources démontre que majoritairement la lagune C aurait contribué à la contamination en TCE observée à Shannon. En effet, après 60 ans de simulation, seul le TCE émis à la lagune C atteint Shannon. Le temps de transport entre la lagune C et Shannon est estimé à 25 ans. Du côté est, la migration est plus lente du fait que les conductivités hydrauliques sont beaucoup plus faibles. Après 60 ans de simulation, le panache dépasse la limite de propriété entre les terrains du MDN et la ville de Québec mais ne dépasse pas la limite actuellement connue du panache.

De façon générale, l'approche suivie pour l'atteinte des objectifs du présent projet de recherche a été d'abord de définir précisément les contextes géologique, hydrogéologique et hydrogéochimique pour ensuite intégrer ces connaissances dans un modèle numérique régional d'écoulement et de transport de masse. L'abondance de données de terrain a permis de développer un modèle conceptuel du site précis et détaillé. La modélisation mathématique de l'écoulement a permis de représenter les phénomènes observés sur le terrain et de raffiner grandement la compréhension du site. La modélisation du transport de masse a quant à elle permis de vérifier si les sources identifiées sont suffisantes pour générer un panache de l'ampleur de celui présent dans le secteur de Valcartier.

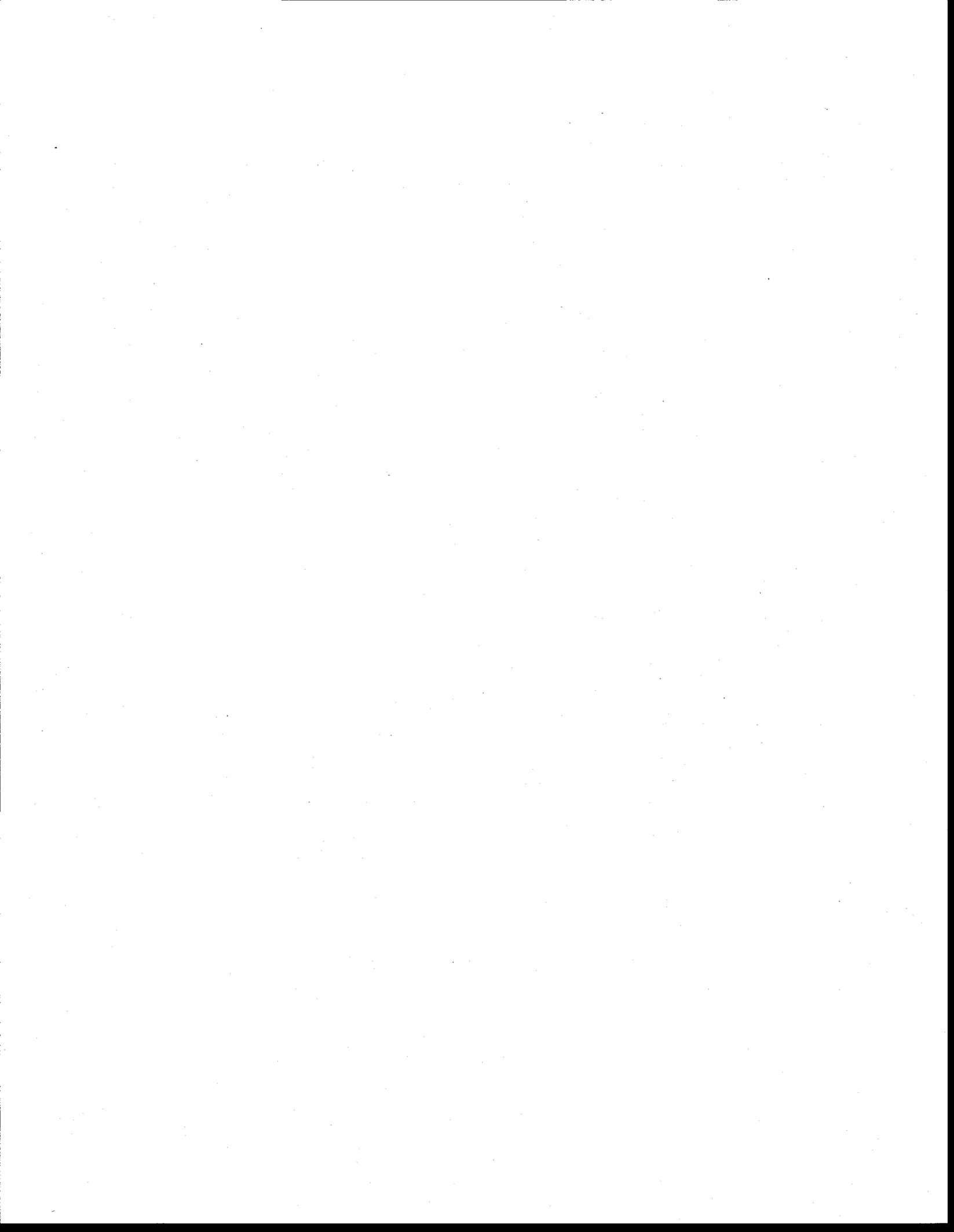
Suite à la réalisation de ce projet, de nombreuses recommandations de diverses natures peuvent être proposées. D'abord, à propos de l'approche de caractérisation environnementale et hydrogéologique, la principale recommandation est plutôt d'ordre idéologique. De par l'hétérogénéité et la complexité des systèmes géologiques dans lesquels l'eau souterraine circule, un modèle conceptuel initial n'est qu'un premier brouillon de ce que la situation réelle peut être. En effet, depuis les travaux de terrain de l'été 2000, la compréhension de l'écoulement, de la distribution de la contamination et des sources de TCE a continuellement évolué. Les hypothèses et faits de base sont restés les mêmes, mais diverses « découvertes » ont permis de faire avancer la compréhension du site. Ainsi la distribution du TCE dans l'eau souterraine et celle de la couche silteuse prodeltaïque étaient moins bien définies initialement. Suite aux travaux de caractérisation, une meilleure connaissance du milieu aquifère a été possible ce qui a modifié les hypothèses sur la migration du TCE et sur l'écoulement de l'eau souterraine. Il est bon de spécifier que l'avancement de la compréhension du site s'est faite suite à la proposition d'hypothèses nombreuses et variées qui ont été discutées, retenues ou rejetées. L'interaction et la consultation entre les membres d'une équipe sont des éléments essentiels dans l'évolution des idées lors de travaux d'une telle importance.

La définition d'un panache de contamination d'envergure régional, tel que celui de Valcartier, exige une connaissance précise de l'écoulement de l'eau souterraine, qui contrôle principalement la migration des contaminants. L'expérience de la caractérisation environnementale à Valcartier démontre clairement que l'utilisation de plusieurs techniques de détection de contaminants (puits

d'observation, sondage Géoprobe, échantillonnage discret) amène une meilleure définition de l'étendue de la contamination. Les techniques d'échantillonnage se doivent d'être adaptées aux contaminants recherchés. L'utilisation de méthodes et d'appareils d'échantillonnage visant à limiter la volatilisation des contaminants est primordiale lorsque les contaminants sont des composés organiques volatils. Pour parfaire la caractérisation environnementale à Valcartier, des sondages ou forages supplémentaires pourraient être réalisés à une échelle plus réduite dans les différentes zones sources afin d'identifier plus précisément la position des zones d'émissions de fortes concentrations de TCE. Une caractérisation plus poussée de la couche silteuse prodeltaïque à RDDC Nord pourrait permettre d'identifier exactement une zone source potentielle et de valider le modèle conceptuel d'émission du TCE dans ce secteur. Les méthodes utilisées devraient par contre être choisies avec l'objectif de limiter la remobilisation des contaminants. Régionalement, le panache est bien défini pour la gestion de la problématique et pour la prise de décisions de gestion de l'aquifère. Un seul secteur est moins bien caractérisé, soit le secteur est à la limite des propriétés du MDN, de SNC TEC et de la ville de Québec. Des puits d'observations supplémentaires permettraient de connaître l'extension maximale du panache qui n'est pas encore définie à l'est du secteur.

L'approche de l'étude des caractéristiques de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport de masse par modélisation numérique à Valcartier s'est avérée efficace. Des travaux futurs de modélisation pourraient être utiles pour la conception de systèmes de restauration ou de contrôle de la contamination. À ce moment, des modèles plus petits en étendue pourraient être développés à partir du modèle régional développé. Une telle approche télescopique utiliserait les conditions aux limites déterminées par les simulations régionales. L'avantage de l'approche télescopique est grand puisqu'un maillage de plus petite étendue peut être raffiné plus finement pour des simulations de transport par exemple. Les simulations numériques pourraient aussi servir à simuler le transport réactif à l'aide des données hydrogéochimiques disponibles. Ceci permettrait, entre autre, de définir une constante de dégradation à quelques endroits dans le panache. Une étude par modélisation numérique du côté de la rivière Jacques-Cartier permettrait aussi de mieux définir l'interaction entre le panache et la rivière, milieu récepteur atteint par le panache de TCE dissous. Le calage du modèle d'écoulement avec le débit de base de la rivière Jacques-Cartier permettrait de renforcer la confiance dans les résultats de simulations

numériques. Une autre précision qui pourrait être apportée serait d'inclure des zones de conductivités hydrauliques différentes dans l'unité proglaciaire dans le modèle, ce qui permettrait de mieux représenter le caractère plutôt hétérogène de cette unité. Enfin, pour mieux comprendre les processus qui contrôlent l'émission du TCE dans les zones sources de la RDDC Nord, un modèle local permettrait de mieux comprendre le rôle de la couche silteuse prodeltaïque sur le transport de TCE dans l'aquifère.



BIBLIOGRAPHIE

ADS GROUPE-CONSEIL, 1996 : Détermination de l'aire d'alimentation du puits d'eau potable de la BFC Valcartier. Projet No 18-10-108, ADS Environnement Inc., mars 1996.

AMTEC ENGINEERING, INC., 2001 : Tecplot User's Manual, Version 9.0, 600 p.

ANDERSON, M.P., ET WOESSNER, W.W., 1992 : Applied groundwater modeling – Simulation of flow and advective transport. Academic Press, San Diego, 381 p.

BEAR, J., 1972 : Dynamic of Fluids in the Porous Media. American Elsevier. New York, NY, 764p.

BEHIE, G.A., FORSYTH, P.A., 1984 : Incomplete factorization methods for fully implicit simulation of enhanced oil recovery. SIAM (Soc. Ind. Appl. Math.) J. Sci. Stat. Comput., 5 (3), p. 543-561.

BIO-GÉO ENVIRONNEMENT, 1998 : Étude environnementale phase I - Sources de contamination des eaux souterraines. Bio-Géo Environnement, mars 1998.

BLAIS, V., 2002. Distribution 3D et migration du TCE à RDDC Nord, secteur de Valcartier, (80 pages). Rapport de projet de fin d'étude, Université Laval et INRS-ETE.

BOUTIN, A., LEFEBVRE, R., MARTEL, R., THERRIEN, R., PARENT, M., ET PARADIS, D., 2002 : Hydrogeological mapping of the TCE plume in groundwater in the Valcartier area granular aquifer, Quebec, Canada. Proceedings, 3rd Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conference, 55th Canadian Geotechnical Conference, October 20-23, Niagara Falls, Canada, 1101-1108.

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.

BROOKS, R.J., COREY, A.T., 1964 : Hydraulic properties of porous media, Hydrol. Pap. 3, Colo. State Univ., Fort Collins, 1964.

BUTLER, J.J. ET GARNETT, E.J, 2000 : Simple procedure for analysis of slug test in formations of high hydraulic conductivity using spreadsheet and scientific graphic software. Kansas Geological Survey Open File Report 2000-40 (WWW.KGS.UKANS.EDU/HYDRO/PUBLICATIONS/OFR00_40/)

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

BYU, 2000 : Department of Defense Groundwater Modeling System (GMS), Version 3.1, Tutorial Manual. Brigham Young University – Environmental Modeling Research Laboratory.

CARSEL, R.F., PARRISH, R.S. 1988 : Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics, *Water Resources Research*, vol. 24, no.5, p. 755-769.

COMPAGNIE INTERNATIONALE DES EAUX LTÉE, 1977 : Étude hydrogéologique pour l'alimentation en eau potable par captage d'eau souterraine dans le secteur de Val-Bélair. Référence 1-1-01-2214-20, 31 août 1977, 10 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).

CONSTRUCTION DE DÉFENSE CANADA (CDC), 1999 : Mesures du niveau d'eau dans les puits d'observation sur le territoire de la base militaire de Valcartier. Liste des mesures de niveau d'eau, septembre 1999.

CONSULTANTS HGE, 2001 : Rapport technique, Analyse des TCE réalisés sur les puits présents sur le territoire de la ville de Val-Bélair. 4 p. et annexes.

CONSULTANTS HGE, 1999 : Rapport de caractérisation hydrogéologique - Version finale. No. de projet VR 849 17, no. de contrat KN 11461, Consultants HGE, mars 1999.

CONSULTANTS HGE, 1993 : Ville de Val-Bélair, Secteurs Nord et Henri IV/Industriel, Recherche en eau, phase exploratoire. 24 p. et annexes.

COOLEY, R.L., 1983 : Some new procedures for numerical solution of variably saturated flow problems. *Water Resour. Res.*, 19 (5), p. 1271-1285.

DESSAU-SOPRIN, 2002 : Campagne de forages environnementaux et d'échantillonnage de l'eau souterraine à la Garnison Valcartier et au CRDV, Caractérisation environnementale, Phase VII, Problématique du TCE, Rapport préliminaire, 2 volumes.

DESSAU-SOPRIN, 2001 : Campagne de forages environnementaux à l'USS Valcartier, caractérisation hydrogéologique, Phase VI, Problématique du TCE.

DESSAU-SOPRIN, 1999A : Campagne de forages environnementaux à l'USS Valcartier et au CRDV ; Caractérisation hydrogéologique - Problématique du TCE. No. de référence 458036-400-001, Dessau-Soprin, août 1999.

DESSAU-SOPRIN, 1999B : Campagne de forages environnementaux à l'USS Valcartier et au CRDV ; Caractérisation hydrogéologique - Phase III - Problématique du TCE. No. de référence 458074-100-001, Dessau-Soprin, novembre 1999.

DOMENICO, P.A., ET SCHWARTZ, F.W., 1998: *Physical and chemical hydrogeology*. John Wiley & Sons, Second Edition, New York.

ENVIROCONSEIL, 2001 : Surveillance des travaux de caractérisation hydrogéologique du secteur des Bâtiments 67, 76 et 98 au CRDV, 30 p.

ENVIROCONSEIL, 1998 : Détermination des périmètres de protection des puits no 2, 4 et 5 d'approvisionnement en eau potable de la BFC Valcartier. No de dossier E-20021-12, Enviroconseil, janvier 1998.

FAGNAN, N., BOURQUE, E., MICHAUD, Y., LEFEBVRE, R., BOISVERT, E., PARENT, M., MARTEL, R. 1999 : Hydrogéologie des complexes deltaïques sur la marge nord de la mer de Champlain, Québec, Hydrogéologie, no. 4, 1999, p. 9-22.

FETTER, C.W. 1999: Contaminant Hydrogeology second edition, Prentice Hall, 500 p.

FORSYTH, P.A., 1991 : A control volume finite element approach to NAPL groundwater contamination. SIAM (Soc. Ind. Appl. Math.) J. Sci. Stat. Comput., 12 (5), p. 1029-1057.

FORSYTH, P.A., SIMPSON, R.B., 1991: A two phase, two component model for natural convection in a porous medium. Int. J. Num. Meth. Fluids, 12, p. 655-682.

FREEZE, R.A., ET CHERRY, J.A., 1979: Groundwater. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.

FRIND, E.O., 1982 : Simulation of long term transient density-dependent transport in groundwater, Adv. Water Res., 5 (2), p. 73-88.

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

HAMEL, A., 2002 : Évaluation de la recharge et des patrons d'écoulement régionaux des aquifères fracturés du Sud-Ouest du Québec, Mémoire de maîtrise, Université Laval.

HEALY, R.W., COOK, P.G. 2002: Using groundwater levels to estimate recharge, Hydrogeology Journal, 10, p. 91-109.

HUYAKORN, P.S., PINDER, G.F., 1983 : Computational Methods in Subsurface Flow. Academic Press, New York, NY.

HUYAKORN, P.S., THOMAS, S.D., THOMPSON, B.M., 1984: Techniques for making finite elements competitive in modeling flow in variably saturated porous media. Water Resour. Res., 19 (4), p. 1019-1035.

KIPP, K.L.JR., 1987: Computer Code for Simulation of Heat and Solute Transport in Three-Dimensional Ground-Water Flow Systems, U.S. Geological Survey Water Resources Investigation Report 86-4095.

KONIKOW, L.F., 1978 : Calibration of ground-water models, In : Verification of Mathematical and Physical Modles in Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineerins, N.Y., p. 87-93.

KROPINSKI, M.C.A, 1990 : Numerical techniques for saturated-unsaturated groundwater flow. M.Sc. Thesis, University of Waterloo, Waterloo, Ont.

KRUSEMAN , G.P., ET DE RIDDER, N.A., 1994 : Analysis and evaluation of pumping test data (2nd edition, completely revised). International Institute for Land Reclamation and Improvement, The Netherlands, 377 p.

LAROSE-CHARETTE, D., 2000 : Modélisation hydrogéologique régionale des aquifères libres de la MRC de Portneuf, Mémoire de maîtrise, INRS-Georessources, 308 p.

LEFEBVRE, R., BOUTIN, A., MARTEL, R., PARENT, M., BLAIS, V. 2003 : Caractérisation et modélisation numérique de l'écoulement et de la migration de la contamination en TCE dans l'eau souterraine du secteur Valcartier, Québec, Canada, Rapport final de l'INRS-ETE au Ministère de la Défense Nationale, 98 p. plus figures et annexes.

LEFEBVRE, R., BOUTIN, A., MARTEL, R., ET PARENT, M., 2002 : Caractérisation de l'écoulement et de la contamination en TCE dans l'eau souterraine du secteur Valcartier, Québec, Canada. Rapport Intérimaire de l'INRS-ETE au Ministère de la Défense Nationale, Version finale, 17 mai 2002, 27 p. plus annexes et cartes.

LEPAGE, N. 1996: Modélisation tridimensionnelle régionale et locale de l'écoulement de l'eau souterraine sur l'île de Montréal et au centre de tri et d'élimination des déchets de la Ville de Montréal, Mémoire de maîtrise, INRS-Géoressources, 354 p.

LEVY, B.S., ET PANNELL, L., 1991 : Evaluation of a pressure system for estimating in-situ hydraulic conductivity. Ground Water Management No. 5, *Proceedings 5th National Outdoor Action Conference*, Las Vegas, NV, 31-45.

MAILLOUX, M., 2002. Caractérisation hydrogéologique et modélisation numérique du comportement des matériaux énergétiques à un champ de tir anti-char. Mémoire de maîtrise (M.Sc.), Université du Québec (INRS-Géoressources), Québec, Canada, 70 p.

MAILLOUX, M., MARTEL R., ROY N., LEFEBVRE R., MICHAUD, Y., ET PARENT, M., 1999 : Étude sur le comportement des matériaux énergétiques au champ de tir antichar Arnhem (USS Valcartier). Rapport d'expertise soumis au CRDV et à l'USS Valcartier, Phase 1, INRS-Géoressources, août 1999.

MARSILY, G. DE, 1986. Quantitative hydrogeology - Groundwater hydrology for engineers. Academic Press, Inc., San Diego, CA.

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., cartes et annexes.

MAXEY, G.B., 1964 : Hydrostratigraphic units, *Journal of Hydrology*, 2, p. 124-129.

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 de Valcartier. Rapport interne soumis à l'USS Valcartier (1 CD-ROM et 2 cartes), juin 1999.

MINISTÈRE DE LA DÉFENSE NATIONALE (MDN), 1994 : Carte topographique de la Base des Forces canadiennes (BFC) de Valcartier. Service de cartographie, Série A702, Carte MCE 124 TR 94, cinquième édition, 1994.

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA FAUNE DU QUÉBEC (MEF), 1984 : Annuaire de puits et forages. Direction des politiques des secteurs agricole et naturel. Rapport H.G.P.-10.

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DU QUÉBEC (MENV), 1994 : Échantillonnage des eaux souterraines. Dans le Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales. Le griffon d'argile, Québec, 102 p.

MUALEM, Y., 1976 : A new model to predict the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 12, p. 513-522 dans Therrien et Sudicky

ROCHE, 2001 : USS Valcartier, Étude de scénarios d'approvisionnement en eau potable, étude d'avant projet,

SANTÉ CANADA, 1997 : Enquête concernant la présence de TCE dans l'eau potable du CRDV et de l'USS Valcartier. Santé Canada, 1997.

SEDAC ENVIRONNEMENT, 2000 : Campagne de supervision de travaux de forage Unité de Soutien de Secteur de Valcartier ". Rapport #G00-949-02.

