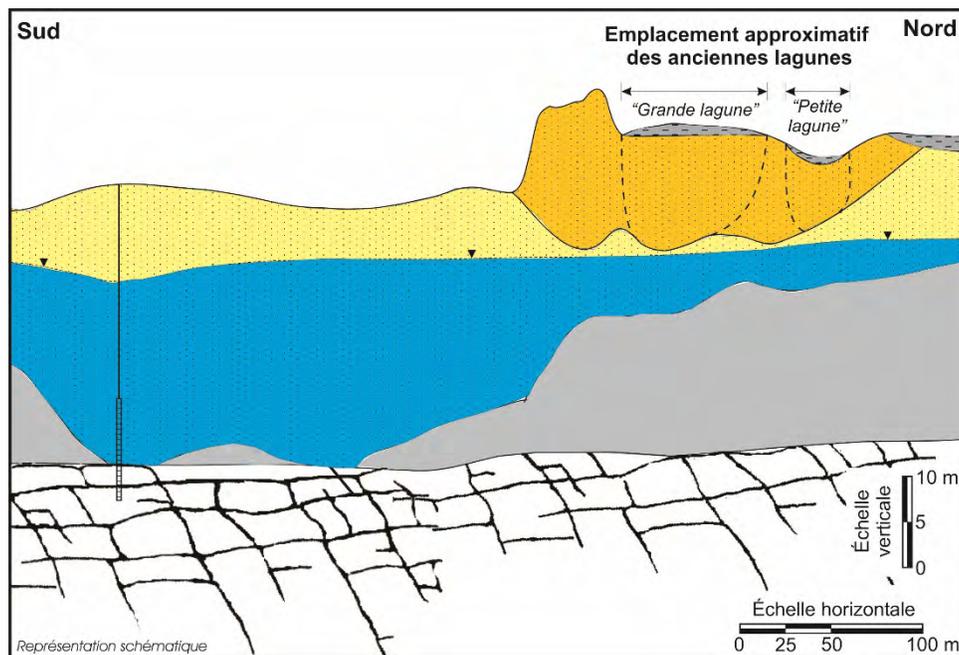


Contexte hydrogéologique et potentiel de réhabilitation du site des anciennes lagunes de Mercier (Québec), Canada

René Lefebvre



Rapport R-914
Mars 2007
(Version après révision linguistique en 2018)

RAPPORT FINAL

Contexte hydrogéologique et potentiel de réhabilitation du site des
anciennes lagunes de Mercier (Québec), Canada

René Lefebvre, Ph. D., professeur titulaire

Institut national de la recherche scientifique
INRS-Eau, Terre et Environnement

Rapport d'expertise soumis à la

Direction des politiques de l'eau

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs

INRS-Eau, Terre et Environnement
Rapport R-914

Mars 2007
(Version après révision linguistique en 2018)

Résumé

Les anciennes lagunes de Mercier étaient des excavations faites dans un esker, soit un épais cordon de sable et gravier d'origine glaciaire, faisant quelques centaines de mètres de largeur et s'étirant sur quelques kilomètres. Ces anciennes lagunes ont contenu, notamment, des liquides immiscibles légers (LIL) et denses (LID) qui étaient des mélanges de nombreux contaminants. Contrairement au LIL qui flotte sur l'eau, le LID est plus dense que l'eau et peut pénétrer en profondeur dans un aquifère. En 1972, un aqueduc a été aménagé pour approvisionner en eau les résidents du rang Sainte-Marguerite afin de remplacer la perte d'usage de leurs puits forés au roc. En 1980, le propriétaire du site a procédé à l'excavation partielle du contenu de la grande lagune, à son remblaiement et à son recouvrement. Un règlement décrété en 1982 a restreint l'usage de l'eau souterraine dans une zone d'exploitation contrôlée entourant le site. Depuis 1984, trois puits pompent l'eau souterraine contaminée émise au site et l'acheminent à l'usine de traitement des eaux souterraines (UTES) aménagée et exploitée par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP). Ce pompage protège efficacement la qualité de l'eau souterraine, mais l'UTES devra éventuellement être remplacée d'ici quelques années.

Notre mandat était d'évaluer l'approche générale de gestion environnementale qui devrait être appliquée au site des anciennes lagunes de Mercier, sur la base d'une revue de l'état des technologies environnementales et des conditions du site. Deux types de mesures sont envisageables : la réhabilitation ou le contrôle des zones sources présentes au site et contenant du LID. Si la réhabilitation par enlèvement du LID des zones sources pouvait être efficace, le site n'aurait plus besoin d'autres mesures de gestion environnementale. Par ailleurs, le seul contrôle de la contamination, par confinement physique ou hydrauliquement, exige d'être appliqué à très long terme, parce que les zones sources de LID vont continuer à émettre de l'eau contaminée.

Au site de Mercier, on retrouve du LID piégé dans les sables et graviers de l'esker jusqu'à une profondeur de 30 m ainsi que du LID jusqu'à 15 m plus bas dans les fractures du roc sous-jacent à l'esker. Le site présente ainsi deux zones sources de contamination contenant du LID immobilisé : 1) dans les sédiments de l'esker; 2) dans les fractures du roc. Les aquifères sont des formations perméables pouvant produire de l'eau : à Mercier, l'esker est un aquifère local, tandis

que le roc est un aquifère exploité régionalement. La circulation de l'eau souterraine à travers le LID des zones sources permet la dissolution partielle des contaminants et engendre des panaches d'eau souterraine contaminée au-delà des critères pour l'eau potable. Puisque la dissolution du LID est très lente, ces émissions de contaminants dissous vont se poursuivre durant plusieurs décennies. Le pompage aux puits de l'UTES permet l'interception des panaches d'eau souterraine contaminée circulant dans l'esker et le roc fracturé et protège ces aquifères.

La littérature scientifique démontre que lorsque des techniques de réhabilitation sont appliquées à des zones sources de LID, une quantité considérable de contaminants demeure en place et que ces technologies ne se sont pas efficaces pour la réhabilitation des aquifères rocheux fracturés. Ainsi, l'enlèvement de masse de LID dans les zones sources ne génère pas d'effet positif suffisant pour satisfaire aux normes de potabilité de l'eau souterraine, car le LID laissé en place demeure une source active de contamination de l'eau souterraine. Enfin, certaines technologies de réhabilitation impliquent aussi un risque de susciter à nouveau la migration du LID plus en profondeur et de rendre la situation encore plus problématique. La littérature scientifique démontre donc que les technologies de réhabilitation des zones sources de LID n'ont pas encore atteint un niveau d'efficacité permettant d'arrêter les mesures de contrôle, particulièrement dans les sites complexes comme celui de Mercier. On peut donc prédire avec certitude qu'à la suite de travaux de réhabilitation des zones sources au site de Mercier, il faudrait encore maintenir des mesures de contrôle pour les deux zones sources de LID dans l'esker et au roc.

À moyen terme, nous ne pouvons pas recommander d'effectuer des travaux de réhabilitation des zones sources de LID au site des anciennes lagunes de Mercier, considérant l'efficacité mitigée qu'auraient les technologies de réhabilitation à ce site et la nécessité de maintenir par la suite des mesures de contrôle similaires à celles actuellement en place. Lors du remplacement de l'UTES, la recommandation est donc faite de mettre en œuvre des mesures de contrôle des zones sources dans l'esker et dans le roc. De telles mesures de contrôle devront être maintenues pendant plusieurs décennies. La conception d'un système de contrôle optimal nécessitera de bien tenir compte des conditions complexes du site et de compléter la caractérisation déjà réalisée à ce site par des travaux ciblés répondant aux besoins particuliers de la conception.