SNC-LAVALIN ENVIRONNEMENT, " Rapports de forages ". Documents soumis à SNC TEC (anciennement Technologies Industrielles SNC) comprenant les forages des campagnes effectuées en 1990, 1991, 1994, 1995, 1996 et 1997

SNC-LAVALIN ENVIRONNEMENT, différents rapports de caractérisation environnementale complétés sur les terrains de SNC-TEC

SPRINGER, R.K., L.W. GELHAR. 1991: Characterization of large-scale aquifer heterogeneity in glacial outwash by analysis of slug tests with oscillatory response, Cape Cod, Massachusetts, in U.S. Geol. Surv. Water Res. Invest. Rep. 91-4034:36-40.

THERRIEN, R., SUDICKY, E.A., MCLAREN, R.G., 2001: FRAC3DVS: An Efficient Simulator for Three-dimensional, Saturated-Unsaturated Groundwater Flow and Density-dependent, Chain-Decay Solute Transport in Porous, Discretely-Fractured Porous or Dual-Porosity Formations, Input-Output User's Guide, 79p.

THERRIEN, R. ET SUDICKY, E.A., 1996 : Three dimensional analysis of variably saturated flow and solute transport in discretely-fractured porous media. *J. Contam. Hydrol.*, 23, 1-44.

TODD, D.K., 1980. *Groundwater Hydrology*, John Wiley and Sons, 535p.

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.

VAN GENUCHTEN, M.TH., 1980 : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sc. Soc. Am. J.*, 44, 892-898.

VOSS, C.I., 1984 : SUTRA – A Finite Elements Simulation Model for Saturated-Unsaturated, Fluid-Density-Dependent Ground Water Flow with Energy Transport or Chemical Reactive Singel-Species Solute Transport, U.S. Geological Survey Water Resources Investigation Report, 84-4369, 409 p.

VUKOVIC, M., SORO, A., 1992 : Determination of hydraulic conductivity of porous media from grain-size composition, Water Resources Publications, 83 p.

WEIDMEYER, T.H., SWANSON, M.A., MOUTOUX, D.E., GORDON, E.K., WILSON, J.T., WILSON, B.H., KAMPBELL, D.H., HASS, P.E., MILLER, R.N., HANSEN, J.E., ET CHAPELLE, F.H., 1998 : Technical protocol for evaluating natural attenuation of chlorinated solvents in ground water. U.S. EPA, Report EPA/600/R-98/128, September, 1998, 78 p. and appendices.

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

ZLOTNIK, V.A., MCGUIRE, V.L., 1998 : Multi-level slug tests in highly permeable formations : 1. Modification of the Springer-Gelhar (SG) model. *Journal of Hydrology*, 204, p. 271-282.

TABLEAUX



Tableau 1.1 : Travaux de terrain par secteur réalisés avant août 2001

| SECTEUR | TYPE DE TRAVAUX RÉALISÉS |
|--|---|
| Garnison Valcartier | <ul style="list-style-type: none"> - Installation de puits d'observation de l'eau souterraine (1998-2001) - Étude historique de l'utilisation du site (1998) - Échantillonnage et analyse de sols et d'eau souterraine (1998-2001) - Création d'un réseau de puits d'alerte à proximité des puits d'approvisionnement en eau potable P-2 et P-4 (2000) - Mesure <i>in situ</i> de vitesse et de direction d'écoulement de l'eau souterraine (1999-2001) - Essais de perméabilité (1998-2001) - Recherche en eau souterraine (2001) - Travaux de géophysique (1998-1999 et 2001) |
| RDDC Valcartier | <ul style="list-style-type: none"> - Installation de puits d'observation de l'eau souterraine (1998-2001) - Échantillonnage et analyse de sols et d'eau souterraine (1998-2001) - Étude historique de l'utilisation du site (1998) - Caractérisation de sources potentielles (1999-2001) - Échantillonnage d'air interstitiel (2001) - Travaux de géophysique (méthodes géoradar, sismique, et électromagnétique) (1998, 1999, 2001) - Mesure <i>in situ</i> de vitesse et de direction d'écoulement de l'eau souterraine (1999-2001) - Essais de perméabilité (1998-2001) |
| SNC TEC | <ul style="list-style-type: none"> - Installation de puits d'observation de l'eau souterraine - Échantillonnage et analyse de sols et d'eau souterraine - Instauration d'un système de pompage et traitement de l'eau souterraine contaminée au secteur 214 - Travaux de géophysique - Excavation de sols contaminés à différents endroits et enfouissement dans une cellule à sécurité maximale |
| Shannon | <ul style="list-style-type: none"> - Échantillonnage et analyse de l'eau souterraine dans des puits privés (2000-2001) - Étude historique de l'utilisation du territoire (2001) |
| Val-Bélair (Arrondissement 8, Ville de Québec) | <ul style="list-style-type: none"> - Installation de puits d'observation de l'eau souterraine, servant de puits d'alerte pour les puits d'alimentation en eau potable de la municipalité - Échantillonnage et analyse d'eau souterraine - Recherche en eau souterraine pour approvisionnement futur (forage, géophysique, analyses chimiques d'eau souterraine) |

Tableau 1.2 : Sources des données utiles à la compréhension de la problématique

| ORGANISMES | TYPE DE DONNÉES FOURNIES |
|--|---|
| Garnison Valcartier | <ul style="list-style-type: none"> - Analyses chimiques de sols et d'eau souterraine - Données piézométriques (niveaux d'eau) - Descriptions stratigraphiques et détail de la construction des puits d'observation de l'eau souterraine - Études historiques - Rapports de caractérisation environnementale |
| RDDC Valcartier | <ul style="list-style-type: none"> - Analyses chimiques de sols et d'eau souterraine - Données piézométriques (niveaux d'eau) - Descriptions stratigraphiques et détail de la construction des puits d'observation de l'eau souterraine - Études historiques - Profilage de la contamination en TCE avec le Geoprobe - Rapports de caractérisation environnementale |
| SNC TEC | <ul style="list-style-type: none"> - Analyses chimiques de sols et d'eau souterraine - Données piézométriques (niveaux d'eau) - Descriptions stratigraphiques et détail de la construction des puits d'observation de l'eau souterraine - Rapports de caractérisation environnementale - Données sur les anciens puits d'approvisionnement d'eau souterraine - Profilage de la contamination en TCE avec le Geoprobe |
| INRS-ETE | <ul style="list-style-type: none"> - Mesure de la vitesse et de la direction d'écoulement de l'eau souterraine avec l'appareil Geoflo - Essais de perméabilité pour estimer les conductivités hydrauliques - Échantillonnage discret - Piézométrie à Shannon et à Val-Bélair - Géoradar - Hydrogrammes de puits d'observation - Analyses de terrain (TCE) des échantillons d'eau souterraine provenant du profilage Geoprobe |
| Shannon | <ul style="list-style-type: none"> - Plan de localisation des puits privés - Analyses chimiques du TCE dans l'eau souterraine dans des puits privés |
| Val-Bélair (Arrondissement 8, Ville de Québec) | <ul style="list-style-type: none"> - Analyses chimiques de l'eau souterraine - Descriptions stratigraphiques et détail de la construction des puits d'observation de l'eau souterraine - Données piézométriques (niveaux d'eau) - Rapport de recherche en eau souterraine - Rapports de caractérisation environnementale |
| Ministère de l'Environnement du Québec | <ul style="list-style-type: none"> - Données stratigraphiques provenant de l'annuaire de puisatiers - Suivi du TCE dans les puits de Shannon |

Tableau 1.3 : Évolution de l'information disponible dans le secteur Valcartier
(chimique, stratigraphique, hydrogéologique)

| | Type d'informations | Terrains MDN | | | Autres secteurs (Shannon, Val-Bélair, SNC-TEC) | Tous Total région | |
|------------------|---|------------------|--------------------|----------------------|---|----------------------|-------|
| | | Site | Avant automne 2001 | Pendant automne 2001 | | | Total |
| Forages et puits | <i>Forages Rotasonic</i> | Garnison | 0 | 27 | 27 | Non disponible | ≥65 |
| | | RDDC | 0 | 38 | 38 | | |
| | <i>Puits d'observation</i> | Garnison | ≈140 ^a | 167 | ≈659 | ≈150 | ≈809 |
| | | RDDC | 123 ⁺ | 229 | | | |
| Hydrogéochimie | <i>Analyses COV* dans l'eau souterraine</i> | Garnison et RDDC | ≈400 | ≈600 | 1000 | ≈1000 | ≈2000 |
| | <i>Sondages Géoprobe</i> | Garnison | 0 | 1 | 1 | 29 | 212 |
| | | RDDC | 0 | 182 | 182 | | |
| Hydrogéologie | <i>Piézométrie (lectures)</i> | Garnison et RDDC | ≈200 | ≈600 | ≈800 | ≈150 | ≈950 |
| | <i>Essais de perméabilité</i> | Garnison et RDDC | 28 | 670 | 698 | Non-disponible | 698 |

* : Analyses pour les composés organiques volatils (COV).

a : Incluant environ 85 puits installés à d'autres sites de la Garnison pour des fins autres que celles reliées à la problématique du TCE.

+ : Incluant 18 puits d'observation installés au secteur Essais en décembre 2001.

Tableau 2.1 Données de profondeur au roc disponibles

| Puits | X (UTM NAD 83) (m) | Y (UTM NAD 83) (m) | Profondeur du roc (m) | Altitude du roc (m) |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------|
| B251-1-19m | 310922.17 | 5194252.83 | 23.16 | 150.52 |
| B73-1-40m | 311579.08 | 5195372.61 | 41.45 | 131.81 |
| C2-4-25m | 310795.92 | 5195223.88 | 24.58 | 149.93 |
| C2-6-31m | 310884.51 | 5195194.23 | 41.53 | 132.77 |
| C3-4-40m | 311492.73 | 5195184.70 | 42.24 | 131.03 |
| C4-2-27m | 310882.17 | 5194640.39 | 26.92 | 146.00 |
| C4-5-27m | 311110.76 | 5194568.89 | 33.22 | 138.93 |
| C5-2-27m | 311261.84 | 5194321.81 | 27.08 | 145.81 |
| C6-1-39m | 311911.77 | 5194558.86 | 39.41 | 132.09 |
| C6-3-37m | 311888.27 | 5194383.58 | 36.88 | 133.87 |
| C9-5-34m | 311792.78 | 5195004.24 | 33.54 | 139.06 |
| F-20 | 309735.83 | 5194650.98 | 9.75 | 183.25 |
| F-26 | 309472.50 | 5195277.11 | 2.31 | 171.18 |
| H1-roc | 311462.26 | 5194914.35 | 44.00 | 128.47 |
| H3B-roc | 310755.49 | 5195597.96 | 45.50 | 129.45 |
| PO-106-45 | 308476.36 | 5195459.36 | 39.93 | 129.09 |
| PO-107-30 | 308606.84 | 5195657.98 | 32.10 | 136.59 |
| PO-118-42 | 308813.04 | 5195417.57 | 41.70 | 127.95 |
| PO-125-41 | 309156.89 | 5195562.03 | 40.31 | 131.30 |
| PO-127-32 | 309210.46 | 5195488.65 | 35.28 | 133.99 |
| PO-128-35 | 309258.42 | 5195274.20 | 34.90 | 137.34 |
| PO-135-21 | 309473.24 | 5195581.70 | 20.79 | 155.50 |
| PO-136-24 | 309647.48 | 5195667.37 | 23.87 | 152.85 |
| PO-138-28 | 309733.80 | 5195636.45 | 29.41 | 147.33 |
| PO-140-18 | 309761.70 | 5195505.17 | 17.37 | 159.07 |
| PO-145-49 | 309978.20 | 5195913.76 | 49.74 | 127.11 |
| PO-154-32 | 310147.49 | 5195371.66 | 33.77 | 141.79 |
| PO-161-38 | 310380.76 | 5195536.17 | 37.72 | 138.11 |
| PO-168-38 | 310660.83 | 5195265.85 | 39.11 | 135.71 |
| PO-173-24 | 311917.49 | 5195492.49 | 26.97 | 145.25 |
| PO-175-14 | 312094.02 | 5195519.67 | 13.41 | 155.71 |
| PO-176-10 | 312250.57 | 5195472.63 | 9.45 | 165.00 |
| PO-178-16 | 312070.94 | 5195159.51 | 16.09 | 154.50 |
| PO-179-34 | 311866.08 | 5194922.91 | 34.15 | 138.45 |
| PO-181-19 | 311985.84 | 5194925.90 | 20.73 | 151.87 |
| PO-68 | 312626.11 | 5198395.05 | 38.71 | 139.82 |
| PO-77 | 310053.10 | 5201780.77 | 38.4 | 134.90 |
| Pz-100A | 309831.45 | 5195252.35 | 16.03 | 160.18 |
| Pz-101A | 310171.81 | 5195260.24 | 26.82 | 148.69 |
| Pz-102A | 310318.72 | 5195257.72 | 37.97 | 137.18 |
| Pz-103A | 310262.87 | 5195019.67 | 21.44 | 154.04 |
| Pz-104A | 310132.05 | 5195026.48 | 20.84 | 154.94 |
| Pz-105A | 310004.95 | 5195019.64 | 15.12 | 160.98 |
| Pz-39A-94 (50m) | 311313.41 | 5194979.97 | 44.55 | 128.55 |
| Pz-53-95 | 311314.40 | 5194768.95 | 37.36 | 135.01 |
| Pz-74-97A | 311344.13 | 5194730.78 | 35.26 | 136.75 |
| Pz-93A | 309652.22 | 5195247.39 | 18.64 | 157.40 |
| Pz-94A | 310153.61 | 5194692.20 | 10.06 | 165.70 |

| Puits | X (UTM NAD 83) (m) | Y (UTM NAD 83) (m) | Profondeur du roc (m) | Altitude du roc (m) |
|------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------|
| S3-3 | 310863.36 | 5194009.64 | 7.01 | 173.10 |
| SVB-23-bas | 312390.75 | 5194297.77 | 39.30 | 127.67 |
| SVB-24 | 312333.93 | 5194165.62 | 43.90 | 124.27 |
| SVB-25 | 312424.25 | 5194299.69 | 26.20 | 142.98 |
| SVB-26 | 312755.62 | 5193867.01 | 41.40 | 126.66 |
| SVB-27 | 312714.66 | 5193766.02 | 35.00 | 132.63 |
| SVB-28 | 313354.77 | 5193873.83 | 23.50 | 140.82 |
| SVB-30 | 313119.79 | 5193960.58 | 40.80 | 126.90 |
| SVB-31 | 313036.41 | 5193782.87 | 39.60 | 127.69 |
| SVB-32 | | | 36.30 | 121.93 |
| SVB-35C | 312247.85 | 5194247.47 | 41.76 | 127.17 |
| SVB-36C | 311992.55 | 5194619.36 | 50.90 | 119.62 |
| SVB-37C | 312142.46 | 5194149.17 | 39.30 | 130.86 |
| SVB-38C | 312137.40 | 5194070.00 | 28.04 | 141.86 |
| SVB-39D | 311974.63 | 5194002.50 | 28.65 | 141.88 |
| U10j-1 | 312315.35 | 5195677.05 | 3.35 | 171.34 |

Tableau 2.2 Unités hydrostratigraphiques présentes dans le secteur Valcartier

| Unités hydrostratigraphiques | Origine et description |
|-------------------------------|---|
| Till | Mis en place lors de l'avancée et du retrait des glaciers lors de la dernière phase glaciaire. Composé d'un diamicton silto-argileux compact et imperméable |
| Sable et gravier proglaciaire | Les eaux de fontes générées lors du retrait du glacier à la fin de la période glaciaire ont entraînés la déposition de l'unité. Présence de chenaux sous-glaciaires et de cônes sous-aquatiques composés de sables et graviers d'épaisseurs variables et présent à la Garnison, à la RDDC Nord et Sud ainsi que chez SNC TEC. Les épaisseurs sont généralement plus importantes à l'ouest du secteur dans la vallée glaciaire enfouie vers Shannon. |
| Silt glaciomarin | La déposition du silt glaciomarin aurait été provoquée par une baisse du taux de sédimentation après la phase proglaciaire. Le silt glaciomarin a été observé dans de nombreux forages à l'ouest de la Garnison et à la RDDC Nord et Sud. |
| Sable deltaïque | Plus grossier à l'ouest dans l'axe de la vallée enfouie, tandis qu'il est plus fin vers l'est à RDDC Nord et Sud ainsi que dans la vallée enfouie de l'arrondissement de Val-Bélair. En périphérie du delta des sédiments prodeltaïques silto-argileux se sont déposés recoupant alors les sables deltaïques. Les variations du niveau marin causées par le relevement isostatique ont causé la progradation du delta sur ses propres sédiments. Les sédiments deltaïques reposent sur le silt glaciomarin, les sédiments proglaciaires ou directement sur le roc selon le secteur. Les sables et graviers deltaïques sont divisés à l'est par la couche silteuse prodeltaïque entre 160 m d'altitude et la surface du sol. |
| Silt prodeltaïque | Cette unité a une épaisseur de 5 à 15 m, entre 155 et 170 m d'altitude, dans le secteur de RDDC Nord et des champs de tir Batoche/Cambrai/Normandie de la Garnison Valcartier. À RDDC Sud, ces silts prodeltaïques forment une unité distincte de celle des silts glaciomarins, une autre unité silteuse située plus en profondeur surmontant l'unité proglaciaire et surmontée par une couche de sable moyen d'origine deltaïque. La couche silteuse prodeltaïque est située principalement entre 150 et 165 m d'altitude et elle s'insère au sein de la séquence deltaïque alors que les silts glaciomarins s'insèrent entre les sédiments deltaïques et proglaciaires. |

Tableau 3.1 : Statistiques descriptives des résultats des essais de perméabilité

| Unité | Nombre de données | Conductivité hydraulique K moyenne (m/s) | Conductivité hydraulique K médiane (m/s) |
|--------------|-------------------|--|--|
| Deltaïque | 632 | $3,39 \times 10^{-4}$ | $3,22 \times 10^{-4}$ |
| Proglaciaire | 52 | $1,35 \times 10^{-4}$ | $3,25 \times 10^{-5}$ |
| Prodeltaïque | 14 | $1,59 \times 10^{-5}$ | $1,44 \times 10^{-5}$ |
| Total | 698 | $3,17 \times 10^{-4}$ | $2,77 \times 10^{-4}$ |

Tableau 3.2 Estimation du volume d'eau contenant du TCE dissous et de la masse de TCE dissous dans le panache du secteur Valcartier en 2001

| Panache | Aire (km ²) | Épaisseur (m) | Porosité (-) | Volume (10 ⁶ m ³) | [TCE] moyenne (µg/L) ^a | Masse de TCE (kg) |
|--------------|-------------------------|---------------|--------------|--|-----------------------------------|-------------------|
| > 50 µg/L | 1,30 | 20 | 0,33 | 8,60 | 177 | 1 522 |
| < 50 µg/L | 1,86 | 20 | 0,33 | 12,26 | 5,77 | 71 |
| Total | 3,16 | 0 | 0,33 | 20,86 | 107,1^b | 1 593 |

a : la concentration moyenne en TCE pour les parties du panache avec des concentrations supérieures et inférieures à 50 µg/L a été estimée à partir des toutes les analyses disponibles dans des puits d'observation pour 2001.

b : la concentration moyenne en TCE dans tout le panache est une moyenne pondérée par rapport aux volumes des concentrations inférieures et supérieures à 50 µg/L.