Table des matières

1. INTRODUCTION	1
1.1 DESCRIPTION DU MANDAT ET DES ACTIVITÉS RELIÉES AU MANDAT	1
1.2 SOURCES DE DONNÉES UTILISÉES	1
2. REVUE DU POTENTIEL DE RÉHABILITATION DES ZONES SOURCES DE LI	3
2.1 MODÈLES CONCEPTUELS DE LA MIGRATION DES LI	3
2.2 PANACHES ÉMIS PAR LES ZONES SOURCES DE LI	4
2.3 OPTIONS DE GESTION DES SITES AVEC DES ZONES SOURCES DE LID	5
2.3.1 PRINCIPALES TECHNIQUES DE RÉHABILITATION DES ZONES SOURCES DE LID	5
2.3.2 PRINCIPAUX MODES DE CONTRÔLE DES ZONES SOURCES DE LID	7
2.4 POTENTIEL DE RÉHABILITATION DES ZONES SOURCES DE LID	9
3. CONTEXTE DU SITE DES ANCIENNES LAGUNES DE MERCIER	13
3.1 PHYSIOGRAPHIE, LOCALISATION ET ACCÈS	13
3.2 CONTEXTE RÉGIONAL GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE	13
3.3 MODÈLE CONCEPTUEL DES ANCIENNES LAGUNES DE MERCIER	15
3.4 CONTRAINTES ASSOCIÉES AUX CONTEXTES DU SITE	17
3.5 CONDITIONS CONTRAIGNANT LE PLUS LA GESTION ENVIRONNEMENTALE DU SITE	20
4. CONCLUSION : APPROCHE APPLICABLE AU SITE DE MERCIER	23
4.1 APPROCHE RECOMMANDÉE POUR LA GESTION DU SITE	23
4.1.1 POTENTIEL DE RÉHABILITATION DES ZONES SOURCES	23
4.1.2 CONTRÔLE DES PANACHES DISSOUS ÉMIS PAR LES ZONES SOURCES	25
5. BIBLIOGRAPHIE	29
5.1 RÉFÉRENCES CITÉES	30
5.2 RÉFÉRENCES SUR LE SITE DE MERCIER	33

Liste des tableaux, figures et annexes

(Tous les tableaux, figures et annexes sont regroupés à la fin du rapport.)

Tableaux

Tableau 3.1. Composantes du contexte régional des anciennes lagunes de Mercier.....	39
Tableau 3.2. Synthèse des contraintes du site des anciennes lagunes de Mercier	40

Figures

Figure 2.1. Modèle conceptuel de migration de LIL et de LID dans les aquifères granulaires....	43
Figure 2.2. Modèle conceptuel de migration de LID dans les aquifères fracturés	44
Figure 2.3. Panaches de contaminants dissous émis par différents types de zones sources	45
Figure 3.1. Localisation du site des anciennes lagunes de Mercier	46
Figure 3.2. Illustration schématique du contexte régional du site des anciennes lagunes de Mercier	47
Figure 3.3. Localisation du site des anciennes lagunes de Mercier montrant les principaux forages et tranchées disponibles.....	48
Figure 3.4a. Modèle conceptuel du site des anciennes lagunes de Mercier – Unités géologiques et écoulement	49
Figure 3.4b. Modèle conceptuel du site des anciennes lagunes de Mercier – Zones sources	50
Figure 3.4c. Modèle conceptuel du site des anciennes lagunes de Mercier – Panaches de contaminants dissous et UTES.....	51
Figure 3.5. Zones sources, panaches et directions générales d'écoulement dans l'esker (à gauche) et dans le roc sous-jacent (à droite).....	52

Annexe

Travaux antérieurs de l'auteur et connaissance du site.....	55
Liste des publications de l'auteur ayant un lien avec le site de Mercier.....	57

1. Introduction

1.1 Description du mandat et des activités reliées au mandat

Le présent rapport documente les travaux réalisés à l'INRS-ETE dans le cadre du mandat que lui a confié la Direction des politiques de l'eau du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) pour *évaluer la possibilité de réhabiliter les zones sources de LID et LIL situées dans l'aquifère granulaire et l'aquifère de roc fracturé au site des anciennes lagunes de Mercier*. La réalisation de ce mandat impliquait les travaux suivants :

- Examiner et analyser la documentation disponible concernant la situation de contamination des sols et des eaux du secteur des anciennes lagunes de Mercier;
- À partir d'une révision de la littérature, résumer les interventions réalisées en Amérique du Nord sur des sites comparables, tant sur le plan du contexte hydrogéologique que de la nature des contaminants en cause (liquides immiscibles denses), à celui de Mercier;
- Réviser les technologies disponibles et analyser leur applicabilité au site de Mercier;
- Déterminer la possibilité ou non de restaurer la qualité d'origine des eaux souterraines dans la région des anciennes lagunes de Mercier.

Ce mandat vise donc à définir l'approche générale de gestion environnementale qui serait appropriée pour le site des anciennes lagunes de Mercier. Le texte a été rédigé pour rendre le rapport accessible à des non-spécialistes. Puisqu'il est tout de même nécessaire d'utiliser un vocabulaire technique, lorsque de nouveaux termes sont introduits, ils sont indiqués en gras et définis dans le texte qui suit.

L'expérience de l'auteur est documentée en annexe, de même que celle de M^{me} Cintia Racine, assistante de recherche à l'INRS, qui a participé à la réalisation du mandat. Les opinions émises dans ce rapport sont strictement celles de l'auteur.

1.2 Sources de données utilisées

Pour répondre à l'objectif de notre mandat, nous avons d'abord fait une revue de littérature pour établir les capacités technologiques disponibles pour réhabiliter les sites avec une zone source de

contamination contenant des liquides immiscibles, comme c'est le cas aux anciennes lagunes de Mercier. Cette revue est résumée au chapitre 2.

Ensuite, pour faire la synthèse du contexte rencontré au site des anciennes lagunes de Mercier documenté au chapitre 3, nous avons pris connaissance de la majorité des études réalisées au site, dont les principales références sont présentées dans la bibliographie (section 5.2). Nous avons aussi consulté les données recueillies lors des programmes de caractérisation antérieurs. Ces données sont présentées dans les compilations accompagnant les rapports des comités d'experts mandatés par l'ancien propriétaire du site, Laidlaw (Mercier Remediation Panel, 1993), et le MDDEP (Comité des experts internationaux, 1994). Le dernier rapport public ayant résumé les connaissances de l'époque sur le contexte du site et le potentiel de sa réhabilitation a été publié par le BAPE (1994) après la tenue d'audiences publiques. La plus importante caractérisation du site a cependant été réalisée après ce rapport, par la Direction des enquêtes du MDDEP en 1995 et 1996 (MENV, 1997). Notre rapport se base ainsi essentiellement sur les informations tirées de ces données qui permettent de bien définir le contexte du site (MENV, 1997). L'auteur a aussi pris connaissance du rapport concernant une caractérisation spécifique réalisée au site en 2005 (Leppert Associates Inc., 2006) pour le compte de Clean Harbors, le présent propriétaire du site.

2. Revue du potentiel de réhabilitation des zones sources de LI

Ce chapitre a pour but de mettre en perspective le problème posé par le type de contamination rencontré au site des anciennes lagunes de Mercier. Nous passons d'abord en revue les modèles conceptuels représentatifs des sites contaminés par des liquides immiscibles (LI), particulièrement les liquides immiscibles denses (LID). Ceci permet d'expliquer comment se fait la migration de LI, de même que la façon dont ces sites sont à la source de la contamination des eaux souterraines. La deuxième partie du chapitre explique le défi posé par la réhabilitation des zones sources de contamination où du LID est présent. Ce chapitre est basé sur la revue de publications importantes sur ce sujet (Schwille, 1988; Cohen et Mercer, 1993; Pankow et Cherry, 1996; NRC, 1994 et 2004; EPA, 1999a, 1999b, 2003 et 2004; ITRC, 2002, 2003 et 2004; Kueper et coll., 2003; Geosyntec, 2004; McGuire et coll., 2006).