Tableau 4.1 Sommaire des principales caractéristiques du modèle d'écoulement

| Zone de conductivités hydrauliques | Unités hydrostratigraphiques | Nombre d'éléments par zone | Nb. de couche dans le modèle |
|------------------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 1 | Proglaciaire | 142 272 | 4 |
| 2 | Deltaïque supérieure | 46 177 | 10 |
| 3 | Deltaïque supérieure | 96 156 | |
| 4 | Deltaïque supérieure | 160 844 | |
| 5 | Deltaïque supérieure | 111 094 | |
| 6 | Deltaïque supérieure | 30 413 | |
| 7 | Deltaïque supérieure | 37 979 | |
| 8 | Deltaïque supérieure | 12 824 | |
| 9 | Deltaïque supérieure | 3 151 | |
| 10 | Deltaïque supérieure | 220 | |
| 11 | Deltaïque inférieure | 9 327 | |
| 12 | Deltaïque inférieure | 120 619 | |
| 13 | Deltaïque inférieure | 93 713 | |
| 14 | Deltaïque inférieure | 58 700 | |
| 15 | Deltaïque inférieure | 12 029 | |
| 16 | Deltaïque inférieure | 6 072 | |
| 17 | Deltaïque inférieure | 2 956 | |
| 18 | Couche silteuse prodeltaïque | 70 230 | 6 |
| 19 | Silt glaciomarin | 52 264 | 2 |
| Total | | | |
| 19 | 4 | 1 067 040 | 30 |

Tableau 4.2 Sommaire des paramètres et des conditions aux limites du modèle calé

A) Paramètres hydrauliques et capillaire du modèle calé

| Zone | Conductivité hydraulique (m/s) | | | Porosité | Paramètres capillaires | | | | Pression d'entrée d'air (m) |
|----------------------|--------------------------------|----------------------|----------------------|----------|---------------------------|----------|---------|----------|-----------------------------|
| | K_x | K_y | K_z | | S_{wr} | α | β | γ | |
| 1 | $3,0 \times 10^{-4}$ | $3,0 \times 10^{-4}$ | $3,0 \times 10^{-5}$ | 0,33 | 0,12 | 14,5 | 2 | 0,35 | -0,35 |
| 2 | $8,0 \times 10^{-5}$ | $8,0 \times 10^{-5}$ | $8,0 \times 10^{-6}$ | 0,33 | 0,12 | 14,5 | 2 | 0,35 | -0,35 |
| 3 | $6,0 \times 10^{-5}$ | $6,0 \times 10^{-5}$ | $6,0 \times 10^{-6}$ | 0,33 | 0,12 | 14,5 | 2 | 0,35 | -0,35 |
| 4 | $4,0 \times 10^{-5}$ | $4,0 \times 10^{-5}$ | $4,0 \times 10^{-6}$ | 0,33 | 0,12 | 14,5 | 2 | 0,35 | -0,35 |
| 5 | $1,0 \times 10^{-5}$ | $1,0 \times 10^{-5}$ | $1,0 \times 10^{-6}$ | 0,33 | 0,12 | 14,5 | 2 | 0,35 | -0,35 |
| 6 | $9,0 \times 10^{-6}$ | $9,0 \times 10^{-6}$ | $9,0 \times 10^{-7}$ | 0,33 | 0,12 | 14,5 | 2 | 0,35 | -0,35 |
| 7 | $7,0 \times 10^{-6}$ | $7,0 \times 10^{-6}$ | $7,0 \times 10^{-7}$ | 0,33 | 0,12 | 14,5 | 2 | 0,35 | -0,35 |
| 8 | $5,0 \times 10^{-6}$ | $5,0 \times 10^{-6}$ | $5,0 \times 10^{-7}$ | 0,33 | 0,12 | 14,5 | 2 | 0,35 | -0,35 |
| 9 | $4,0 \times 10^{-6}$ | $4,0 \times 10^{-6}$ | $4,0 \times 10^{-7}$ | 0,33 | 0,12 | 14,5 | 2 | 0,35 | -0,35 |
| 10 | $3,0 \times 10^{-6}$ | $3,0 \times 10^{-6}$ | $3,0 \times 10^{-7}$ | 0,33 | 0,12 | 14,5 | 2 | 0,35 | -0,35 |
| 11 | $3,0 \times 10^{-4}$ | $3,0 \times 10^{-4}$ | $3,0 \times 10^{-5}$ | 0,33 | 0,12 | 14,5 | 2 | 0,35 | -0,35 |
| 12 | $1,5 \times 10^{-4}$ | $1,5 \times 10^{-4}$ | $1,5 \times 10^{-5}$ | 0,33 | 0,12 | 14,5 | 2 | 0,35 | -0,35 |
| 13 | $1,1 \times 10^{-4}$ | $1,1 \times 10^{-4}$ | $1,1 \times 10^{-5}$ | 0,33 | 0,12 | 14,5 | 2 | 0,35 | -0,35 |
| 14 | $1,3 \times 10^{-4}$ | $1,3 \times 10^{-4}$ | $1,3 \times 10^{-5}$ | 0,33 | 0,12 | 14,5 | 2 | 0,35 | -0,35 |
| 15 | $7,9 \times 10^{-5}$ | $7,9 \times 10^{-5}$ | $7,9 \times 10^{-6}$ | 0,33 | 0,12 | 14,5 | 2 | 0,35 | -0,35 |
| 16 | $5,0 \times 10^{-5}$ | $5,0 \times 10^{-5}$ | $5,0 \times 10^{-6}$ | 0,33 | 0,12 | 14,5 | 2 | 0,35 | -0,35 |
| 17 | $3,1 \times 10^{-5}$ | $3,1 \times 10^{-5}$ | $3,1 \times 10^{-6}$ | 0,33 | 0,12 | 14,5 | 2 | 0,35 | -0,35 |
| 18 | $1,0 \times 10^{-7}$ | $1,0 \times 10^{-7}$ | $1,0 \times 10^{-9}$ | 0,3 | courbe capillaire tabulée | | | | |
| 19 | $5,0 \times 10^{-5}$ | $5,0 \times 10^{-5}$ | $5,0 \times 10^{-6}$ | 0,3 | courbe capillaire tabulée | | | | |
| Recharge = 350 mm/an | | | | | | | | | |

Tableau 4.2 (suite)

B) Conditions aux limites initiales et après calage du modèle d'écoulement

| Limite | Valeur initiale | Type de limite | Valeur après calage | Type de limite |
|--------|-----------------|------------------|---------------------|------------------|
| A | 155-159.7 m | Rivière J.-C. | 157-159 m | Rivière J.-C. |
| B | Flux nul | Épaisseur totale | Flux nul | Épaisseur totale |
| C | 177m | Semi-captif | 172 m | Semi-captif |
| D | Flux nul | Libre | Flux nul | Libre |
| E | Flux nul | Épaisseur totale | Flux nul | Épaisseur totale |
| F | 165-178m | Rivière Nelson | 164.5-175 m | Rivière Nelson |
| G | Flux nul | Libre | 164.5-168 m | Libre |
| H | 165m | Semi-captif | 167 m | Semi-captif |
| I | Flux nul | Épaisseur totale | Flux nul | Épaisseur totale |
| J | 174m | Libre | 171 m | Libre |
| K | - | - | 169 m | Semi-captif |
| L | Flux nul | Épaisseur totale | Flux nul | Épaisseur totale |
| M | 155m | Libre | 156.5-157 m | Libre |
| N | - | Libre | 157 m | Libre |

C) Conditions de pompage dans les puits d'alimentation du secteur Valcartier

| Simulation sans P-7 | |
|---------------------|------------------------------|
| Puits | Débit (m ³ /jour) |
| P-2 | 1307 |
| P-4 | 916 |
| P-5 | 1984 |
| P-7 | 0 |
| Simulation avec P-7 | |
| Puits | Débit (m ³ /jour) |
| P-2 | 1307 |
| P-4 | 916 |
| P-5 | 1984 |
| P-7 | 1613 |

Tableau 4.3 Bilan volumétrique du modèle d'écoulement calé

| Flux aux limites et aux puits | Flux : m³/s |
|---|-------------------------------|
| Flux entrant aux nœuds de premier type (charge constante) | 0,694 |
| Flux sortant aux nœuds de premier type (charge constante) | -0,785 |
| Flux entrant aux nœuds de deuxième type (flux imposé) | 0,136 |
| Flux sortant aux nœuds de deuxième type (flux imposé) | 0 |
| Flux sortant à des puits de pompage | -0,049 |
| Flux net (entrant – sortant) | $1,27 \times 10^{-4}$ |

Tableau 4.4 Sommaire des paramètres et conditions aux limites modifiées lors de l'étude de sensibilité du modèle

| Paramètres modifiés | Modifications | | | | | | |
|---|----------------------|------|------|------|-----|-----|-----|
| Conductivités hydrauliques | -40% | -30% | -20% | -10% | 10% | 20% | 30% |
| Recharge (mm/an) | 200 | 250 | 300 | 400 | 450 | | |
| Conditions aux limites modifiées | Modifications | | | | | | |
| Limite A+M+N | -2m | -1m | +1m | +2m | | | |
| Limite C | -2m | -1m | +1m | +2m | | | |
| Limite H | -2m | -1m | +1m | +2m | | | |
| Limite J | -2m | -1m | +1m | +2m | | | |
| Limite K | -2m | -1m | +1m | +2m | | | |

Tableau 4.5 Tableau décrivant les conditions aux limites et leur effet au niveau de l'écoulement de l'eau souterraine dans le modèle numérique

| Limites | Type | Effet | Compromis |
|---------|--|---|---|
| A | Charges imposées à la rivière Jacques-Cartier | Drainage de l'aquifère libre régional dans la rivière | |
| B | Flux imposé nul (ligne d'écoulement) | Écoulement nul à travers cette section aquifère | Doit être éloignée des puits de pompage pour éviter une interférence |
| C | Charge imposée dans la nappe semi-captive au nord-est | Position du point singulier dans le secteur de RDDC, et gradient vertical au travers la couche silteuse prodeltaïque | Charge assez haute pour positionner le point singulier le mieux possible par rapport à la piézométrie. Cette condition amène un plus faible gradient à travers la couche silteuse que celui observé |
| D | Flux imposé nul (ligne d'écoulement) | Écoulement nul à travers cette section aquifère | Doit être éloigné des puits de pompage pour éviter une interférence |
| E | Flux imposé nul (fin de l'aquifère au bord du roc) | Écoulement nul à travers cette section aquifère | Suppose que l'aquifère est inexistant en montagne. Ne tient pas compte de l'effet de ruissellement sur le flanc de montagne |
| F | Charges imposées à la rivière Nelson | Drainage de l'aquifère libre dans la rivière | Gradient faible. Imposée pour les nœuds en surface seulement. |
| G | Charges imposées dans la nappe libre du côté sud du modèle | Effet direct sur les charges hydrauliques simulées à RDDC Sud | Charges imposées assez basses pour éviter que le modèle soit saturé sur toute son épaisseur |
| H | Charges imposées dans la nappe semi-captive au sud-est | Position du point singulier dans le secteur de RDDC Nord, et gradient vertical au travers le silt dans le secteur ouest. Limite moins sensible pour le point singulier que la limite C. | Charge assez basse pour la position du point singulier. Valeur de charge hydraulique légèrement inférieure aux charges mesurées dans des piézomètres à proximité. |
| I | Flux imposé nul (ligne d'écoulement) | Écoulement nul dans cette section de l'aquifère | |
| J | Charges imposées dans la nappe libre | Affecte la position du point singulier. Affecte les charges dans la portion sud du modèle | La valeur imposée est plus faible que celle observée sur le terrain. Pour optimiser la position du point singulier |
| K | Charges imposées dans la nappe semi-captive | Affecte la position du point singulier. Affecte les charges dans la portion sud du modèle et le gradient à travers la couche silteuse prodeltaïque | |
| L | Flux imposé nul (ligne d'écoulement) | Écoulement nul dans cette section de l'aquifère | Suppose que l'aquifère est mince dans cette section montagneuse, la portion la plus à l'est de cette limite est perpendiculaire aux isopièzes. Néglige l'effet de ruissellement provenant de la montagne. |
| M | Charges imposées sur toute l'épaisseur du maillage | Draine l'aquifère libre, les charges sont distribuées pour simuler l'effet de la rivière Jacques-Cartier à proximité | Redresse l'écoulement de la nappe libre, pour mieux représenter le cheminement du panache dans le secteur de la limite de propriété ouest de la Garnison |
| N | Charges imposées sur toute l'épaisseur du maillage | Draine l'aquifère libre comme M | La valeur de cette charge imposée contrôle les charges simulées dans le secteur ouest de la Garnison. |

Tableau 4.6 Positions et caractéristiques des sources imposées^a dans le modèle de transport

| Sources | Position | | | | | | Concentrations [TCE] (µg/L) |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|-----------|--------------------------------|
| | X_{min} | X_{max} | Y_{min} | Y_{max} | Z_{min}^b | Z_{max} | |
| Batiment 98 | 311310 | 311360 | 5195390 | 5195550 | 145 | 150 | 50 000 |
| Batiment 71 | 311400 | 311600 | 5195210 | 5195290 | 145 | 150 | 50 000 |
| Cloture Est | 311450 | 311510 | 5195110 | 5195180 | 145 | 150 | 50 000 |
| Secteur 214 | 311100 | 311400 | 5194720 | 5194820 | 145 | 150 | 50 000 |
| Lagune C | 310200 | 310320 | 5195010 | 5195050 | 150 | 166 | 50 000 |

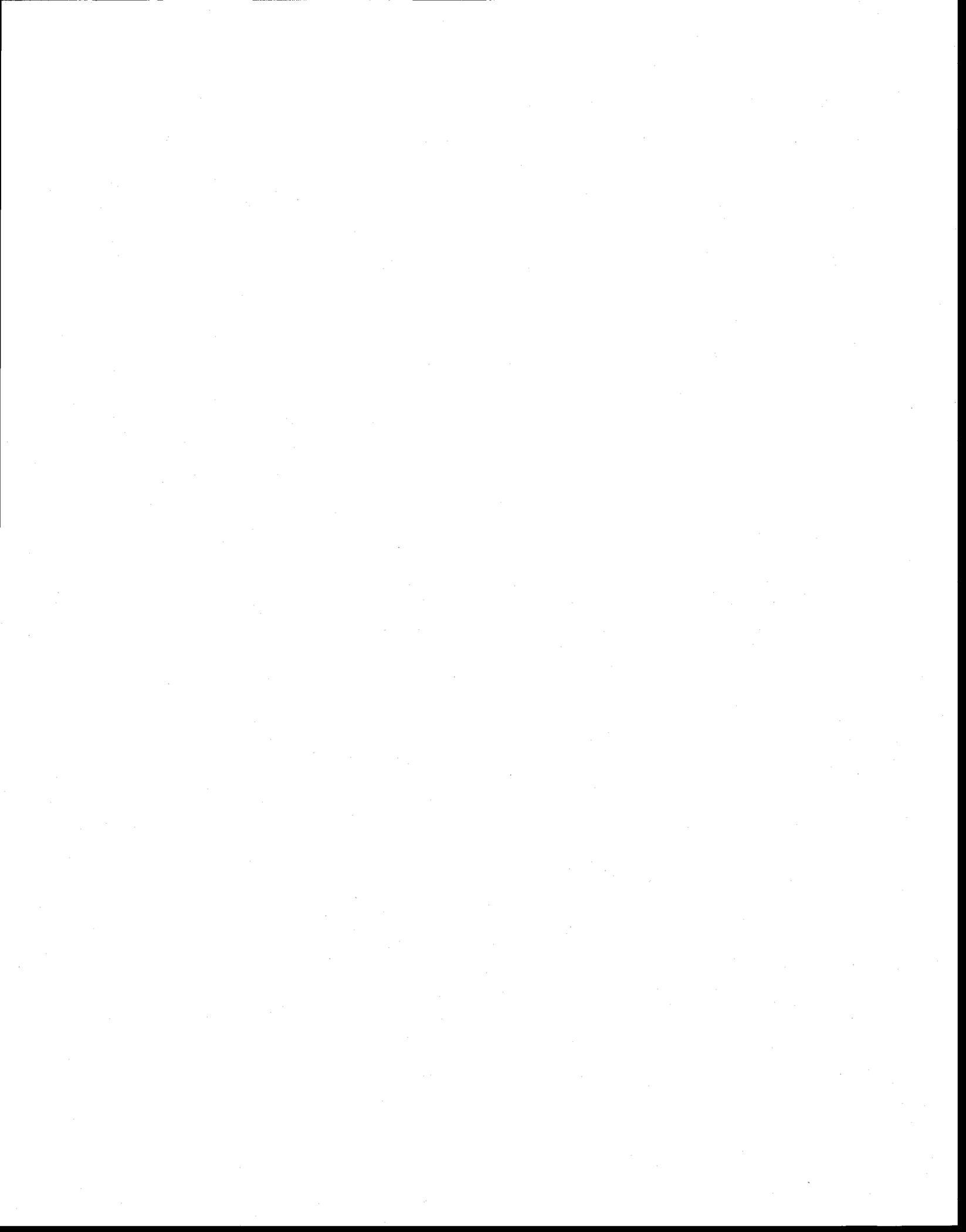
a : Les sources imposées dans le modèle ne correspondent pas exactement aux localisations des sources sur le terrain mais plutôt à des positions perpendiculaires au transport dans les différentes portions du panache à proximité des zones sources présumées sur le terrain.

b : les élévations des sources imposées sont situées sous l'élévation de la base de la couche silteuse prodeltaïque où elle est présente, donc soit dans la nappe semi-captive ou dans la nappe libre régionale. Ces élévations correspondent à l'unité deltaïque pour les sources de RDDC Nord et du Secteur 214. Ces élévations correspondent aux unités deltaïque et proglaciaire pour la source de la Lagune C.

Tableau 4.7 Bilan volumétrique et caractéristiques numériques des simulations de transport

| Simulations de transport de masse | |
|--|---|
| Nb d'itérations | 741 |
| Masse initiale dans le domaine (kg) | 5 427,7 |
| Masse finale dans le domaine (kg) | 54 797,7 |
| % d'erreur minimal | $1,5 \times 10^{-9} \%$ |
| % d'erreur maximal | 1,7 % |
| Pas de temps minimal (s) | 0,01 |
| Pas de temps maximal (s) | 2 592 000 (30 jours) |
| Somme des pas de temps (s) | $1,89 \times 10^9$ (environ 60 ans) |
| Critère d'augmentation des pas de temps | 5% de changement de la concentration à chacun des nœuds |

FIGURES



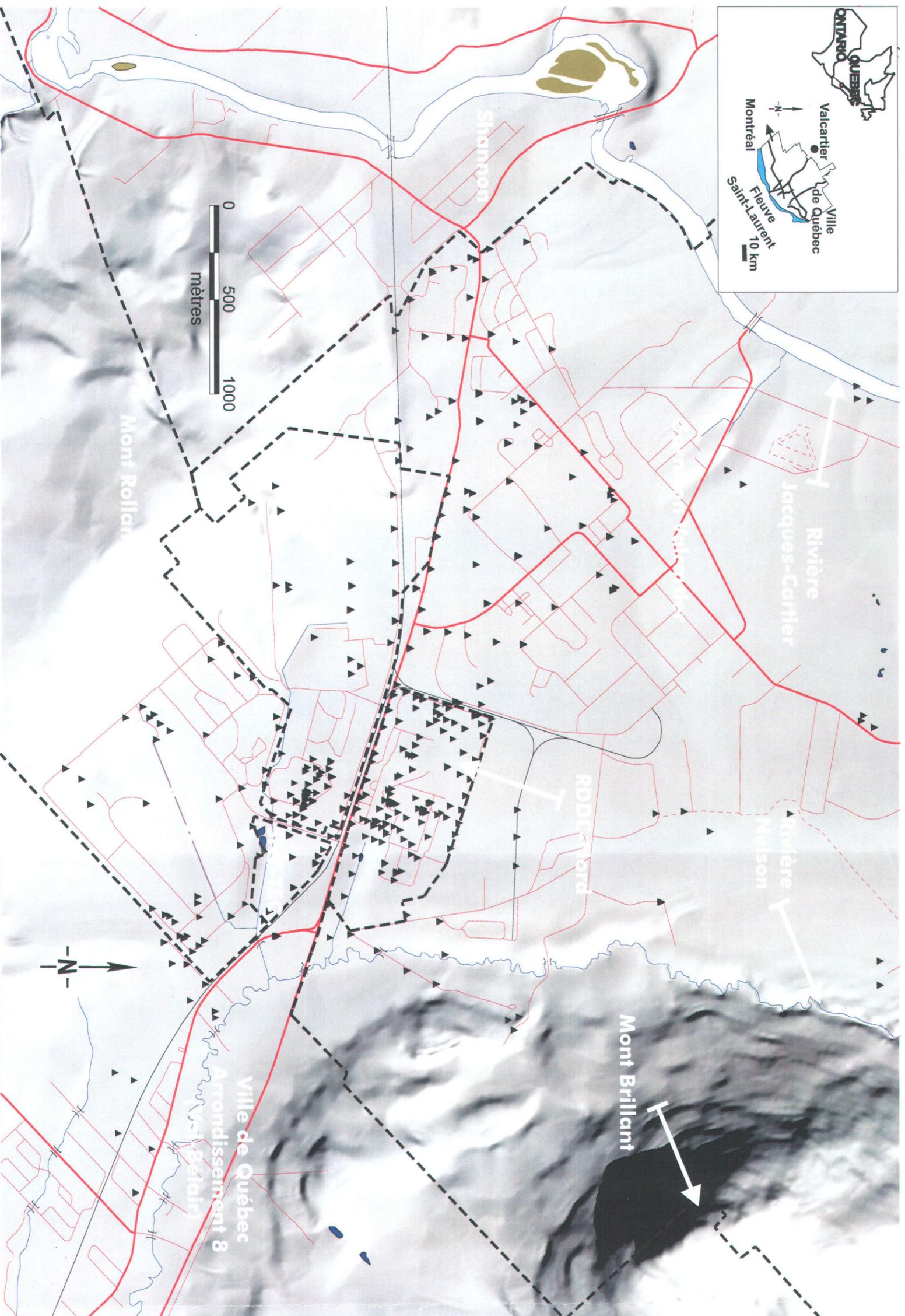


Figure 2.1 Localisation de la région à l'étude comprenant la physiographie et les puits d'observation