2.1 Modèles conceptuels de la migration des LI

Les **aquifères** sont des formations géologiques qui permettent l'exploitation de l'eau souterraine. On peut définir deux types principaux d'aquifères, les **aquifères granulaires** et les **aquifères fracturés**. Dans les aquifères granulaires, comme les sables et graviers, l'écoulement de l'eau souterraine se fait dans les pores formés par les espaces présents entre les grains solides. Dans les aquifères fracturés, présents généralement dans le roc, l'écoulement se fait à travers un réseau de fractures ouvertes qui sont en contact les unes avec les autres. Ces deux types d'aquifères se retrouvent au site contaminé des anciennes lagunes de Mercier. L'eau souterraine se retrouve normalement à une certaine profondeur sous la surface du sol. On appelle **surface libre** la limite entre la **zone non saturée** sous la surface du sol et la **zone saturée** en profondeur dans laquelle l'eau souterraine occupe tous les pores ou fractures. Dans la zone non saturée, l'air occupe une partie des pores ou fractures qui contiennent aussi de l'eau.

Les types de contaminants considérés comme **liquides immiscibles (LI)** sont difficiles à dissoudre dans l'eau, de sorte qu'ils forment une phase organique séparée de celle de l'eau, comme l'huile dans la vinaigrette. Un LI peut contenir un seul composé chimique pur ou encore un mélange de composés, comme l'essence qui contient plusieurs hydrocarbures différents. Les LI sont subdivisés en deux groupes sur la base de leur densité relativement à celle de l'eau. Un **liquide**

immiscible dense (LID) est plus dense que l'eau, tandis qu'un **liquide immiscible léger (LIL)** est moins dense que l'eau. Compte tenu de ces définitions, un LID coulera à travers une colonne d'eau tandis qu'un LIL flottera à la surface de l'eau. Les LIL sont couramment formés d'hydrocarbures utilisés comme carburants (essence, diesel) ou lubrifiants (huile à moteur). Les LID sont formés surtout de solvants chlorés (PCE, TCE, DCE, etc.), de biphenyles polychlorés (BPC) ou d'autres hydrocarbures halogénés. Les acronymes anglophones équivalents à LI, LID et LIL sont, respectivement, *NAPL (Non-Aqueous Phase Liquid)*, *DNAPL (Dense Non-Aqueous Phase Liquid)* et *LNAPL (Light Non-Aqueous Phase Liquid)*.

La figure 2.1 montre des modèles conceptuels de la migration d'un LIL ainsi que d'un LID à partir de réservoirs qui fuient dans un aquifère granulaire, comme un sable. L'infiltration du LIL se fait dans la zone non saturée jusqu'à la surface libre, où il y a accumulation d'une lentille de LIL qui flotte à la surface de la zone saturée et peut être mobile. Dans le cas du LID, la migration se poursuit à travers l'aquifère, sous la surface libre, jusqu'à ce qu'une surface de faible perméabilité soit atteinte. Des accumulations de LID peuvent se former au-dessus de matériaux peu perméables lors de la migration du LID. Le passage de LIL ou de LID lors de leur migration laisse une partie du LI sous forme **résiduelle**, qui est piégé dans les pores et est immobile. La figure 2.2 montre un modèle conceptuel de la migration de LID dans du roc fracturé. Dans ce cas, la migration va suivre le réseau de fractures interconnectées et se poursuivre généralement vers le bas, mais en suivant un cheminement qui peut être très complexe.

L'eau qui entre en contact avec le LI résiduel peut dissoudre une partie des composés du LI. L'eau souterraine devient donc contaminée lorsqu'elle entre en contact avec les LI libres ou résiduels, constituant des **zones sources** de contamination dans les aquifères. Lorsque l'eau qui circule dans un aquifère entre en contact avec du LID, dans des pores ou des fractures, il se formera ainsi un panache de contaminants dissous circulant avec l'eau souterraine (section 2.2).

2.2 Panaches émis par les zones sources de LI

Un **panache** de contaminants dissous est constitué d'eau souterraine polluée qui migre dans les aquifères à partir d'une zone source. Le NRC (2004) donne la définition suivante de « **zone source** » : zone sous la surface du sol contenant des contaminants et qui agit en tant que réservoir

soutenant un panache de contaminants dans l'eau souterraine, l'eau de surface ou l'air, ou qui agit en tant que source d'exposition directe. La figure 2.3 distingue trois types de zones sources : 1) sans LI; 2) de LIL; 3) de LID. On constate que les sources sans LI (figure 2.3a) et celles de LIL (figure 2.3b) sont similaires en ce qui concerne l'origine des contaminants, qui est localisée à la surface de la nappe. Le panache de contaminants dissous émis par ces deux types de zones sources provient des précipitations qui se sont infiltrées dans le sol et sont entrées en contact avec les zones sources avant d'atteindre la nappe. Dans le cas d'une source de LID (figure 2.3c), les composés dissous contaminant la nappe peuvent provenir de la surface, de l'intérieur de la zone saturée ou de sa base, parce que du LID peut y être présent.

En plus de la complexité des zones sources elles-mêmes, il faut aussi considérer les conditions particulières d'un site pour anticiper leur effet sur les voies de migrations potentielles de LID. Ces conditions locales vont influencer la distribution de LID et la forme du panache de composés dissous émis par la zone source. Compte tenu de la complexité que peuvent comporter les zones sources de LID en ce qui concerne l'origine de la contamination et les voies de migration du LID, la caractérisation de ces zones sources est difficile (EPA, 2004).

2.3 Options de gestion des sites avec des zones sources de LID

Deux types de mesures sont envisageables pour la gestion environnementale d'un site contaminé : la **réhabilitation** ou le **contrôle** des zones sources. Si la réhabilitation d'un site par enlèvement du LID d'une zone source pouvait être efficace, le site n'aurait plus besoin d'autres mesures de gestion environnementale. Par ailleurs, le seul contrôle de la contamination, par confinement physique ou hydrauliquement, exigerait normalement d'être appliqué à très long terme, parce que les zones sources de LID continueraient de générer des panaches d'eau contaminée.

2.3.1 Principales techniques de réhabilitation des zones sources de LID

Cette section ne fait qu'une brève description des principales méthodes de réhabilitation des zones sources de LID. Plus de détails se trouvent dans les références suivantes : ITRC (2002), EPA (2003), Kueper et coll. (2003), NRC (1994 et 2004) et Lefebvre (2006). Freeze (2000) fait aussi une description vulgarisée des techniques de réhabilitation des zones sources.

Notre discussion est limitée aux **technologies de réhabilitation *in situ***, c'est-à-dire celles qui décontaminent les zones sources de LID en place, plutôt que les **technologies de réhabilitation *ex situ*** qui impliquent l'excavation du matériel contaminé avant son traitement ou enfouissement sécuritaire. L'excavation n'est réalisable que dans les cas relativement simples de contamination, à faible profondeur, où les volumes de matériel contaminé sont limités. L'excavation nécessite aussi de prendre des précautions pour minimiser l'exposition aux contaminants des travailleurs, de la population locale et de l'environnement en général.

Parmi les nombreuses technologies de réhabilitation *in situ*, nous ne décrivons ici que les plus couramment appliquées d'après Geosyntec (2004) et McGuire et ses collaborateurs (2006). Deux approches sont appliquées dans ces technologies : la destruction en place ou l'enlèvement des contaminants présents dans les zones sources. Pour arriver à faire la **destruction en place** des contaminants, les approches employées le plus souvent sont la biorestauration et l'oxydation chimique. L'**enlèvement** des contaminants des zones sources se fait le plus souvent en utilisant des méthodes thermiques ou par lavage des sols avec circulation de fluides à travers la zone source.

La **biorestauration** est basée surtout sur la stimulation des microorganismes (principalement les bactéries) présents naturellement dans le sol et qui sont capables de « briser » les molécules formant les contaminants pour les réduire à des formes non toxiques. La stimulation de l'activité des microorganismes peut se faire en modifiant les conditions chimiques de l'eau souterraine pour les rendre plus favorables à la croissance des organismes désirés ou en leur fournissant les oligoéléments essentiels à leur croissance. La biorestauration a été appliquée à ses débuts à la dégradation des hydrocarbures en place ou dans des piles hors terre de sols contaminés. Cette approche a ensuite été appliquée aux panaches dissous émis par les zones sources de LID, notamment pour les solvants chlorés. Au cours des dernières années, des évidences scientifiques ont montré que cette approche peut aussi être appliquée au LID dans les zones sources (McGuire et coll., 2006). L'**oxydation *in situ*** de LID dans les zones sources se fait par l'injection d'un oxydant (peroxyde d'hydrogène, permanganate, ozone) qui entraîne la transformation des contaminants organiques en produits non toxiques. Pour être efficaces, les fluides injectés lors de l'oxydation *in situ* doivent atteindre les endroits où se trouve le LID, ce qui n'est pas toujours possible lorsqu'une partie du LID est présente dans des unités de faible perméabilité.

Nous avons mentionné qu'une grande partie du LID présent dans les zones sources se trouve immobilisée et piégée à saturation résiduelle dans les pores des sols ou les fractures du roc (section 2.1). La réhabilitation par l'approche d'enlèvement des contaminants repose sur le transfert de ces contaminants hors de la zone source en augmentant la mobilité du LID ou en favorisant le transfert des composés du LID vers un fluide plus mobile, comme l'eau ou l'air. Les **méthodes thermiques** reposent sur l'augmentation de la température des zones sources après l'injection de vapeur d'eau ou le chauffage électrique par conduction. À une température plus élevée, le LID est moins visqueux, donc plus mobile, et la volatilisation des contaminants organiques est augmentée, de sorte que la récupération du LID par circulation d'eau ou d'air est facilitée. Le chauffage à très haute température ($> 100\text{ °C}$) permet aussi la destruction thermique de certains composés. Le **lavage des sols** utilise l'injection de solutions tensioactives (savons) ou de solvants pour augmenter la solubilité des composés du LID dans la solution de lavage ou déplacer le LID des pores où il est piégé. Les méthodes thermiques ou de lavage des sols impliquent normalement la récupération des contaminants dans de l'eau ayant circulé à travers la zone source et le traitement de cette eau ou du LID dans un système aménagé hors terre.

L'applicabilité des technologies de réhabilitation des zones sources dépend des conditions particulières des sites et de la nature de la contamination présente sous forme de LID. Ces technologies ne sont donc pas applicables à tous les cas et peuvent même être contre-indiquées dans certaines situations. Par exemple, si la zone source n'a pas de base imperméable, les technologies d'enlèvement des contaminants comportent un risque d'aggraver la situation en engendrant une migration encore plus profonde du LID rendu plus mobile par ces technologies.

2.3.2 Principaux modes de contrôle des zones sources de LID

L'approche de gestion des sites contaminés par le contrôle des zones sources a pour but d'empêcher la migration de panaches de contaminants dissous provenant du contact de l'eau souterraine avec du LID. Cet objectif est atteint soit par un confinement physique de la zone source, soit par un contrôle hydraulique du panache émis par la zone source.

Le **confinement physique** des zones sources se fait normalement par l'installation d'une couverture empêchant l'infiltration d'eau dans la zone source ainsi que par la mise en place d'une barrière verticale autour de la zone source. Cette barrière verticale peut être constituée d'un mur de métal enfoncé dans le sol ou par la mise en place d'un matériel imperméabilisant dans une excavation. Le confinement physique requiert la présence d'une base imperméable sous la zone source pour empêcher la perte de contaminants par la base. Le confinement physique est souvent complété par le pompage interne de l'eau contenue dans la zone source de façon à ce que, en cas de fuite dans le mur, l'écoulement se fasse vers l'intérieur de l'enceinte plutôt que vers l'extérieur. Cette eau est normalement fortement contaminée et doit être traitée. Le confinement peut aussi être complété par la récupération des gaz dans la partie non saturée de l'enceinte pour éviter la migration de contaminants volatilisés hors du site.

Le **contrôle** des zones sources est souvent réalisé de façon **hydraulique** par la mise en place d'un système de **pompage et traitement**. Les trois puits de captage et l'usine de traitement des eaux souterraines (UTES) en fonction au site des anciennes lagunes de Mercier forment un tel système de pompage et traitement. Ce système consiste à pomper l'eau souterraine en aval d'une zone source dans le but d'intercepter le panache d'eau souterraine contaminée émis par la zone source. L'eau contaminée captée est acheminée à un système de traitement hors terre avant de disposer de l'eau traitée.

Avant que la compréhension des zones sources de LID évolue à la fin des années 1980 et au début des années 1990, les systèmes de pompage et traitement étaient souvent mis en place avec pour objectif de réhabiliter une zone source de LID. Depuis, il est devenu évident qu'il n'est pas possible de réhabiliter des zones sources de cette façon, car les composés formant du LID sont très peu solubles. L'enlèvement de masse par simple circulation d'eau dans une zone source de LID n'est donc pas une méthode de réhabilitation efficace. Cependant, les systèmes de pompage et traitement sont couramment utilisés pour contrôler efficacement les panaches émis par les zones sources de LID.

Malgré sa flexibilité et son efficacité éprouvée, le contrôle par pompage et traitement est une méthode qui implique des frais récurrents substantiels reliés à son exploitation et à son entretien. Des

approches passives, comme la mise en place des **murs réactifs** enfouis dans le sol, ont donc été mises au point pour jouer le même rôle que le pompage et traitement. Cette méthode implique la mise en place dans l'aquifère d'un mur perméable permettant le traitement par réaction du panache de contaminants dissous qui le traverse. Les murs réactifs ne peuvent cependant pas dégrader tous les types de contaminants et leur profondeur d'installation est limitée.

2.4 Potentiel de réhabilitation des zones sources de LID

La réhabilitation des zones sources contenant du LID représente un défi technologique important. Un débat comportant des arguments techniques, sociaux et économiques entoure présentement l'opportunité de procéder ou non à la réhabilitation des zones sources de LID. Freeze (2000) apporte un éclairage intéressant sur ce débat, tout en vulgarisant les concepts techniques reliés aux sites contaminés, ainsi qu'en traçant l'évolution des aspects sociaux, des aspects économiques et de la réglementation environnementale entourant les sites contaminés.

Aux États-Unis, l'Interstate Technology and Regulatory Council (ITRC), qui a pour mandat de faire accepter de nouvelles technologies de réhabilitation, a publié plusieurs rapports portant sur la caractérisation et la réhabilitation des zones sources de LID. L'Environmental Protection Agency (EPA) a réuni un panel d'experts pour brosser l'état de la situation concernant les effets de la réhabilitation des zones sources contaminées par du LID. Les questions posées par l'EPA étaient les suivantes : est-ce que des technologies permettent de réduire la masse de LID dans les zones sources et est-ce que la réduction de masse de LID dans les zones sources entraîne suffisamment de bénéfices environnementaux pour être réalisée? Le National Research Council (NRC) convoque des comités scientifiques pour établir les bases scientifiques nécessaires à l'établissement de politiques nationales. Un tel comité a abordé la question critique de déterminer ce que la réhabilitation de zones sources de LID peut apporter et si elle est appropriée à un type de site en particulier. À la suite de ces travaux, des avantages potentiels ont été relevés concernant l'enlèvement de masse de contaminants dans les zones sources de LID (ITRC, 2002; EPA, 2003; NRC, 2004) :