Caractérisation et modélisation numérique
 de la contamination en TCE dans
 l'eau souterraine du secteur Valcartier,
 Québec, Canada

Alexandre Boutin

INRS-Eau, Terre et Environnement
 Mémoire de maîtrise
 Janvier 2004

Planche 1
 Localisation et physiographie
 du secteur Valcartier

- ▲ Puits d'observation
- Routes
- - - Limites de propriété
- Ancienne voie ferrée

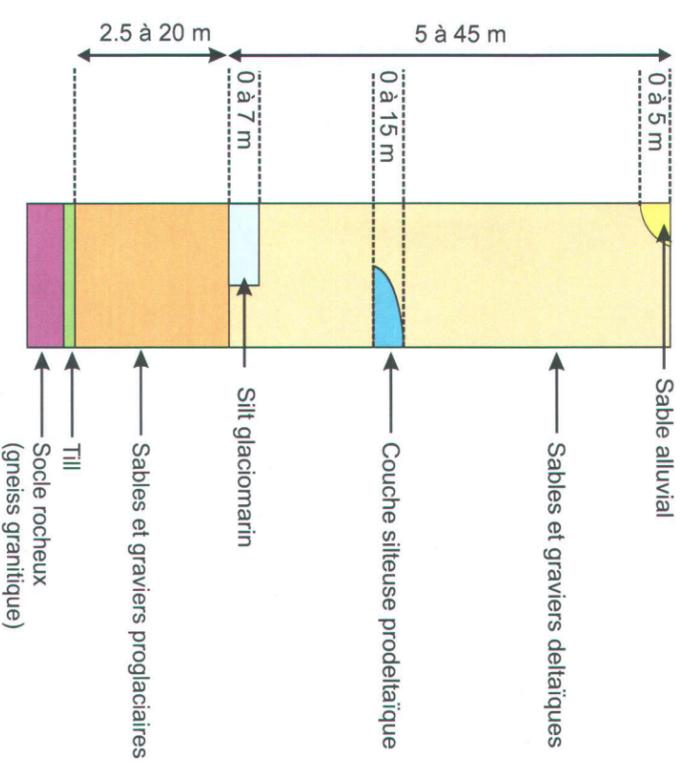


Figure 2.2 Colonne stratigraphique du secteur Valcartier

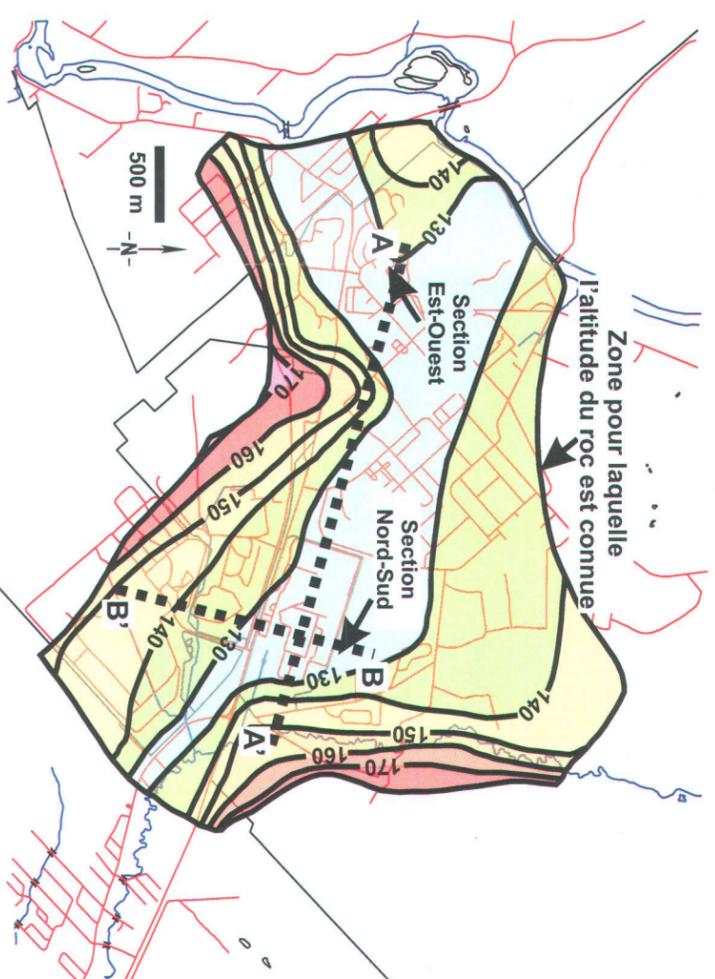


Figure 2.3 Topographie du socle rocheux et position des sections géologiques

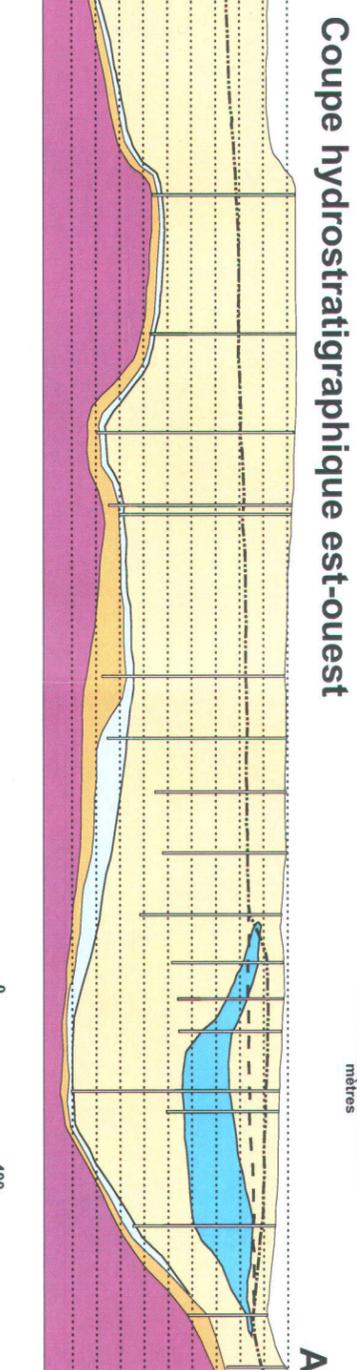
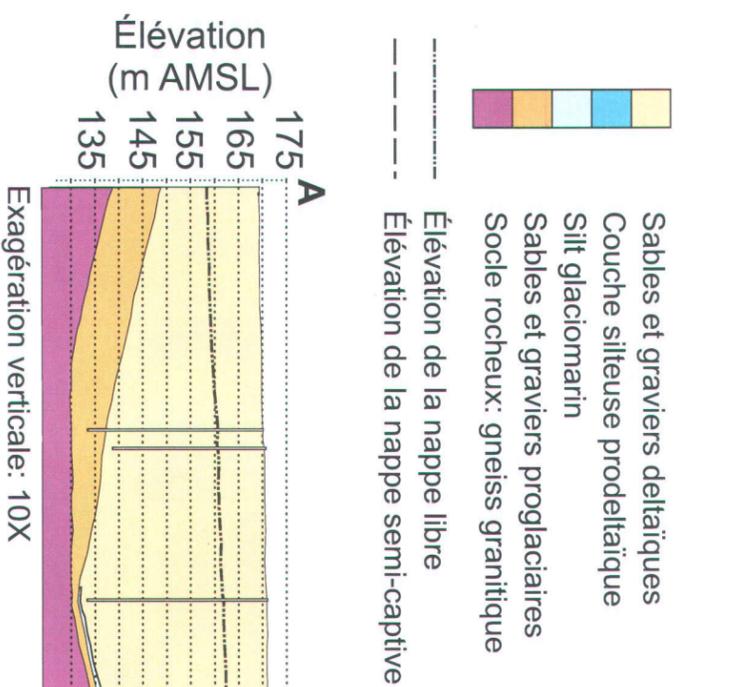


Figure 2.4 Coupes hydrostratigraphiques nord-sud et est-ouest

Caractérisation et modélisation numérique de la contamination en TCE dans l'eau souterraine du secteur Valcartier, Québec, Canada

Alexandre Boulin,

INRS-Eau, Terre et Environnement
Mémoire de maîtrise
Janvier 2004

Planche 2
Contexte géologique
du secteur Valcartier

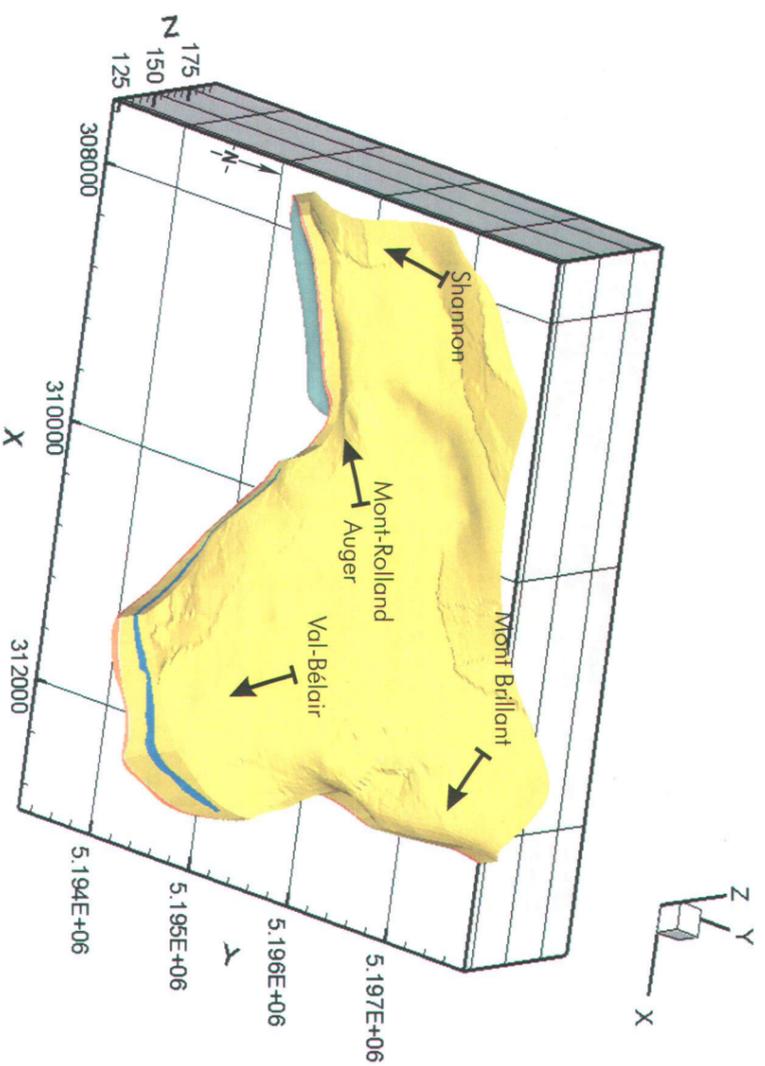


Figure 2.5 Modèle géologique en 3D vu à partir du sud vers le nord

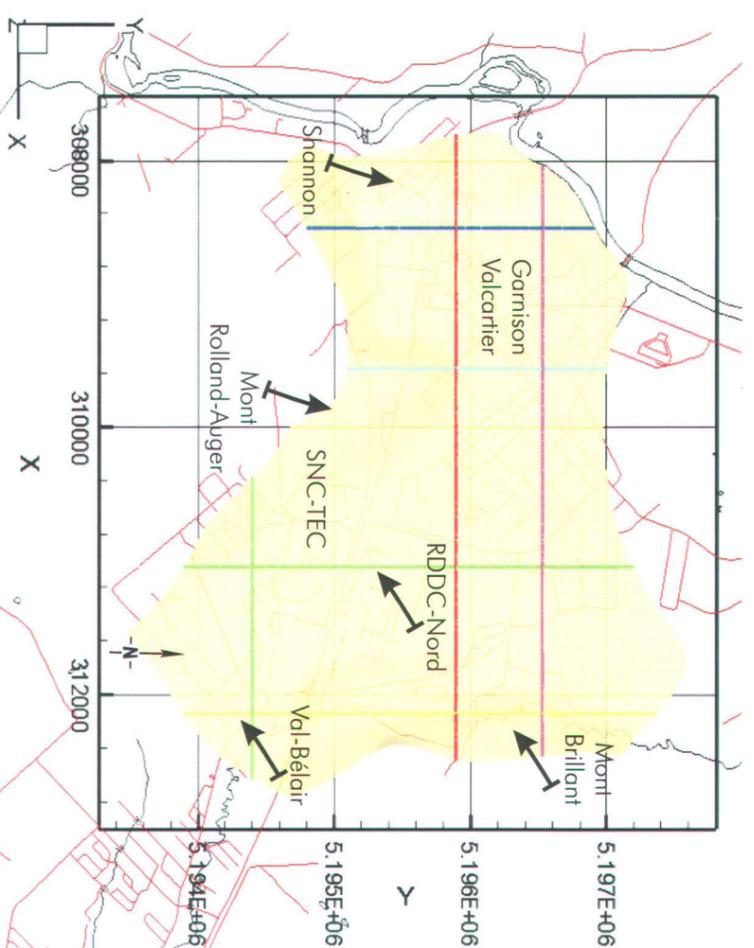


Figure 2.6 Localisation des coupes géologiques

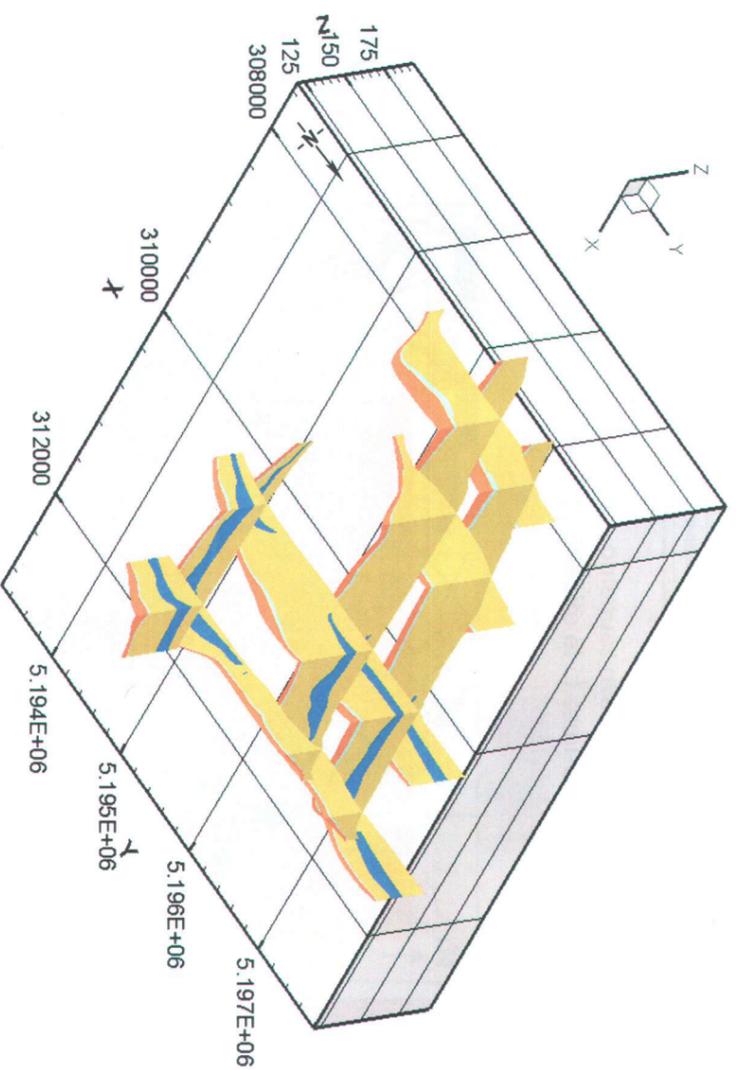


Figure 2.7 Coupes dans le modèle géologique 3D vues à partir du sud-est vers le nord-ouest

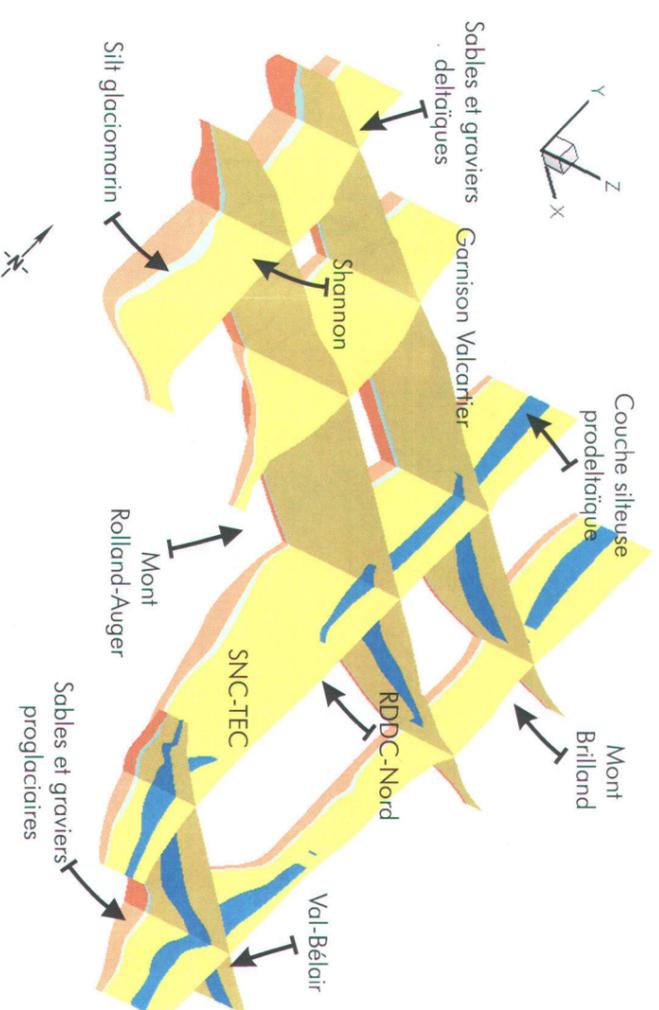
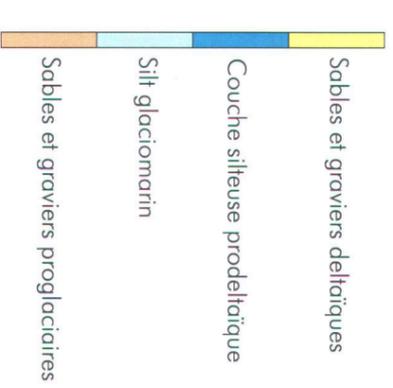


Figure 2.8 Zoom sur le modèle géologique 3D vu à partir du sud-ouest vers le nord-est

Planche 3

Modèle
géologique
en trois dimensions
du secteur Valcartier



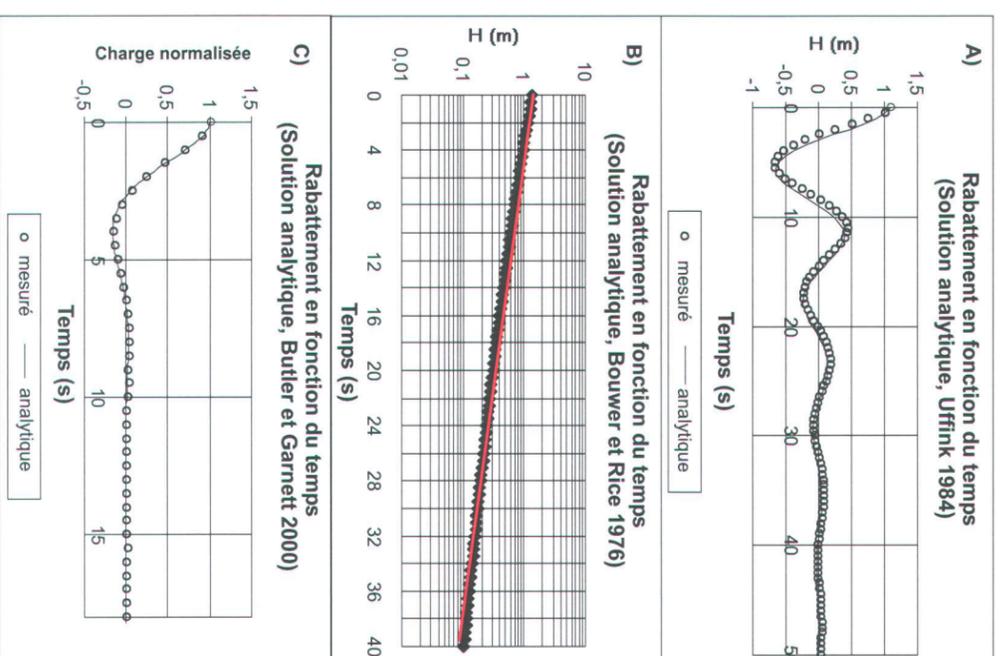


Figure 3.1 Types de réponses obtenues avec les essais de perméabilité a) oscillatoire, b) linéaire et c) semi-oscillatoire