- En l'absence de réhabilitation de zones sources, les efforts sont orientés vers des mesures de contrôle des émissions et la réduction de l'exposition aux contaminants. Ce contrôle se fait soit hydrauliquement (pompage et traitement), soit par confinement physique (murs,

barrières et recouvrements). Ces mesures s'accompagnent de programmes de surveillance importants pour vérifier leur efficacité. S'il n'y a pas d'enlèvement de masse de contaminants à la zone source, ces mesures devraient être imposées pratiquement à perpétuité, ce qui représente un coût majeur d'exploitation et d'entretien à long terme;

- L'enlèvement de masse à la source permettrait une atténuation plus rapide du panache de contaminants émanant d'un site et permettrait ainsi une fermeture plus rapide du site;
- Pendant la mise en œuvre de mesures de contrôle, les sites ne sont pas disponibles à d'autres usages ou le sont seulement à des usages très restreints. L'enlèvement de masse et la réhabilitation de la zone source permettraient un usage économique plus rapide des terrains contaminés et la cessation de la responsabilité environnementale du propriétaire;
- Plusieurs États américains permettent la gestion d'un site par atténuation naturelle, pourvu que la zone source de la contamination soit enlevée. L'enlèvement de masse pourrait réduire le flux de contaminants dissous à un niveau permettant l'atténuation naturelle.

Malgré ces avantages potentiels importants, plusieurs constats généraux ont été faits qui limitent l'utilisation des technologies de réhabilitation visant l'enlèvement de masse de contaminants dans les zones sources de LID (ITRC, 2002 et 2004; EPA, 2003; NRC, 2004) :

- Il y a un manque de données fiables sur les coûts et la performance des techniques d'enlèvement de masse. Sans cette base d'information, un gestionnaire prudent peut difficilement engager les fonds importants exigés par l'enlèvement de masse;
- Presque toutes les technologies de réhabilitation des zones sources de LID devraient subir plus d'essais systématiques à l'échelle du terrain pour mieux comprendre leur performance technique et économique;
- Même lorsqu'elle peut être appliquée efficacement à un site, la réhabilitation d'une zone source de LID par les technologies connues ne peut enlever plus que 70 à 80 % de la masse initialement présente, dans les meilleurs des cas. Même à ces meilleurs niveaux d'enlèvement de masse, **une zone source de LID ainsi « réhabilitée » demeure une source active de contamination de l'eau souterraine;**
- L'applicabilité de la réhabilitation de zones sources et des technologies disponibles dépend fortement du type de contexte présent à un site donné et n'est pas toujours possible. De plus, l'applicabilité de la majorité des technologies dépend beaucoup du degré d'hétérogénéité des sites. En fait, **la plupart des technologies ne sont pas applicables,**

sont négativement affectées ou n'ont pas été suffisamment testées lorsqu'il y a présence de matériaux de faible perméabilité ou fracturés;

- Il y a très peu de données sur l'effet de l'enlèvement de masse sur l'amélioration potentielle de la qualité de l'eau souterraine. En fait, l'enlèvement de masse de LID semble avoir peu d'effet positif sur la qualité de l'eau souterraine. Il faut déterminer si le gain en qualité d'eau justifie l'application de la réhabilitation, surtout si le système de contrôle originalement en place doit être maintenu même après l'enlèvement de masse;
- Les difficultés techniques liées à la caractérisation et à la réhabilitation des zones sources, conjuguées aux forts coûts potentiels, sont si importantes qu'**il n'y a jamais eu de cas documentés de grands sites contaminés avec du LID ayant réussi à atteindre les limites de concentrations maximales de potabilité à la suite d'une réhabilitation;**
- Chaque technologie de réhabilitation peut produire des effets secondaires négatifs. Aussi, l'application des technologies de réhabilitation implique un risque de susciter la migration du LID présent dans la zone source, car plusieurs techniques ont pour principe de rendre le LID plus mobile pour faciliter sa récupération. **La situation pourrait ainsi s'aggraver après une tentative de réduire la masse de LID;**
- Il est difficile de mesurer la performance des techniques de réduction de la masse des zones sources en fonction des objectifs précis de réhabilitation d'un site donné. Il n'y a pas de consensus à l'heure actuelle sur un ensemble de mesures permettant d'évaluer le bénéfice de l'enlèvement de masse d'une zone source de LID, particulièrement l'effet à long terme d'un tel enlèvement sur le flux de masse de contaminants émis par un site;
- **Le contrôle à long terme, par confinement physique ou hydrauliquement, restera une stratégie fonctionnelle et efficace pour la majorité des sites complexes avec du LID.**

Suivant les études générales précédentes, deux enquêtes importantes ont été menées pour fournir plus de données sur les coûts et la performance des technologies de réhabilitation des zones sources de LID. D'abord, Geosyntec (2004) a fait la revue des cas où la réhabilitation des zones sources de LID avait été tentée pour en évaluer l'applicabilité : 118 sites avec des données complètes ont été recensés, de même que 21 études de cas publiées. Les technologies les plus appliquées étaient les méthodes thermiques, l'oxydation chimique et la biorestauration. **Aucune application de technologies de réhabilitation de zone source n'a été jugée un succès pour les zones sources localisées dans le roc.** Une seule opération de réhabilitation d'une zone source de LID dans un

matériel granulaire a répondu au critère de « succès ». Ce critère était fondé sur l'atteinte de deux objectifs : l'enlèvement de plus de 80 % de la masse de LID en place et une réduction de plus de 80 % du flux de masse de contaminants dissous, sans remontée subséquente du flux de masse. Pour 14 sites, l'un ou l'autre des objectifs a été atteint. Toutefois, **aucun essai de réhabilitation d'une zone source de LID n'a permis d'atteindre par la suite les limites de concentrations maximales** des composés dissous applicables à l'eau potable.

Récemment, McGuire et ses collaborateurs (2006) ont publié une étude plus complète de la performance des technologies d'enlèvement de masse à 59 sites ayant des zones sources de LID formées de solvants chlorés. Quatre technologies ont été évaluées : biorestauration (26 sites), oxydation chimique (23 sites), méthodes thermiques (6 sites) et lavage des sols par tensioactifs ou cosolvants (4 sites). La performance de ces technologies a été évaluée en comparant les concentrations en contaminants observées avant et après l'application des technologies. Environ 75 % des essais ont mené à des réductions de 70 % des concentrations des composés originalement dans la zone source de LID présente dans des matériaux granulaires. Cependant, plusieurs essais ont vu les concentrations augmenter par la suite. Même si les concentrations ont été grandement réduites, **aucun des essais de réhabilitation de zone source n'a permis d'atteindre les critères de potabilité de l'eau souterraine pour tous les contaminants**. Ces sites devront donc continuer à recourir à une forme ou une autre de méthode de gestion environnementale (contrôle ou confinement). De plus, il n'est pas encore possible de déterminer l'effet potentiel de la réduction de masse de LID sur la durée requise de la réhabilitation de ces sites.

Les enquêtes de Geosyntec (2004) et de McGuire et ses collaborateurs (2006) démontrent que les technologies de réhabilitation des zones sources de LID n'ont pas encore atteint un niveau d'efficacité permettant d'enlever suffisamment de masse de LID pour ne pas avoir à prendre par la suite d'autres mesures de gestion environnementale. Le défi posé par les zones sources de LID dans le roc est particulièrement difficile à relever et aucune technologie ne peut à l'heure actuelle réhabiliter efficacement une zone source de LID dans le roc fracturé.

3. Contexte du site des anciennes lagunes de Mercier

Ce chapitre décrit le site des anciennes lagunes de Mercier. Après une brève définition du contexte hydrogéologique régional, les conditions rencontrées au site sont résumées sous la forme d'un modèle conceptuel. Ce modèle synthétise les principales caractéristiques du site et des zones sources de contamination ainsi que le fonctionnement du système de contrôle hydraulique présentement en place. Cette description permet de définir les contraintes du site qui sont déterminantes pour évaluer l'applicabilité des technologies de traitement au niveau des zones sources de la contamination, sujet qui sera traité dans le dernier chapitre.