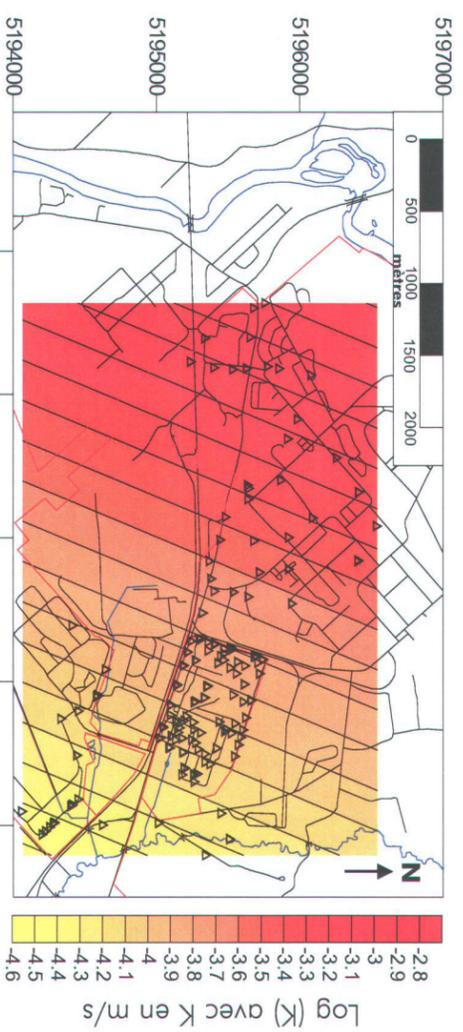


Figure 3.3 Tendence régionale de la conductivité hydraulique dans le sable deltaïque: tendance planaire

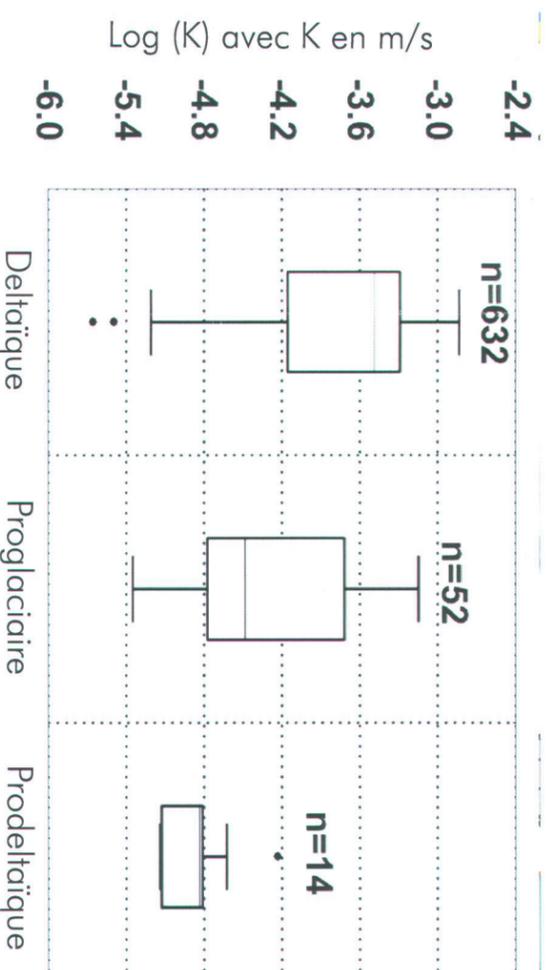


Figure 3.2 Distribution des résultats d'essais de perméabilité pour les unités deltaïque, proglaciaire et prodeltaïque (conductivité hydraulique K)



Figure 3.4 Tendence régionale de la conductivité hydraulique dans le sable deltaïque: distribution par krigage



Figure 3.5 Piézométrie de la nappe libre dans le secteur Valcartier

Caractérisation et modélisation numérique
 de la contamination en TCE dans
 l'eau souterraine du secteur Valcartier,
 Québec, Canada

Alexandre Boutin

INRS-Eau, Terre et Environnement
 Mémoire de maîtrise
 Janvier 2004

Planche 5

Piezométrie de la nappe libre dans le secteur Valcartier

- ▲ Puits d'observation installé dans la nappe libre
- ▲ Puits d'observation installé dans la nappe semi-captive
- Isopieze indiquant l'élévation de la nappe libre (m) au-dessus du niveau moyen de la mer (incertain en pointillé)
- ⋯ Ligne de partage des eaux dans la nappe libre
- Présence de la couche silteuse prodeltaïque
- Direction générale d'écoulement de l'eau souterraine
- ? Zone d'incertitude

Référence géographique:
 UTM NAD 83 Zone 19



Figure 3.6 Piézométrie de la nappe semi-captive dans le secteur Valcartier

Caractérisation et modélisation numérique
 de la contamination en TCE dans
 l'eau souterraine du secteur Valcartier,
 Québec, Canada

Alexandre Bouvin

INRS-Eau, Terre et Environnement
 Mémoire de maîtrise
 Janvier 2004

Planche 6

Piezométrie de la nappe semi-captive dans le secteur Valcartier

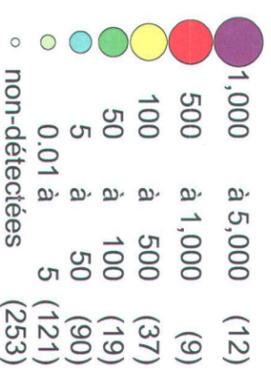
- ▲ Puits d'observation installé dans la nappe libre
- ▲ Puits d'observation installé dans la nappe semi-captive
- Isopièze indiquant l'élévation de la nappe libre (m) au-dessus du niveau moyen de la mer (incertain en pointillé)
- Isopièze indiquant l'élévation de la nappe semi-captive (m) au-dessus du niveau moyen de la mer (incertain en pointillé)
- Présence de la couche silteuse prodeltaïque
- Zone de partage des eaux incertaine dans la nappe semi-captive
- Direction générale d'écoulement de l'eau souterraine
- ? Zone d'incertitude

Référence géographique:
 UTM NAD 83 Zone 19

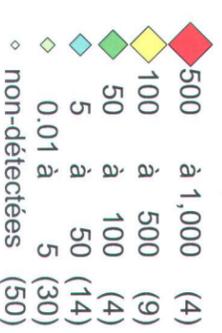
Légende des Planches 7 et 8

- ▲ Puits d'observation installé dans la nappe libre
- ▲ Puits d'observation installé dans la nappe semi-captive
- Isopièze indiquant l'élévation de la nappe libre (m) au-dessus du niveau moyen de la mer (incertain en pointillé)
- Isopièze indiquant l'élévation de la nappe semi-captive (m) au-dessus du niveau moyen de la mer (incertain en pointillé)
- Limite définie du panache d'eau souterraine contaminée par moins de 50 ug/L en TCE (incertain en pointillé)
- Limite définie du panache d'eau souterraine contaminée par plus de 50 ug/L en TCE (incertain en pointillé)
- Panache d'eau contaminée: concentration en TCE généralement entre la limite de détection et 50 ug/L
- Panache d'eau contaminée: concentration en TCE généralement supérieure à 50 ug/L
- Panache d'eau contaminée: concentration en TCE généralement supérieure à 500 ug/L
- Puits privé à Shannon pour lequel une concentration en TCE supérieure à 5 ug/L a déjà été observée
- Puits privé à Shannon pour lequel une concentration en TCE entre la limite de détection et 5 ug/L a déjà été observée

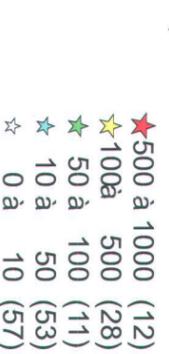
[TCE] dissous dans la nappe libre
(ug/L)



[TCE] dissous dans la nappe semi-captive
(ug/L)



[TCE] dissous avec le GEOPROBE au CRDV
(ug/L)



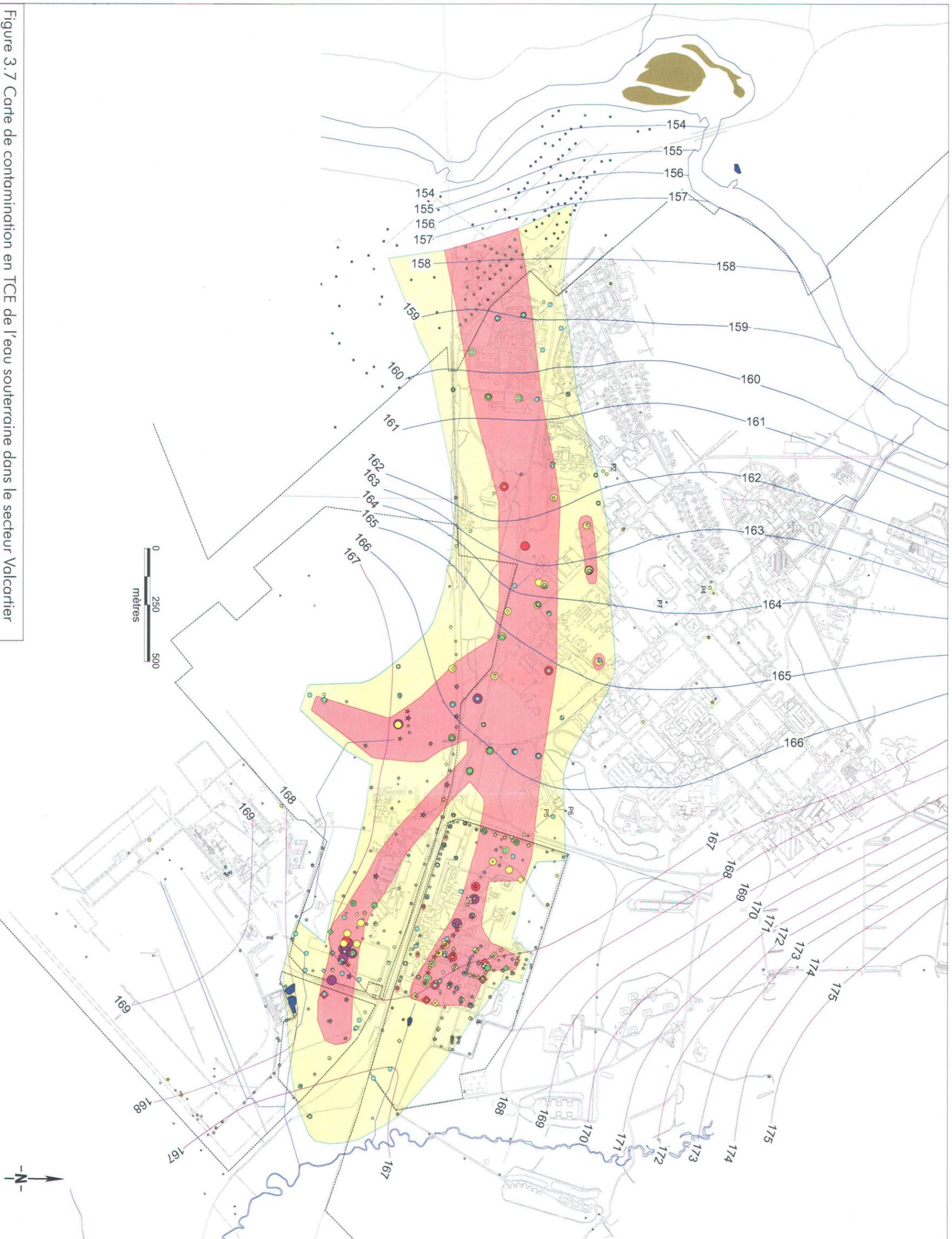
(valeurs maximales d'un profil)

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



Note: nombre de données entre parenthèses

Figure 3.7 Carte de contamination en TCE de l'eau souterraine dans le secteur Valcartier



Caractérisation et modélisation numérique
de la contamination en TCE dans
l'eau souterraine du secteur Valcartier,
Québec, Canada

Alexandre Boufin

INRS-Eau, Terre et Environnement
Mémoire de maîtrise
Janvier 2004

Planche 7

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

Légende
de la carte
sur la feuille
précédente

Référence géographique:
UTM NAD 83 Zone 19

Caractérisation et modélisation numérique
 de la contamination en TCE dans
 l'eau souterraine du secteur Valcartier,
 Québec, Canada

Alexandre Bouvin

INRS-Eau, Terre et Environnement
 Mémoire de maîtrise
 Janvier 2004

Planche 8

Agrandissement de la carte de contamination en TCE de l'eau souterraine dans le secteur Valcartier

Voir légende de la
 carte avant la planche 7

Référence géographique:
 UTM NAD 83 Zone 19

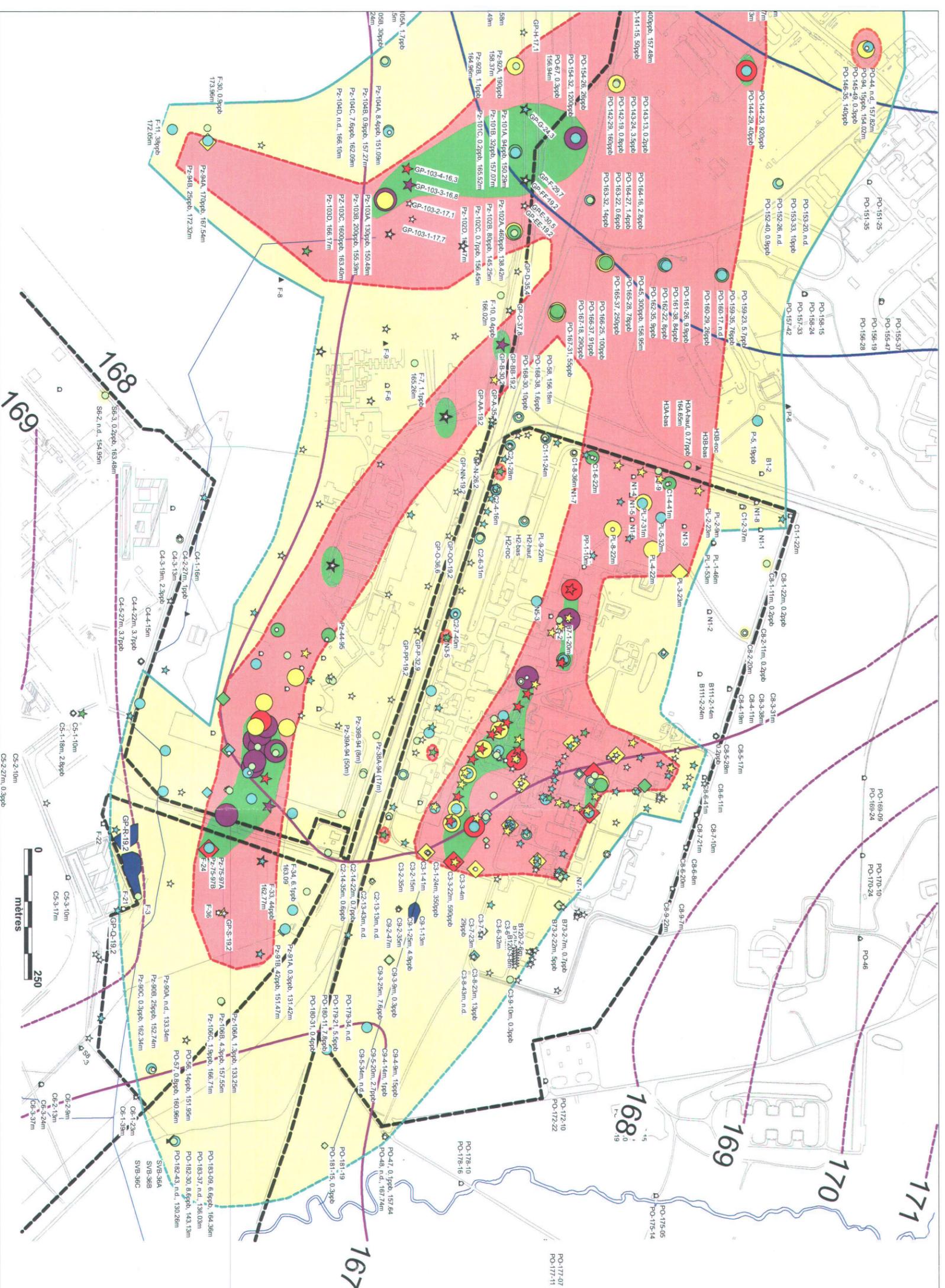


Figure 3.8 Agrandissement de la carte de contamination en TCE de l'eau souterraine dans le secteur Valcartier

Caractérisation et modélisation numérique
 de la contamination en TCE dans
 l'eau souterraine du secteur Valcarrier,
 Québec, Canada

René Lefebvre, Alexandre Boutin,
 Richard Martel, René Therrien,
 Michel Parent et Véronique Blais

INRS-Eau, Terre et Environnement
 Rapport de recherche R-631
 Janvier 2004

Planche 9

Carte des zones sources
 présumées de la contamination
 en TCE de l'eau souterraine
 dans le secteur Valcarrier

- Zone source présumée de la contamination en TCE
- Panache d'eau contaminée (concentration en TCE généralement supérieure à 500 µg/L)
- Panache d'eau contaminée (concentration en TCE généralement entre 50 µg/L et 500 µg/L)
- Panache d'eau contaminée (concentration en TCE généralement entre la limite de détection et 50 µg/L)
- Isopièze indiquant l'élévation de la nappe libre (m) ou-dessus du niveau moyen de la mer (incertain en pointillé)
- Isopièze indiquant l'élévation de la nappe semi-captive (m) ou-dessus du niveau moyen de la mer (incertain en pointillé)
- Limite du panache d'eau souterraine contaminée par moins de 50 µg/L de TCE (incertaine en pointillé)
- Limite du panache d'eau souterraine contaminée par plus de 50 µg/L de TCE (incertaine en pointillé)
- Position des coupes pour les calculs des flux de masse

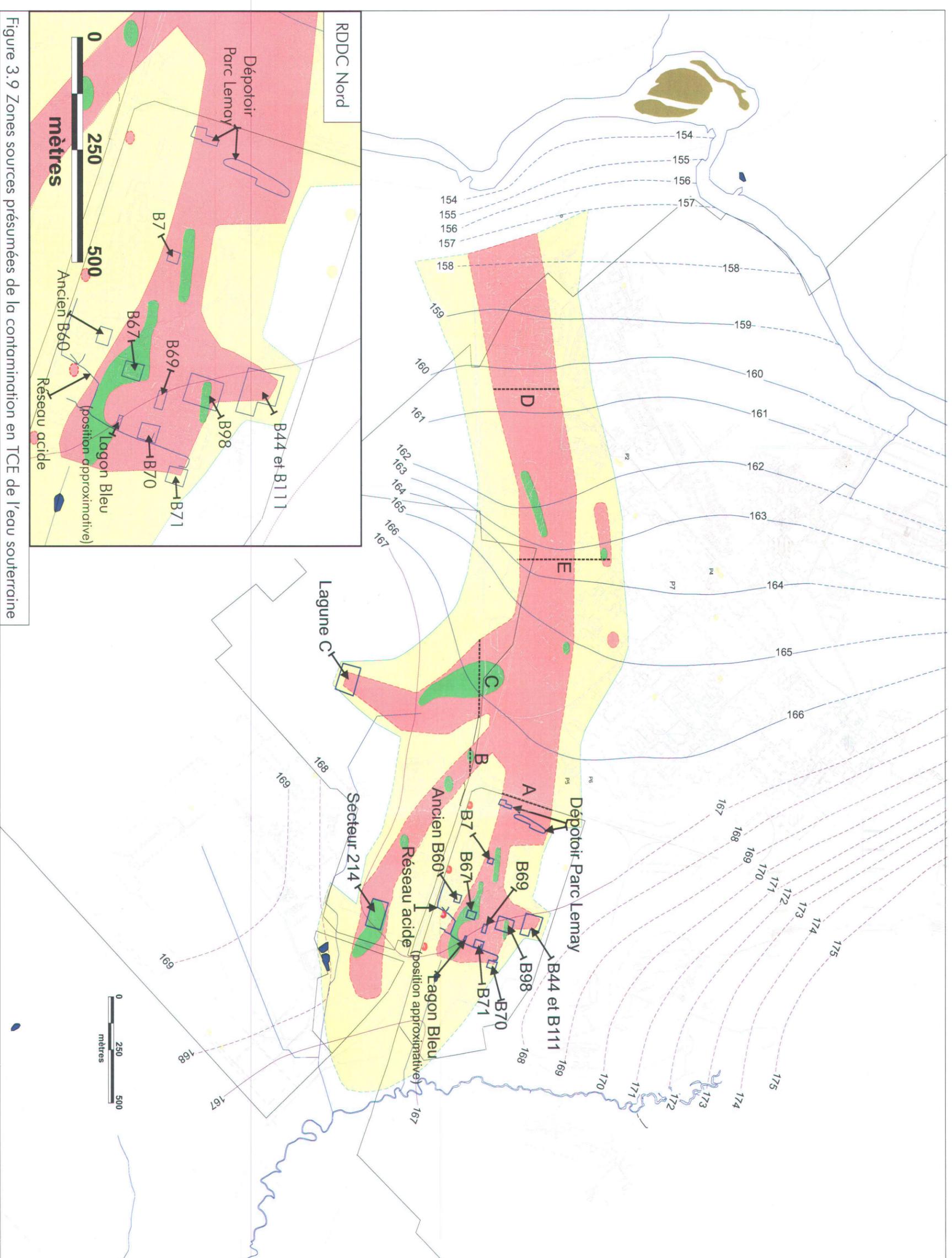


Figure 3.9 Zones sources présumées de la contamination en TCE de l'eau souterraine

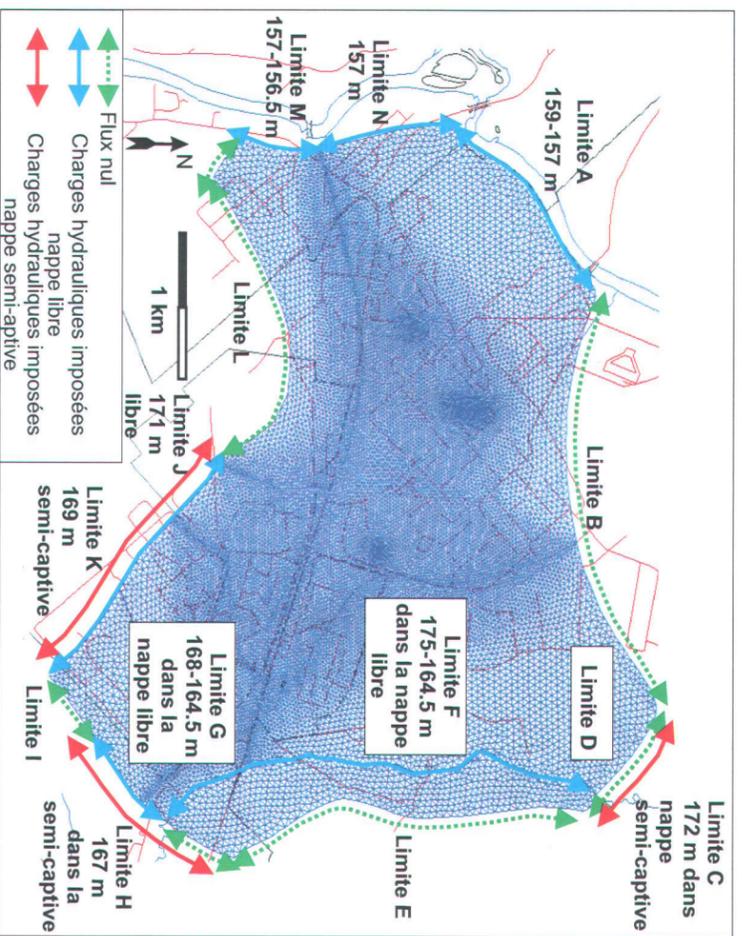


Figure 4.1 Maillage et conditions aux limites du modèle d'écoulement

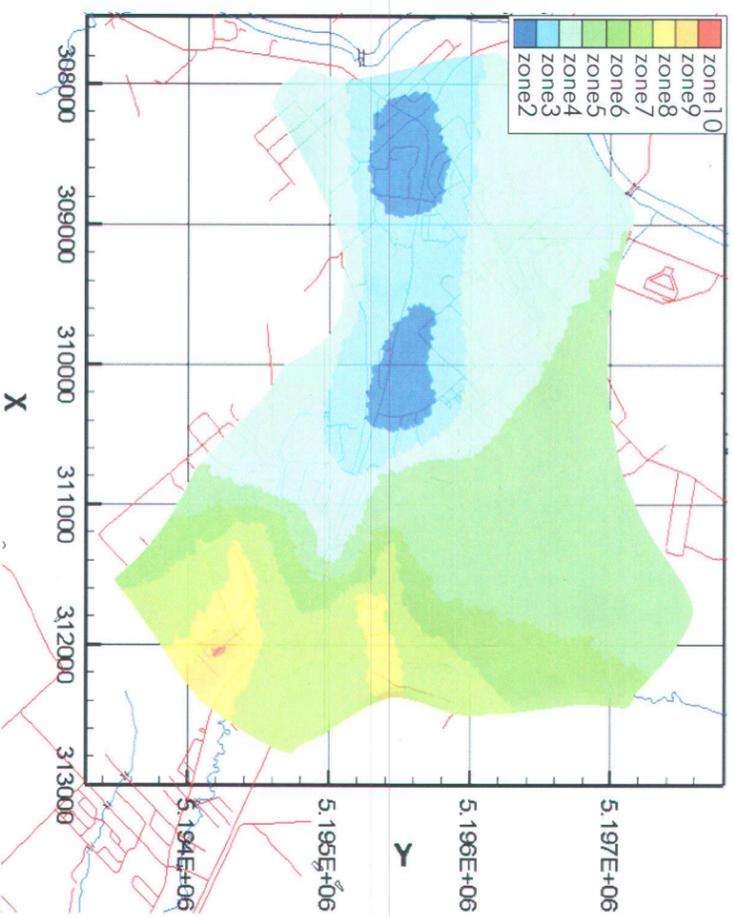


Figure 4.3 Zones de conductivités hydrauliques vues en plan pour l'unité deltaïque au-dessus de la couche silteuse prodeltaïque

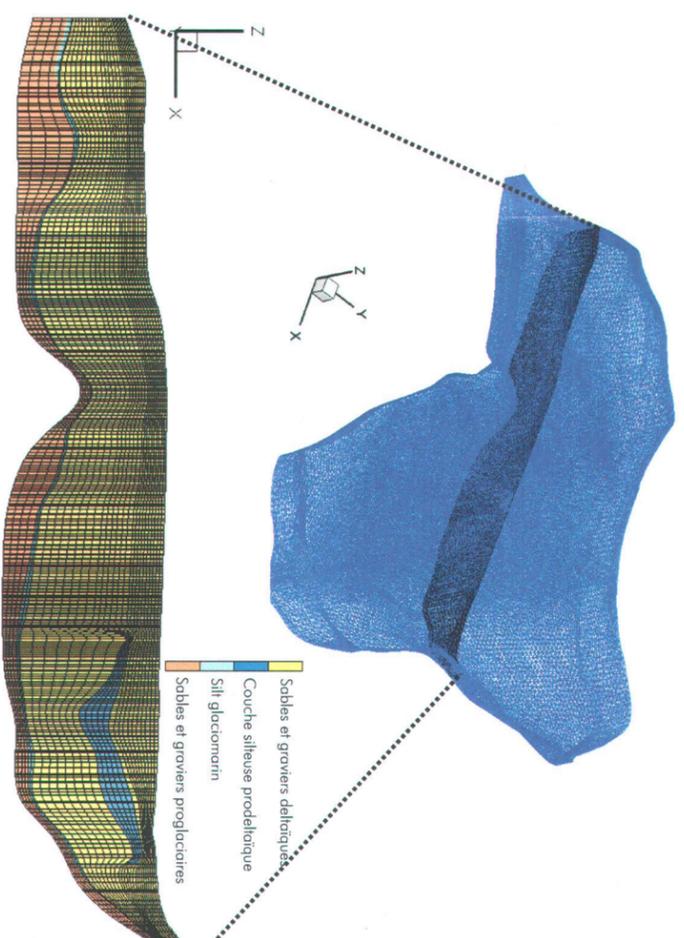


Figure 4.2 Maillage vu en trois dimensions et coupe géologique est-ouest montrant la discrétisation verticale du modèle d'écoulement

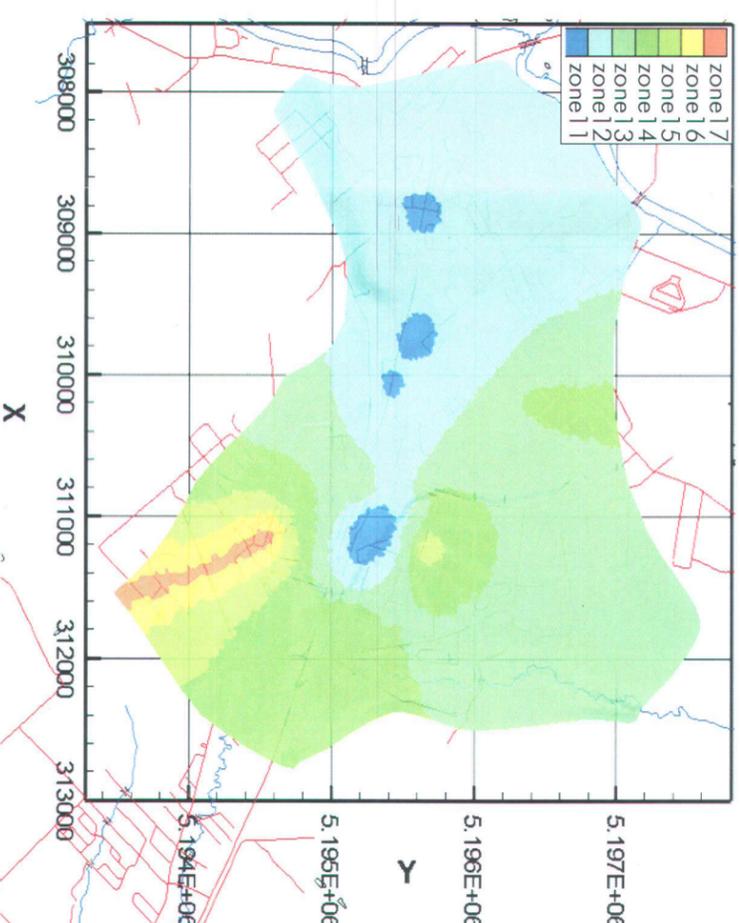


Figure 4.4 Zones de conductivités hydrauliques vues en plan pour l'unité deltaïque sous la couche silteuse prodeltaïque

Caractérisation et modélisation numérique de la contamination en TCE dans l'eau souterraine du secteur Valcarrier, Québec, Canada

Alexandre Bouvin

INRS-Eau, Terre et Environnement
Mémoire de maîtrise
Janvier 2004

Planche 10
Caractéristiques du modèle d'écoulement de l'eau souterraine dans le secteur de Valcarrier

Référence géographique:
UTM NAD 83 Zone 19
Exagération verticale: 15x

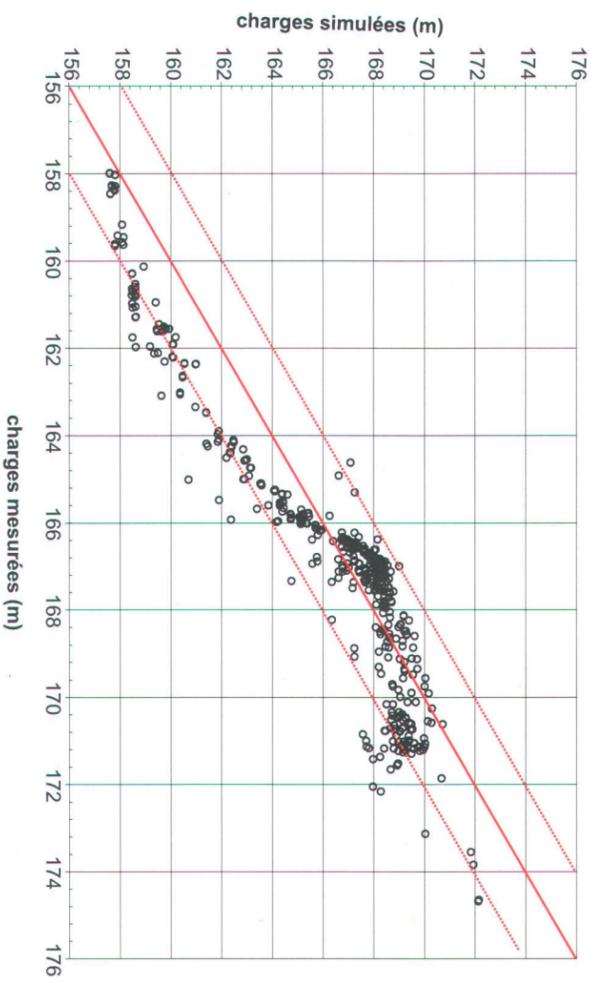


Figure 4.5 Comparaison des charges simulées et mesurées pour le modèle d'écoulement calé

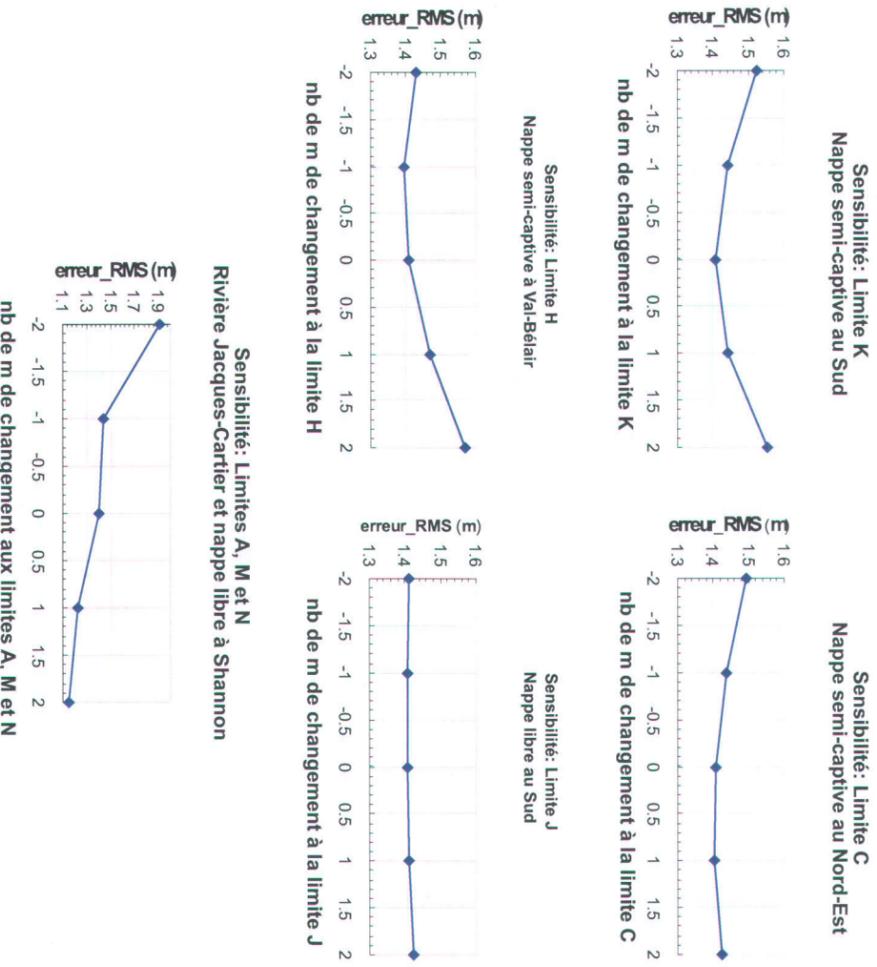


Figure 4.7 Effets de la modification des conditions aux limites sur le modèle d'écoulement calé

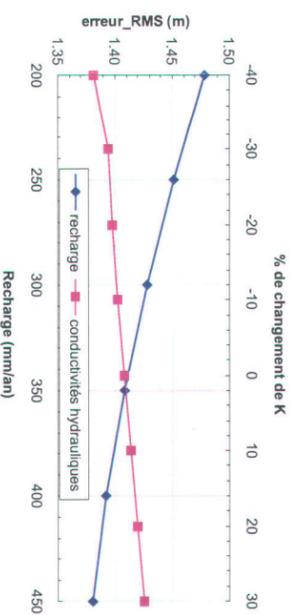
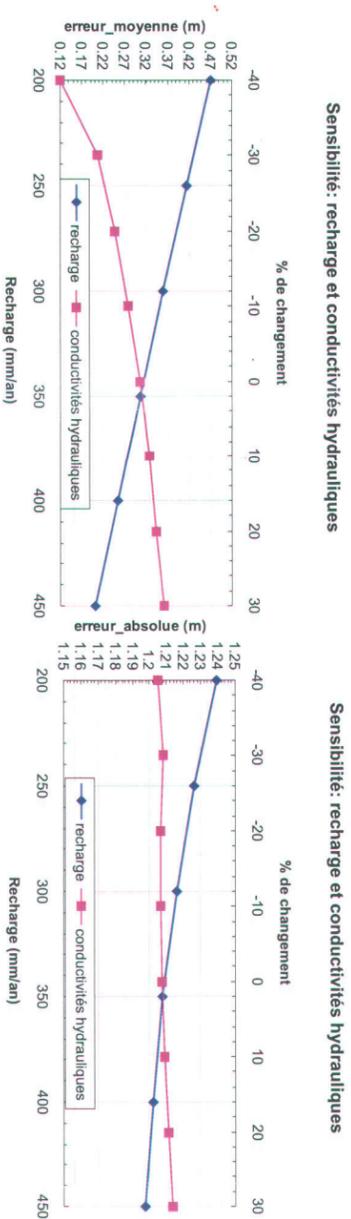


Figure 4.6 Effets de la modification de la recharge et de la conductivité hydraulique sur le modèle d'écoulement calé