3.1 Physiographie, localisation et accès

Un projet de cartographie hydrogéologique régionale mené conjointement par le MDDEP et la Commission géologique du Canada a récemment été réalisé dans le bassin de la rivière Châteauguay dont la région de Mercier fait partie. L'atlas produit à la suite de ce projet donne un excellent aperçu des conditions naturelles rencontrées dans la région d'étude, notamment en ce qui concerne l'écoulement de l'eau souterraine (Côté et coll., 2006). La figure 3.1 montre la localisation régionale du site des anciennes lagunes de Mercier qui est situé au sud-est de cette municipalité. La région constitue une plaine argileuse bordée à l'ouest par la rivière Châteauguay et à l'est, par des collines. La région a principalement une vocation agricole, surtout maraîchère, et l'eau souterraine y est utilisée pour combler des besoins privés, agricoles, industriels et municipaux. Depuis 1982, l'usage de l'eau souterraine est restreint au sein d'une zone entourant le site. Cette région contrôlée (figure 3.1) a été révisée lors de l'entrée en vigueur du Règlement sur le captage des eaux souterraines (Q-2, r. 1.3) en juin 2002 (Pontlevoy et coll., 2002).

3.2 Contexte régional géologique et hydrogéologique

Le tableau 3.1 et la figure 3.2 résument le contexte hydrogéologique de la région entourant le site des anciennes lagunes de Mercier (pour plus de détails, voir Pontlevoy, 2004). La figure 3.2 représente une coupe schématique d'orientation est-ouest montrant les conditions présentes sous la surface du sol en partant des collines à l'est de la région jusqu'à la rivière Châteauguay, en passant par l'esker au site des anciennes lagunes de Mercier. Au chapitre des conditions géologiques, on retrouve dans la région un socle rocheux fracturé qui est recouvert par des dépôts meubles résultant du dernier épisode glaciaire ayant touché l'ensemble du Québec. Le socle

rocheux est ainsi recouvert par une couche de **till** formé par l'abrasion des glaciers sur le socle rocheux. Le till est un matériel peu perméable constitué de sédiments fins, mais contenant aussi des blocs. Lors du retrait des glaces, de grands volumes d'eau de fonte se sont écoulés à la base des glaciers et ont laissé par endroits de longs cordons de sable et gravier qui constituent des **eskers**. La mise en place des eskers a érodé le till par endroits, mettant ainsi directement en contact le sable et le gravier de l'esker avec le socle rocheux sous-jacent. Le retrait des glaces a été suivi par l'envahissement du territoire par la mer de Champlain. Les sédiments fins amenés dans cette mer par les cours d'eau ont recouvert le fond de la mer. On retrouve donc maintenant une couche d'**argile marine** recouvrant la surface des régions basses. Cette argile recouvre partiellement l'esker de Mercier, mais elle est absente des collines à l'est de la région.

Les conditions géologiques de la région contrôlent l'écoulement de l'eau souterraine. Les formations géologiques permettant une exploitation importante de l'eau souterraine sont nommées des **aquifères**. Dans la région, le roc fracturé est un aquifère exploité régionalement, tandis que l'esker est un aquifère local. Les puits dans la région sont généralement forés jusqu'au roc. Ces puits sont installés avec un tubage de protection au niveau des dépôts meubles et sont des trous ouverts directement dans la partie supérieure du roc fracturé. Les collines à l'est de la région représentent une zone de recharge de l'aquifère rocheux, car elles ne sont pas recouvertes de sédiments imperméables et permettent donc l'infiltration des précipitations ou de l'eau de fonte printanière. L'aquifère de l'esker est aussi rechargé fortement, car il est formé de matériaux très perméables. Ailleurs, dans la plaine argileuse, la présence d'une couche d'argile marine au-dessus du till empêche la recharge de l'aquifère rocheux. Cette condition protège cependant l'aquifère au roc d'une potentielle contamination par des activités de surface, notamment l'usage de fertilisants qui peuvent amener des augmentations des concentrations en nitrates dans l'eau souterraine (Fagnan et coll., 1999; Paradis et coll., 2006). Dans cette région pourtant très agricole, Pontlevoy (2004) a cité la quasi-absence de nitrates dans les eaux souterraines comme évidence de la faible vulnérabilité de l'aquifère rocheux, sauf où il se trouve en contact direct avec l'esker.

Dans cette région, l'écoulement régional de l'eau souterraine dans l'aquifère de roc fracturé se fait à partir des collines à l'est en allant vers l'ouest. L'eau souterraine émerge dans la rivière Châteauguay, qui est localement en contact direct avec l'aquifère de roc fracturé. L'écoulement de

l'eau souterraine dans l'esker se fait plutôt du nord vers le sud et émerge dans la rivière Esturgeon. Dans la région, les principaux milieux récepteurs potentiels de la contamination sont : 1) la rivière Châteauguay, qui est localement en contact avec l'aquifère rocheux; 2) la rivière Esturgeon au sud du site des anciennes lagunes de Mercier, qui est en contact par endroit avec l'esker et, à d'autres, avec l'aquifère rocheux; 3) les puits forés dans le roc.

3.3 Modèle conceptuel des anciennes lagunes de Mercier

Le site des anciennes lagunes de Mercier est situé au sud-est de la ville et on y accède par le rang Sainte-Marguerite (figure 3.3). La figure 3.3 montre l'emplacement approximatif de la *petite lagune*, localisée au nord, et de la *grande lagune*, localisée au sud, qui sont maintenant remblayées. Le bâtiment et les trois puits de l'UTES se trouvent au sud de la zone d'étude locale dans laquelle la majorité des forages et excavations ont été réalisés pour caractériser le site lors de différentes études (voir la section 5.2 de la bibliographie pour les études antérieures). Aux fins de référence, la zone d'étude locale couvre 285 m latéralement sur 525 m longitudinalement. La principale caractérisation du site a été réalisée par le MDDEP en 1995 et 1996 (MENV, 1997), tandis que des travaux récents ont été effectués pour obtenir certaines précisions sur les conditions du site (Leppert Associates Inc., 2006). La figure 3.3 montre la localisation d'une section verticale passant par les anciennes lagunes et allant jusqu'aux puits de l'UTES. Les figures 3.4 (a, b et c) illustrent schématiquement les conditions géologiques du site (figure 3.4a), la distribution de la contamination en LID formant deux zones sources (figure 3.4b) et les panaches de contaminants dissous émis par ces zones sources (figure 3.4c).

La figure 3.4a montre les unités géologiques et les conditions d'écoulement rencontrées au site. Dans l'aquifère régional rocheux, les fractures sont subhorizontales et suivent surtout les plans des anciens lits de roches. Ces fractures horizontales sont reliées entre elles par des fractures verticales. Sur le plan régional, le roc est plus fracturé dans sa partie supérieure (Lavigne et coll., 2005), mais, localement, les évidences de cette condition sont moins claires. L'esker de sable et gravier forme un aquifère local partiellement recouvert par les argiles peu perméables (ces argiles sont présentes autour de l'esker, mais n'apparaissent pas sur les coupes des figures 3.4 qui suivent l'esker). L'esker est séparé du roc par des tills, constitués de matériaux fins et de blocs, qui sont peu perméables et isolent l'écoulement des deux aquifères. Il y a cependant des fenêtres où les tills

sont absents et où il y a des échanges d'eau souterraine entre le roc et l'esker. Dans les conditions naturelles, l'écoulement se faisait de l'esker vers le roc, mais le pompage des puits de l'UTES a inversé la direction de l'écoulement, qui se fait maintenant du roc vers l'esker.

Les anciennes lagunes de Mercier ont contenu des liquides immiscibles sous forme de LIL et de LID. Ces deux types de liquides immiscibles contaminent encore le site, mais c'est le LID qui est grandement responsable de la création de zones sources de contamination de l'eau souterraine. Malgré l'excavation partielle de la grande lagune et son recouvrement en 1980, l'enceinte des lagunes contient toujours un grand volume de sols contaminés par des liquides immiscibles ainsi qu'un grand volume d'eau fortement contaminée. Le LID est formé d'un mélange complexe de très nombreux contaminants organiques, dont une fraction de composés organiques volatils qui sont partiellement solubles dans l'eau et dont la dissolution génère des concentrations excédant les limites de potabilité de l'eau. La figure 3.4b montre la distribution des zones sources de LID. Ces zones sources ont été formées par l'écoulement du LID hors des lagunes qui a contaminé d'abord les sables et graviers de l'esker jusqu'à sa base à 30 m de profondeur ainsi que la partie supérieure du till. L'écoulement du LID s'est poursuivi le long de la pente du till pour atteindre des fenêtres dans le till où l'esker est en contact direct avec le roc. Le LID a donc pu continuer son écoulement dans le réseau de fractures du roc. Du LID piégé dans le réseau de fractures du roc a été détecté jusqu'à une profondeur de 15 m dans le roc. Ce LID constitue une zone source de contamination de l'eau souterraine de l'aquifère rocheux qui est exploité régionalement.

La figure 3.4c montre schématiquement les panaches de contaminants dissous dans l'eau souterraine. Le panache dans l'esker peut être formé par les fuites de l'eau fortement contaminée présentement dans l'enceinte des anciennes lagunes, par le contact d'eau souterraine avec la base des lagunes et les sols contaminés hors des lagunes. Le panache dans le roc est formé par le contact de l'eau souterraine avec le LID présent dans le réseau de fractures. Même si l'écoulement de l'eau souterraine engendre la dissolution d'une partie du LID présent dans les zones sources, ceci représente une infime partie de la masse de LID présente dans ces zones sources. Ces zones sources pourront donc activement contaminer à très long terme l'eau souterraine qui entre en contact avec le LID qui y est présent.

La figure 3.5 montre en plan l'étendue approximative des deux zones sources dans l'esker et le roc ainsi que les contours présumés des panaches émis par ces zones sources. Les travaux de caractérisation précédents n'ont pas nécessairement eu pour objectif de définir précisément les étendues des panaches et des zones sources. Ces informations ne sont donc présentées que schématiquement et pourraient devoir être modifiées en fonction des données fournies par de futures caractérisations. Dans l'esker et le roc fracturé, les panaches de contaminants dissous migrent suivant les directions d'écoulement de l'eau souterraine, pour finalement être captés par les puits de l'UTES. Les puits de l'UTES captent les panaches, de même qu'une grande quantité d'eau souterraine non contaminée, à la fois à partir du roc et de l'esker. La modélisation numérique du système d'écoulement réalisée par Pontlevoy et ses collaborateurs (2004) a démontré, comme toutes les études antérieures, que le pompage à l'UTES permet de contrôler efficacement les panaches dans l'esker et dans le roc. Cette efficacité est confirmée par le suivi de la qualité des eaux souterraines, effectué deux fois par année par le MDDEP.

3.4 Contraintes associées aux contextes du site

Le site des anciennes lagunes de Mercier présente plusieurs contraintes dont il faut tenir compte pour évaluer l'applicabilité des technologies de réhabilitation des zones sources situées dans l'aquifère granulaire et l'aquifère de roc fracturé. Racine (2005) a fait l'inventaire des types de contraintes présentes au site : 1) anthropiques, 2) géologiques, 3) hydrogéologiques, 4) liées à la contamination (tableau 3.1).

Les activités et infrastructures présentes dans la zone d'étude sont des contraintes anthropiques qui peuvent entraver la capacité de mettre en place des technologies de contrôle ou de réhabilitation des zones sources (tableau 3.1). Il faut d'abord tenir compte qu'une zone d'exclusion de pompage dans l'aquifère régional a été délimitée dans la région de Mercier (figure 3.1). La mise en place de nouvelles infrastructures doit aussi tenir compte des autres activités dans le secteur : terrains agricoles adjacents à la zone d'étude qui sont des propriétés privées, terrain de l'incinérateur qui comporte une vingtaine de bâtiments, installations et équipements de l'UTES.

Le contexte géologique du site est relativement complexe et présente plusieurs contraintes qui peuvent influencer la conception ou la localisation d'infrastructures de contrôle ou de

réhabilitation. D'abord, un talus linéaire dans la topographie du roc pourrait représenter une faille dans le roc à cet endroit et jouer un rôle important dans l'écoulement et la migration des contaminants provenant des anciennes lagunes. La nature de cet élément et l'hydraulique du roc en général doivent être mieux caractérisées si de nouvelles installations sont planifiées pour faire du pompage ou de l'injection au niveau du roc.

Dans le nord-ouest de la zone à l'étude, immédiatement sous les lagunes, le till compact possède une épaisseur substantielle d'environ 6 m et plus. La présence de ce till peut servir d'assise à des technologies de traitement ou des infrastructures de confinement. Par contre, la zone source avec du LID s'étend, à l'extrémité sud-est, jusqu'à un endroit où il n'y a plus de till. Cette condition a été révélée plus précisément par la caractérisation complémentaire réalisée en 2005 (Leppert Associates Inc., 2006). L'absence d'une couche imperméable sous la contamination située à une grande profondeur dans l'esker représente une condition très difficile pour l'aménagement d'un mur de confinement qui viserait à isoler la zone source du reste de l'esker ou du roc sous-jacent.

On retrouve une zone dans le site à l'étude où il y a absence ou une faible épaisseur de tills qui crée des contacts directs (fenêtres) entre l'aquifère granulaire et l'aquifère de roc fracturé (figures 3.4a et 3.5). Des échanges d'eau souterraine peuvent se produire à travers ces fenêtres. Ceci fait en sorte que les deux aquifères (esker et roc) ne sont pas indépendants : le pompage ou l'injection d'eau dans un des deux aquifères a un effet sur l'autre. Cette condition représente une contrainte importante pour la conception de systèmes de pompage ou d'injection d'eau dans la zone d'étude. Enfin, le positionnement d'éventuelles infrastructures dans l'esker doit tenir compte de la morphologie de la section d'écoulement, dont l'épaisseur varie de 14 à 22 m et dont la largeur est restreinte par endroits.

Sur le plan hydrogéologique, le fait que les deux aquifères (esker et roc) présentent des conditions d'écoulement différentes, tout en étant interreliés par les fenêtres dans les tills, constitue la contrainte la plus importante à prendre en considération. De plus, si de nouvelles infrastructures sont mises en place, il faudra tenir compte de l'effet du changement ou de l'arrêt du pompage à l'UTES. L'incinérateur utilise aussi un puits pour fournir ses besoins en eau, de sorte qu'il faudra aussi tenir compte de ce pompage fait au niveau du roc. Des variations de débit de pompage

peuvent changer les conditions locales au site de Mercier, mais aussi les conditions d'échange hydraulique entre l'aquifère régional et la rivière Esturgeon (Pontlevoy, 2004). Dans le cas d'une diminution du débit de pompage dans l'aquifère granulaire, il y a une possibilité que les anciennes lagunes soient plus ennoyées après la remontée du niveau d'eau et qu'un plus grand volume d'eau soit mis en contact avec celles-ci. Le volume ou la concentration totale du panache d'eau contaminée de l'aquifère granulaire peuvent ainsi être modifiés.