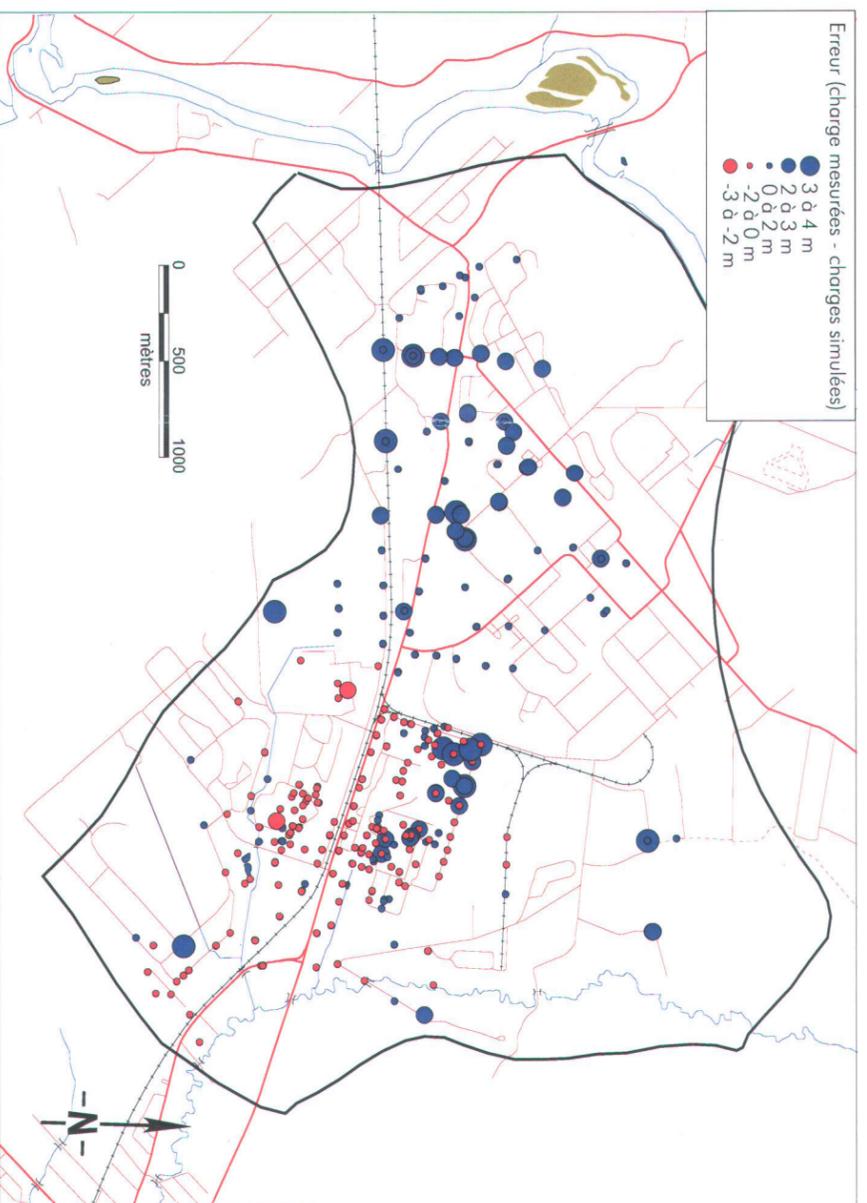


Figure 4.8 Carte de l'erreur de la simulation avec le modèle calé

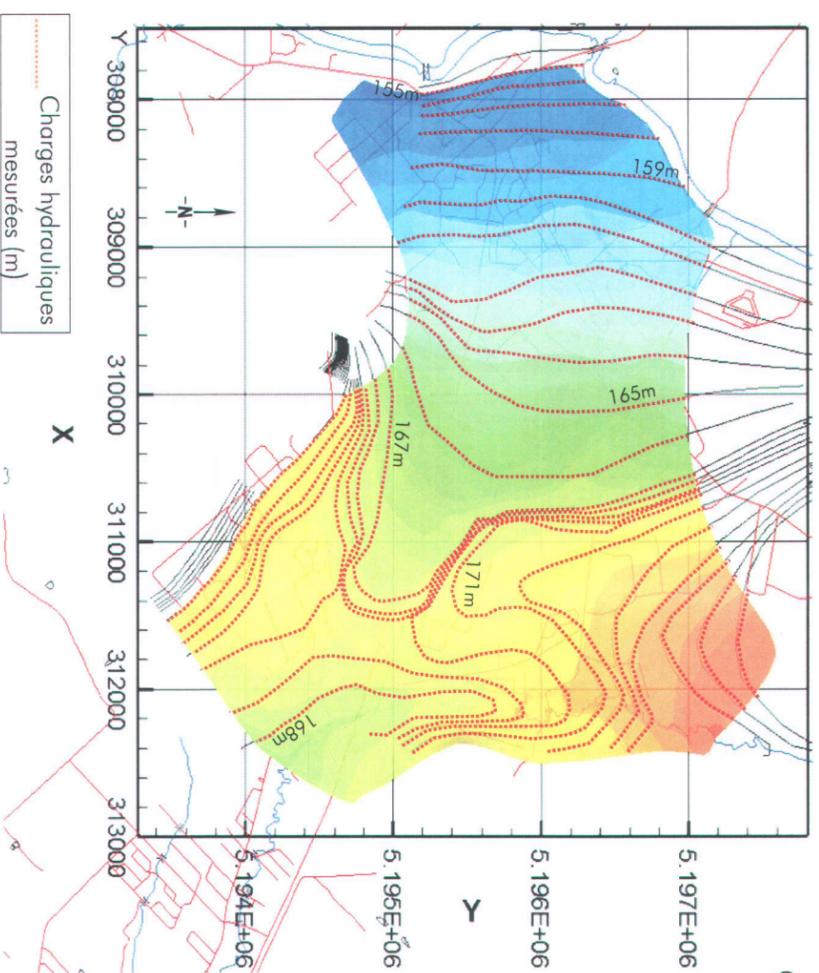
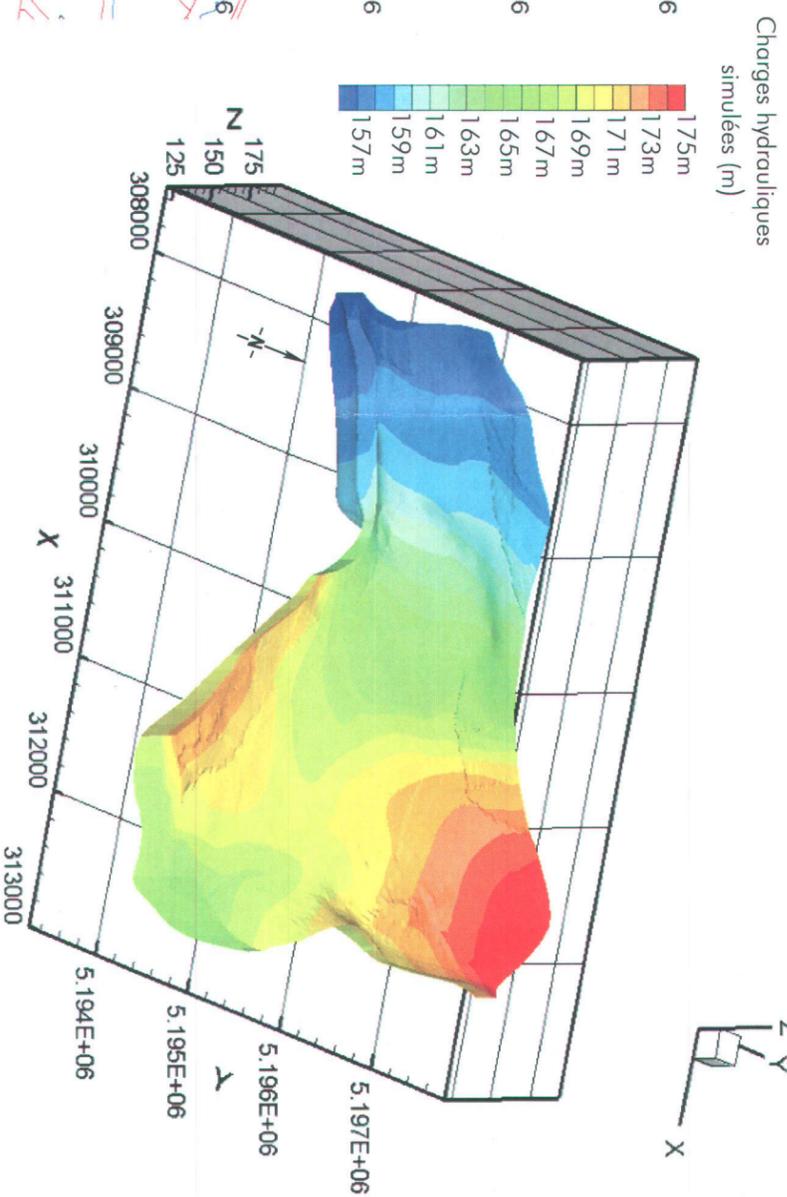


Figure 5.1 Comparaison entre la piézométrie simulée et mesurée pour la nappe libre



Viesseses (m/an)

Figure 5.2 Vue en 3D de la piézométrie simulée

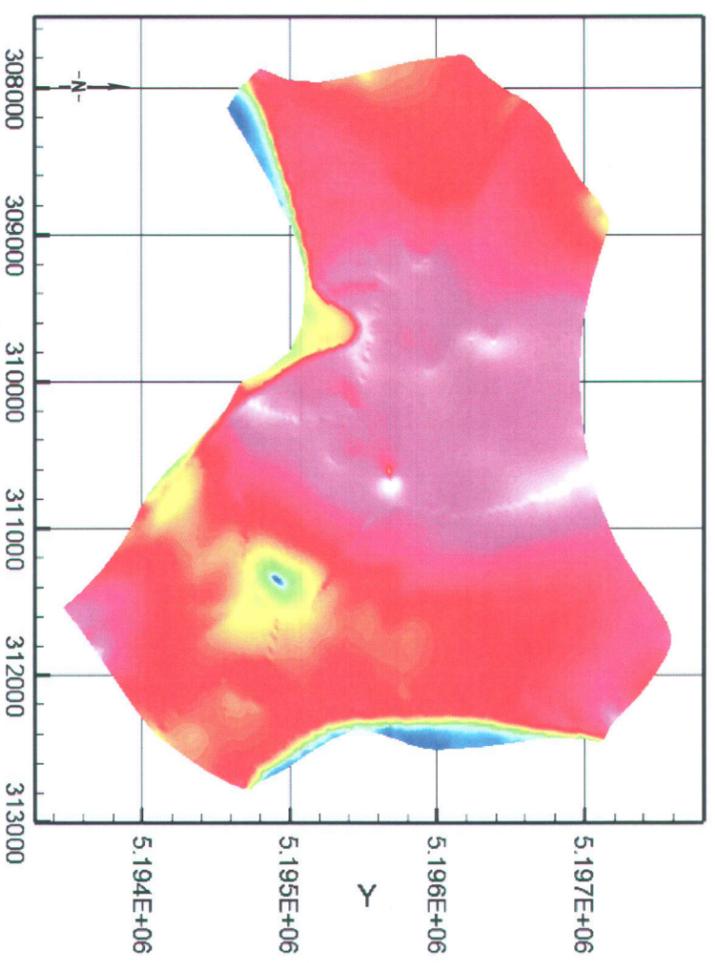


Figure 5.3 Vitesses d'écoulement de l'eau souterraine dans l'unité proglaciaire

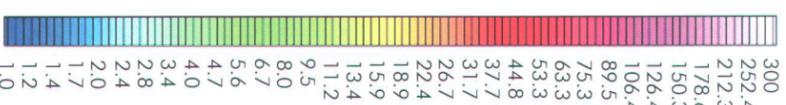


Figure 5.4 Vitesses d'écoulement de l'eau souterraine dans l'unité deltaïque sous la couche silteuse prodeltaïque

Caractérisation et modélisation numérique de la contamination en TCE dans l'eau souterraine du secteur Valcartier, Québec, Canada

Alexandre Boutin

INRS-Eau, Terre et Environnement
Mémoire de maîtrise
Janvier 2004

Planche 12

Piézométrie simulée et mesurée et vitesses d'écoulement de l'eau souterraine du secteur Valcartier

Localisation du maillage montrée à la figure 7.1

Référence géographique:
UTM NAD 83 Zone 19
Exagération verticale: 15x

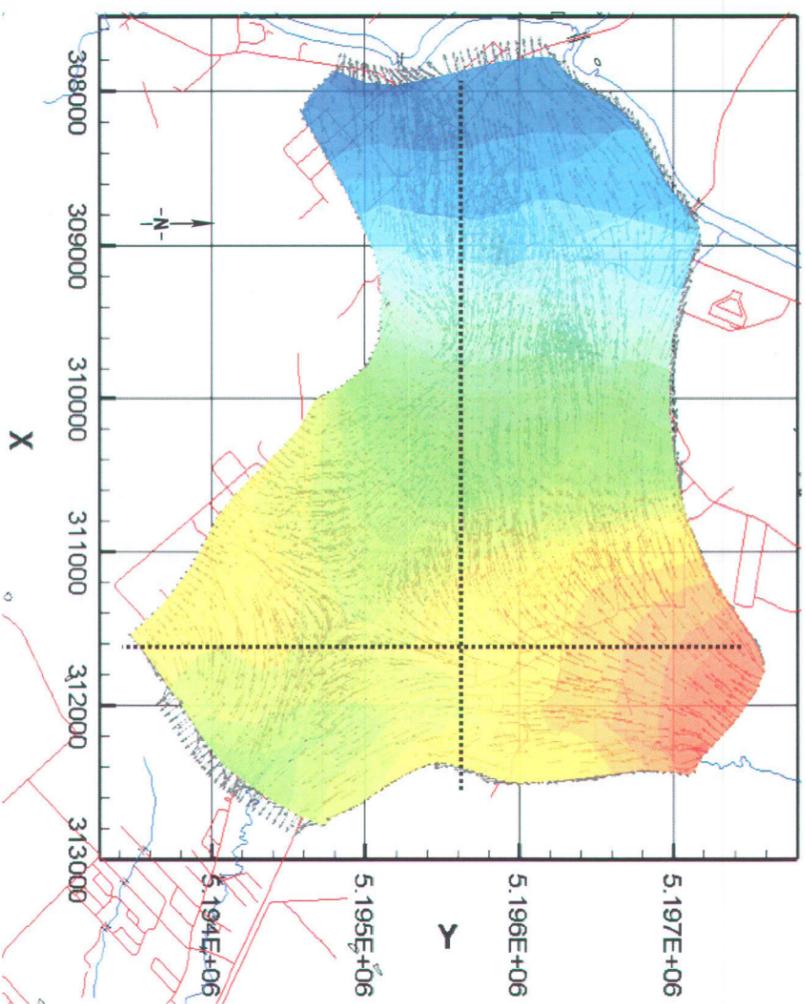


Figure 5.5 Position des coupes sur la piézométrie simulée de la surface libre avec les vecteurs d'écoulement de longueur uniforme

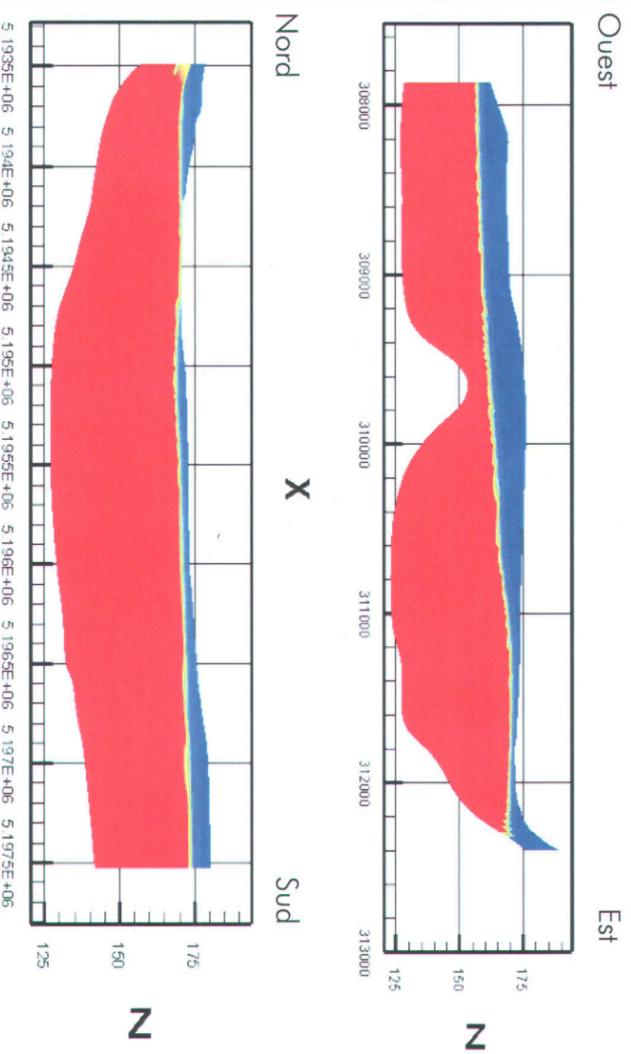


Figure 5.7 Coupes montrant la saturation en eau simulée

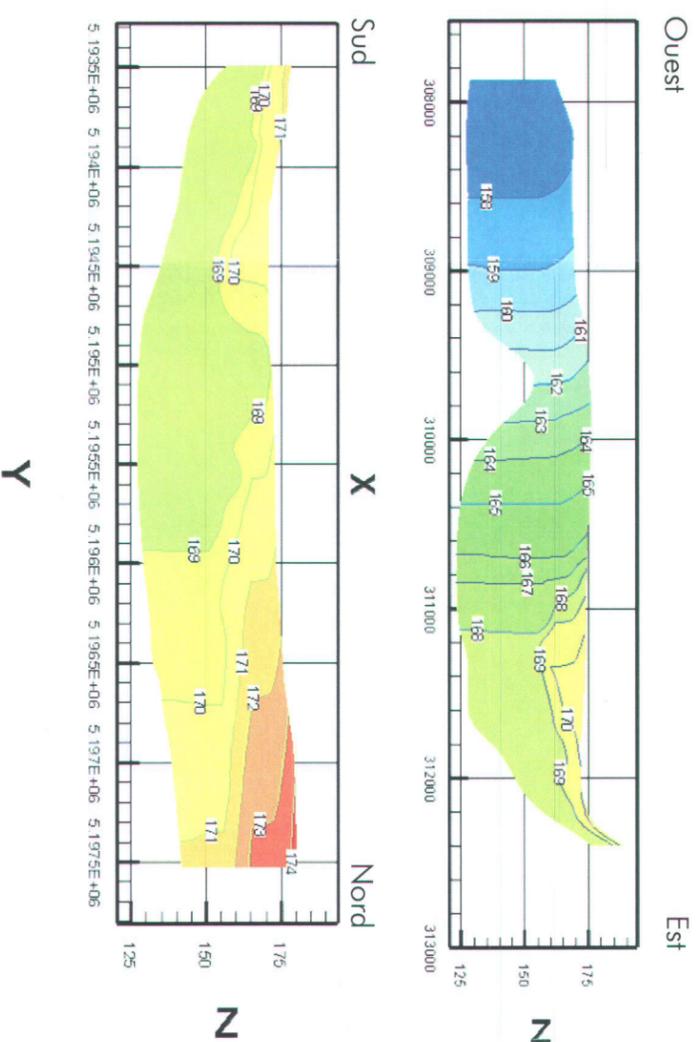


Figure 5.6 Coupes montrant les charges hydrauliques simulées

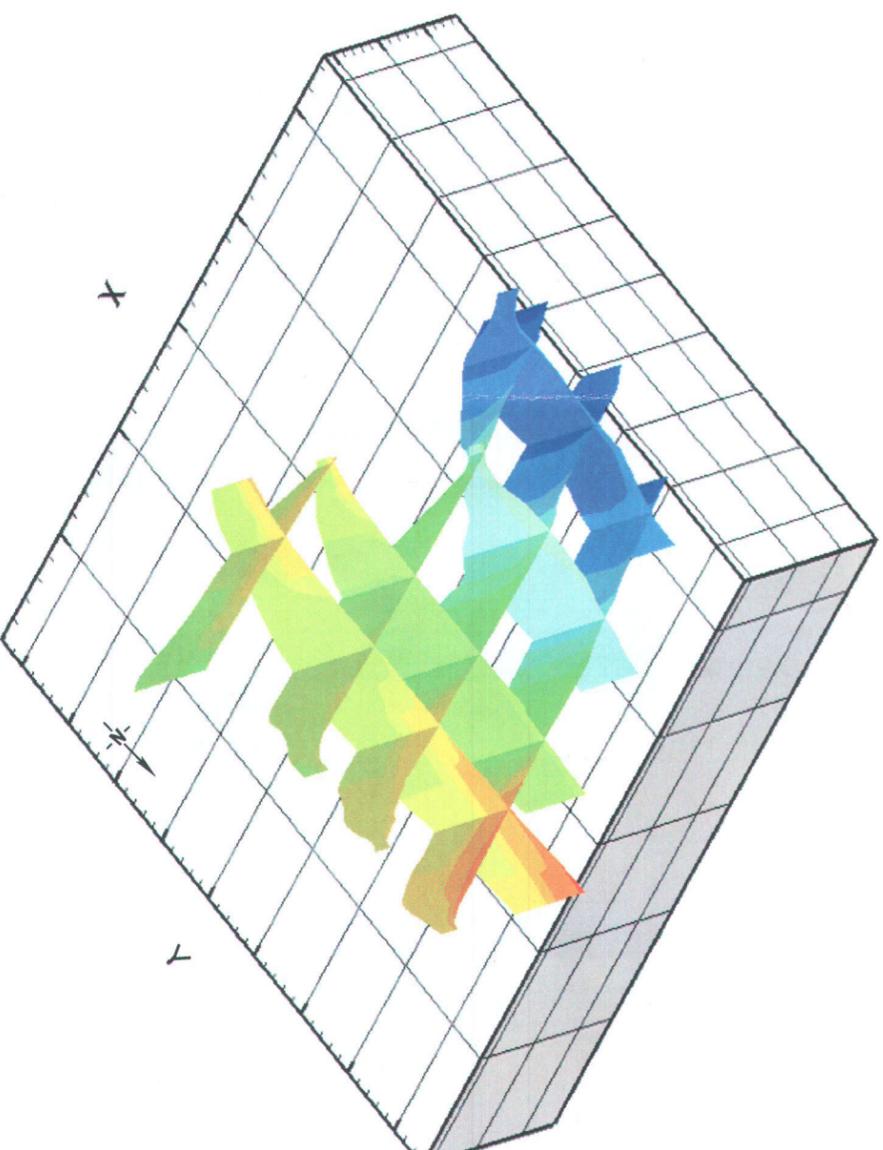


Figure 5.8 Vue 3D des charges hydrauliques simulées

Caractérisation et modélisation numérique de la contamination en TCE dans l'eau souterraine du secteur Valcartier, Québec, Canada

Alexandre Bouffin

INRS-Eau, Terre et Environnement

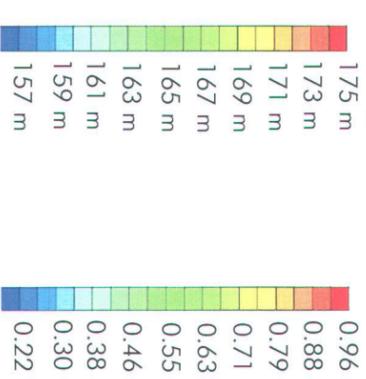
Mémoire de maîtrise
 Janvier 2004

Planche 13

Détail des conditions d'écoulement simulées avec le modèle d'écoulement

Charges hydrauliques simulées (m) (fig. 7.13, 71.14 et 7.16)

Saturations en eau simulées (fraction) (fig. 7.15)

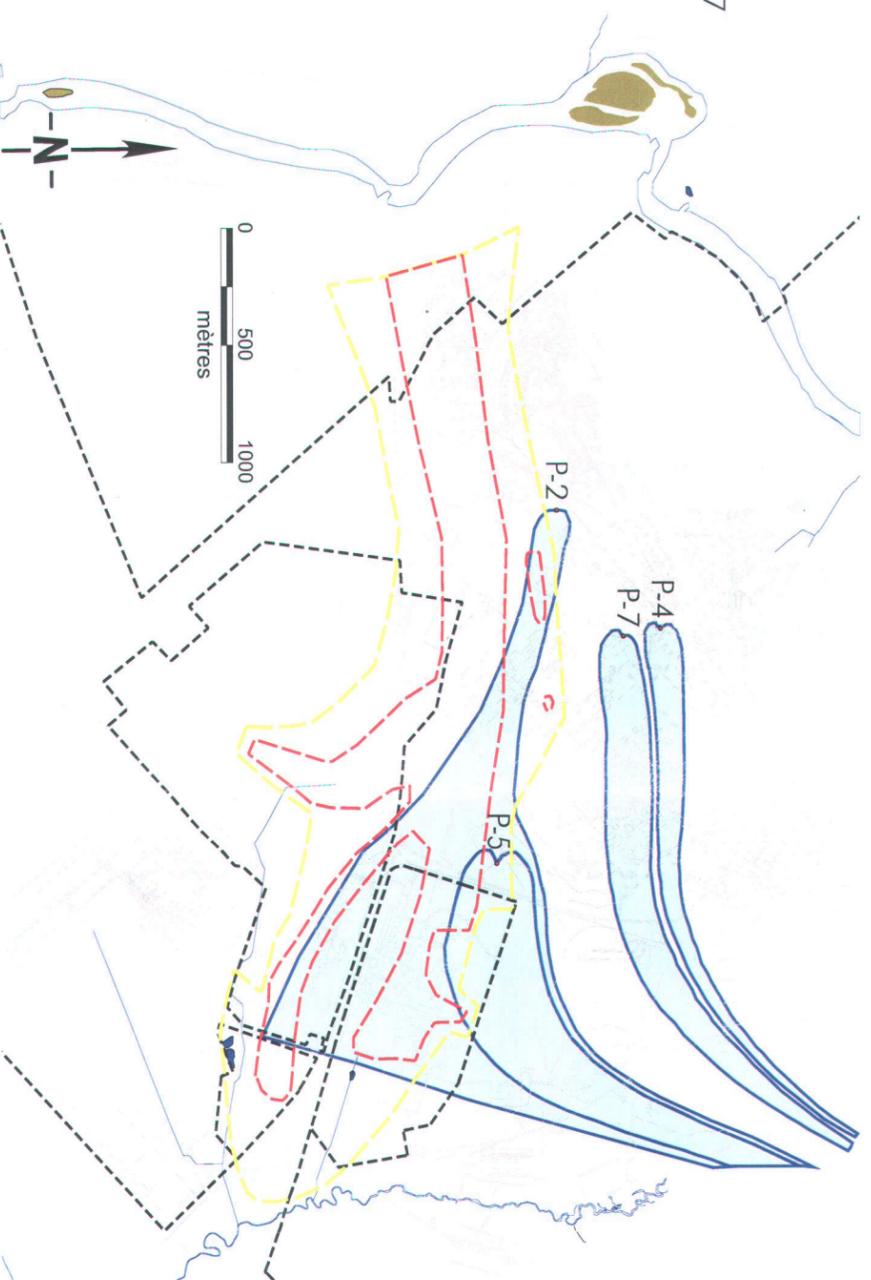


Référence géographique:
 UTM NAD 83 Zone 19
 Exagération verticale: 15x

Figure 5.9 Aires d'alimentation des puits sans l'effet du pompage de P-7



Figure 5.10 Aires d'alimentation des puits avec l'effet du pompage de P-7



Caractérisation et modélisation numérique de la contamination en TCE dans l'eau souterraine du secteur Valcartier, Québec, Canada

Alexandre Boutin

INRS-Eau, Terre et Environnement
 Mémoire de maîtrise
 Janvier 2004

Planche 14

Aires d'alimentation des puits d'approvisionnement de la Garrison Valcartier déterminées par traçage de particules

-  Aire d'alimentation
-  Limite approx. panache > 50 µg/L en TCE
-  Limite approx. panache < 50 µg/L en TCE
-  Limite de propriété



Figure 5.11 Patrons de migration du TCE à partir des zones sources par traçage de particules

Caractérisation et modélisation numérique
 de la contamination en TCE dans
 l'eau souterraine du secteur Valcartier,
 Québec, Canada

Alexandre Boulin

INRS-Eau, Terre et Environnement
 Mémoire de maîtrise
 Janvier 2004

Planche 15
 Patrons de migration
 simulés du TCE dans
 l'unité deltaïque à partir
 des zones sources

-  Isochrones
-  Ligne d'écoulement
-  Direction générale d'écoulement de l'eau souterraine

Note: Les temps sont indiqués à partir des milieux récepteurs vers les zones sources

Alexandre Boutin

INRS-Eau, Terre et Environnement
 Mémoire de maîtrise
 Janvier 2004

Planche 16
 Patrons de migration
 simulés du TCE
 par modélisation
 du transport de masse

- Isosurface de la [TCE]
simulée de 1000 ug/L
- Isosurface de la [TCE]
simulée de 50 ug/L
- Positions des sources imposées
dans le modèle de transport

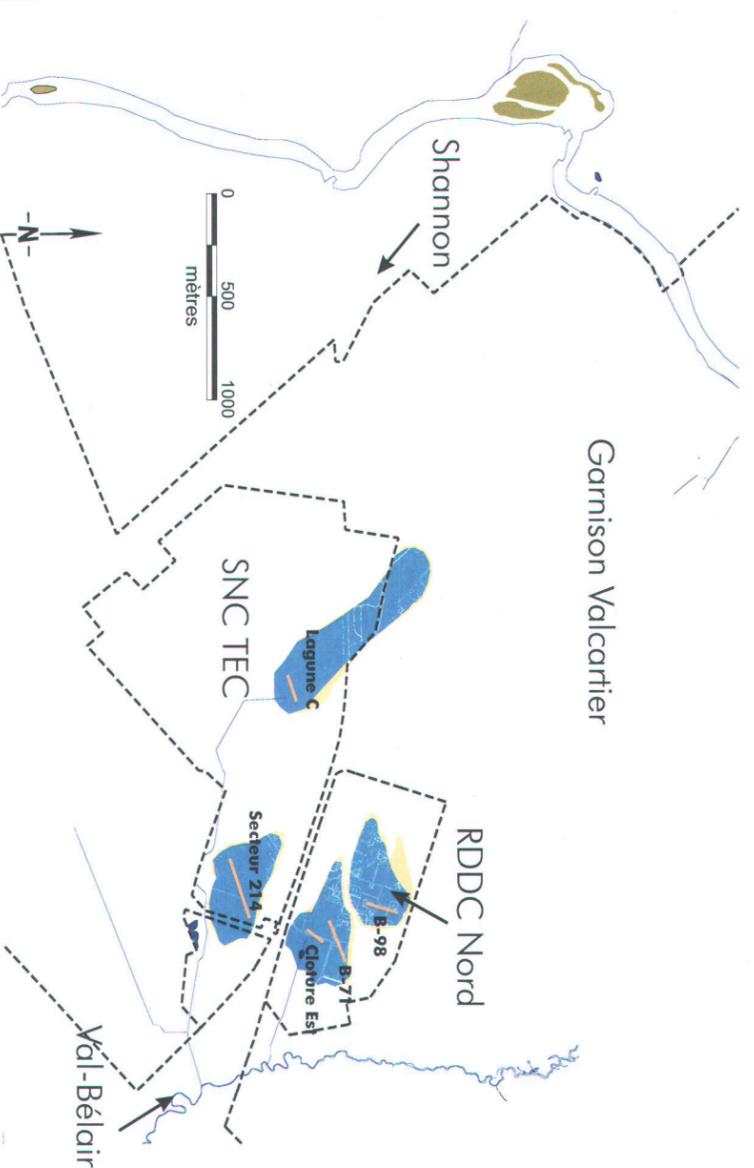


Figure 5.12 Panaches simulés de TCE par modélisation du transport après 10 ans

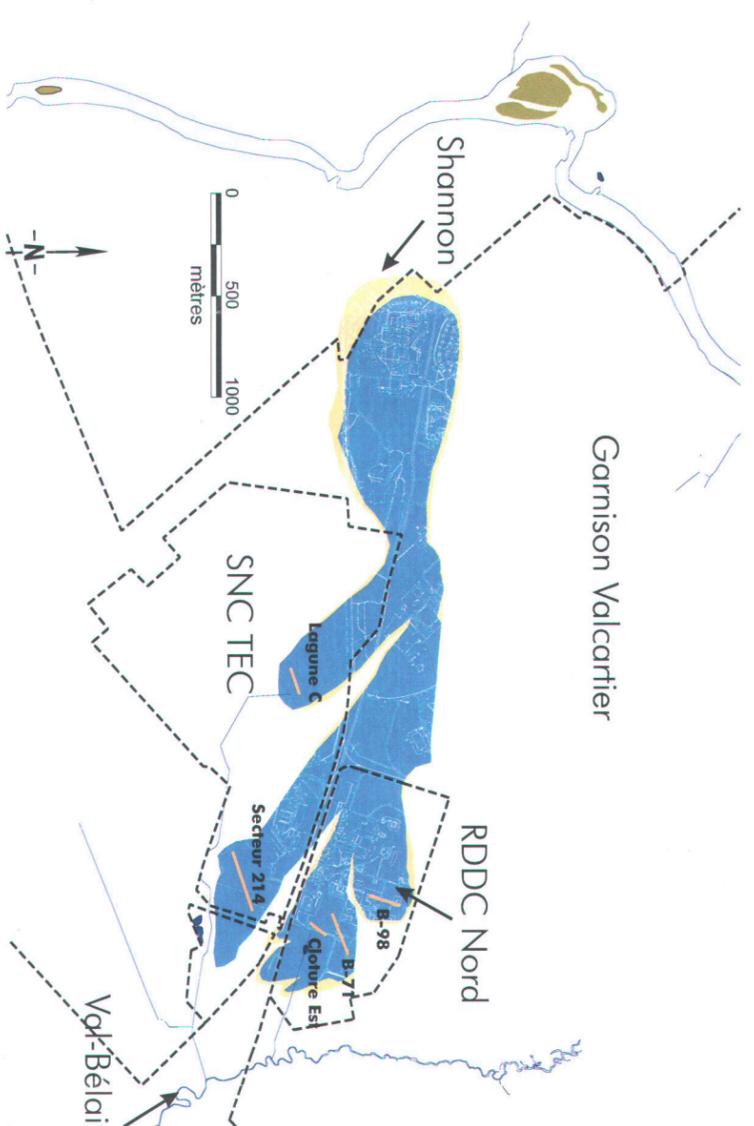


Figure 5.13 Panaches simulés de TCE par modélisation du transport après 25 ans

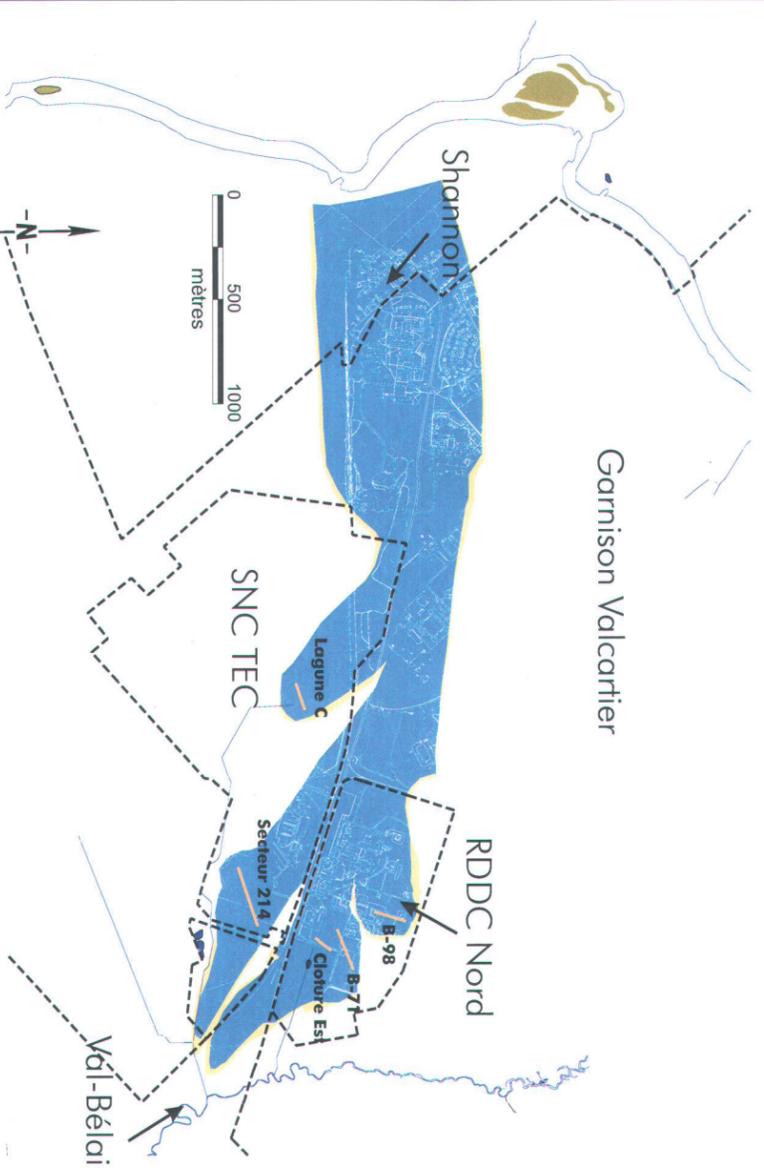


Figure 5.14 Panaches simulés de TCE par modélisation du transport après 60 ans

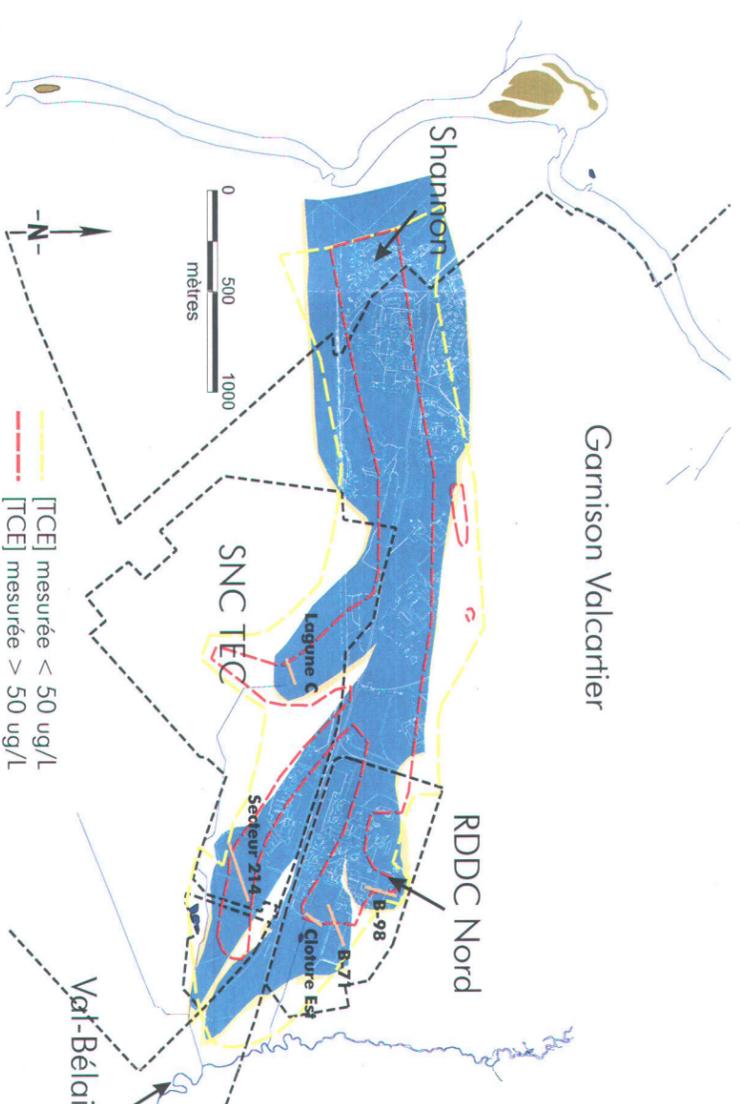


Figure 5.15 Comparaison entre le panache simulé après 60 ans et le panache observé sur le terrain

Caractérisation et modélisation numérique
 de la contamination en TCE dans
 l'eau souterraine du secteur Valcartier,
 Québec, Canada

Alexandre Boulin

INRS-Eau, Terre et Environnement
 Mémoire de maîtrise
 Janvier 2004

Planche 17
 Contribution des zones sources
 à la formation
 du panache de TCE simulé

-  Positions des sources imposées dans le modèle de transport
-  [TCE] mesurée < 50 ug/L
-  [TCE] mesurée > 50 ug/L
-  Contribution au panache simulé, isosurface 50 ug/L, lagune C
-  Contribution au panache simulé, isosurface 50 ug/L, secteur 214
-  Contribution au panache simulé, isosurface 50 ug/L, secteur sud-est, RDDC Nord
-  Contribution au panache simulé, isosurface 50 ug/L, secteur nord, RDDC Nord

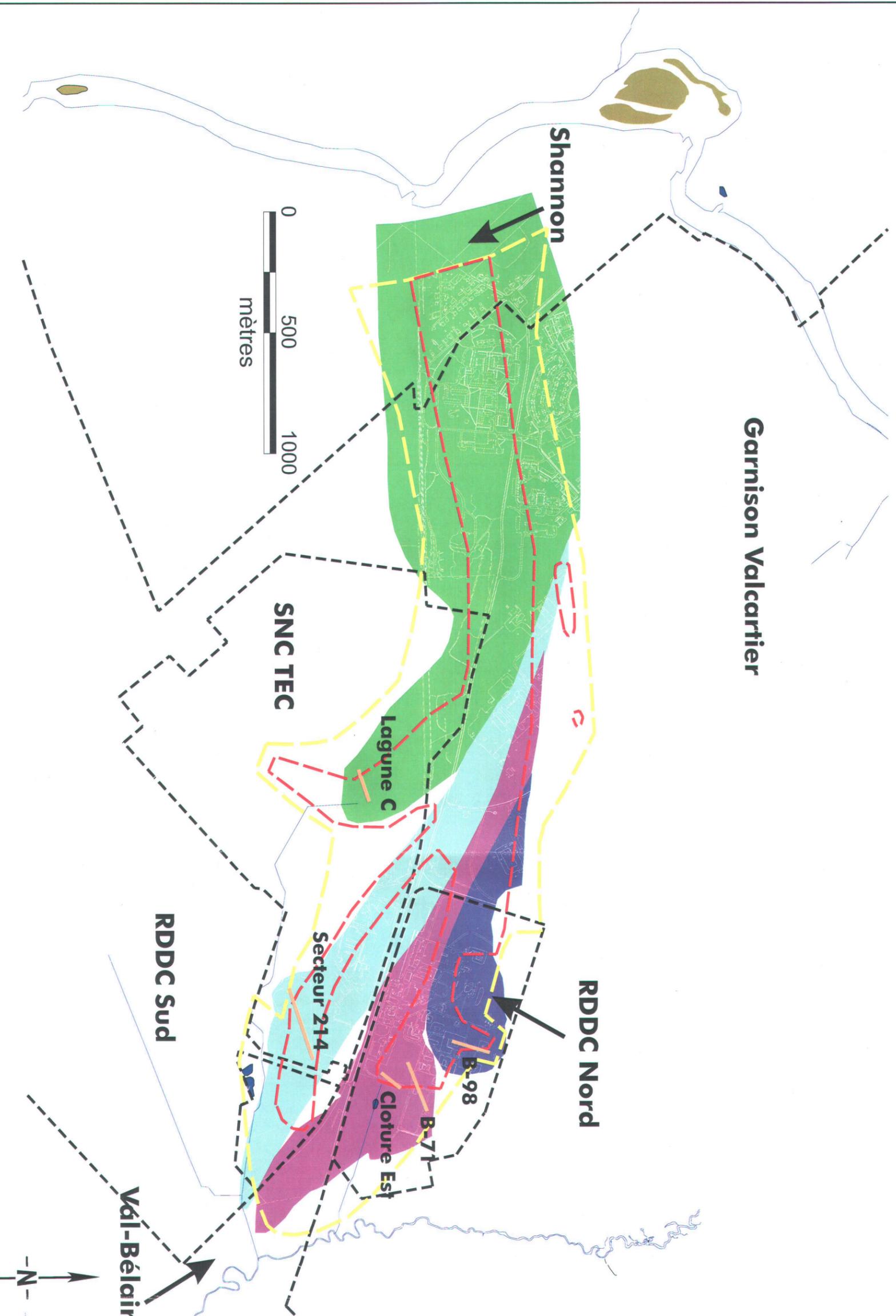


Figure 5.16 Contribution des zones sources de TCE intégrées dans le modèle après 60 ans de simulation