Les contraintes associées à la contamination sont nombreuses et complexes. Certaines de ces contraintes doivent être précisées par une caractérisation complémentaire ou des observations attentives lors d'une phase pilote d'éventuelles nouvelles infrastructures. Les zones sources dans l'aquifère de l'esker et celui du roc fracturé possèdent une grande variété de contaminants dominés par les liquides organiques lourds et légers. Cette diversité est une contrainte importante pour les techniques de réhabilitation *in situ* des zones sources. Les grandes masses de contaminants et les grands volumes associés sont également des obstacles majeurs tant pour la réhabilitation *in situ* qu'*ex situ* des zones sources. Les propriétés physicochimiques des divers contaminants en présence restreignent également les actions de réhabilitation.

La compréhension de l'étendue de LIL et LID dans les aquifères de l'esker et du roc fracturé dans la zone à l'étude est essentielle à l'applicabilité de technologies de la réhabilitation. Lors de la dernière caractérisation de 2005, quelques puits forés dans les aquifères de l'esker et du roc fracturé ont permis de recueillir des données supplémentaires pour établir l'étendue des zones sources (Leppert Associates Inc., 2006). Dans l'aquifère de l'esker, à 30 m de profondeur, du LID a été retrouvé dans un puits situé en aval de la zone source délimitée par la caractérisation de 1995-1996. Une accumulation de LID est présente en aval de la zone source, à la base de l'aquifère granulaire, dans une dépression à la surface du till. Bien que l'émission de contaminants dans l'eau souterraine de cette accumulation de LID soit possiblement plus faible que celle de la zone source, sa présence doit être considérée dans l'application de stratégies de réhabilitation.

La caractérisation de 2005 (Leppert Associates Inc., 2006) n'a pas eu pour objectif de définir plus précisément l'étendue de la zone source dans l'aquifère de roc fracturé. Les données déjà disponibles permettent cependant de conclure que la zone source avec du LID au roc a une grande

étendue (figure 3.5) et que du LID a été identifié jusqu'à une profondeur de 15 m dans le roc. L'importance de l'étendue et de la profondeur de la zone source contenant du LID dans le roc fracturé constitue une contrainte majeure pour la réhabilitation de cet aquifère.

Les travaux de caractérisation antérieurs n'ont pas eu pour objectif de définir précisément les limites des panaches d'eau contaminée dans les aquifères de l'esker et du roc fracturé. Dans l'aquifère de l'esker, on peut présumer que la géométrie du panache est comparable aux dimensions physiques de l'esker lui-même (figure 3.5). Dans l'aquifère de roc fracturé, la profondeur du panache est considérée comme similaire à l'intervalle où il y a présence de LID dans les puits au roc (jusqu'à 15 m dans le roc). Enfin, il y a un grand volume d'eau fortement contaminée dans l'enceinte des anciennes lagunes. Ce volume d'eau contaminée doit être pris en considération pour évaluer l'applicabilité de stratégies de réhabilitation au niveau de la zone source dans l'esker.

3.5 Conditions contraignant le plus la gestion environnementale du site

Les conditions du site des anciennes lagunes de Mercier qui pourraient contraindre le plus sa gestion environnementale peuvent être résumées comme suit :

- Il faut assurer le contrôle des émissions de deux zones sources présentes dans deux systèmes aquifères (esker et roc) qui sont en interaction. Le pompage de l'eau souterraine ou toute autre mesure changeant les conditions hydrauliques dans un des deux aquifères aura des répercussions sur l'écoulement dans l'autre aquifère. Le contrôle de la migration des panaches de contaminants dissous dans ces deux aquifères doit donc se faire de façon coordonnée, pour éviter qu'une action dans un aquifère n'entraîne la migration de contaminants dissous dans l'autre aquifère;
- L'étendue et la profondeur des zones sources, le grand volume de sol et de roc où du LID est présent ainsi que la diversité des contaminants présents dans le LID posent des défis majeurs à la réhabilitation. L'étendue et la profondeur de LID dans le roc fracturé sont des facteurs particulièrement importants par rapport au potentiel de réhabilitation de ce site, compte tenu de l'inefficacité des techniques existantes de réhabilitation des zones sources de LID dans le roc fracturé (section 2.4);

- Certaines incertitudes demeurent en ce qui concerne les zones sources, particulièrement l'étendue de la zone source au roc qui n'est encore que partiellement définie, de même que la nature de la fracturation du roc et ses propriétés hydrauliques. La caractérisation directe de la présence de LID dans un aquifère rocheux fracturé est une tâche très difficile qui exige le recours à des techniques spécialisées (EPA, 2004);
- Pour ce qui est de la zone source dans l'esker, il y a présence de LID dans les dépôts meubles au sud des lagunes, à 30 m de profondeur et juste à proximité d'une fenêtre au roc. Ceci limite considérablement les options de réhabilitation ou de contrôle dans l'esker :
 - Les techniques de réhabilitation seraient difficilement applicables à cet endroit à cause de la profondeur de la contamination et de la difficulté d'accéder aux contaminants localisés dans une dépression à la base de l'esker;
 - En ce qui concerne le contrôle par confinement physique, la profondeur du LID se trouve à la limite des conditions permettant la mise en place de plusieurs types de murs de confinement. De plus, l'absence d'une couche de till sous le LID ne permettrait pas de confiner la contamination du reste de l'esker ou du roc sous-jacent;
 - Pour ce qui est du contrôle hydraulique, la proximité de la fenêtre fait en sorte qu'il faut s'assurer que le panache émis à cet endroit est contrôlé tant au niveau du roc que de l'esker. Ce panache pourrait en effet migrer dans l'un ou l'autre des aquifères, suivant les échanges d'eau souterraine à travers la fenêtre dans le till, dont la direction est contrôlée notamment par l'importance relative du pompage effectué dans chacun de ces aquifères.

4. Conclusion : approche applicable au site de Mercier

Le chapitre 2 résume les capacités des techniques de réhabilitation des zones sources contenant du LID, tandis que le chapitre 3 décrit le contexte du site des anciennes lagunes de Mercier où deux zones sources de LID sont présentes dans les aquifères de l'esker et du roc fracturé. En conclusion, nous allons définir et recommander l'approche de gestion environnementale qui apparaît la plus appropriée pour le site.

4.1 Approche recommandée pour la gestion du site

Comme mentionné au chapitre 2, deux grandes catégories de mesures s'offrent pour la gestion d'un site comme celui des anciennes lagunes de Mercier. Ces catégories de mesures ne sont pas mutuellement exclusives et peuvent être mises en œuvre en combinaison :

- La première catégorie de mesure est la réhabilitation par l'enlèvement de masse de LID dans les zones sources. En principe, si la réhabilitation pouvait réussir parfaitement, le site n'aurait plus besoin d'autres mesures de gestion environnementale;
- La deuxième catégorie de mesure implique le contrôle de la contamination, sans nécessairement enlever la source de cette contamination. Les deux principaux types de mesures de contrôle sont le confinement physique et le contrôle hydraulique. Lors du confinement, une barrière physique est construite autour de la zone source de contamination et, en général, une membrane est aussi installée au-dessus de la zone source pour minimiser l'infiltration d'eau. Le contrôle hydraulique se fait quant à lui généralement par le pompage et le traitement des panaches d'eau contaminée (comme à l'UTES).

Nous allons discuter de l'applicabilité de ces deux types de mesures de gestion environnementale dans les conditions qui prévalent au site des anciennes lagunes de Mercier.

4.1.1 Potentiel de réhabilitation des zones sources

L'excavation des sols contaminés par du LID dans l'enceinte des anciennes lagunes et dans l'esker a déjà été envisagée comme approche de réhabilitation au site de Mercier. Cependant, les comités d'experts mandatés par le propriétaire du site à l'époque, Laidlaw (Mercier Remediation Panel, 1993), et le MDDEP (Comité des experts internationaux, 1994) ont tous deux conclu qu'en plus

de poser des défis techniques importants, l'excavation présentait des désavantages sérieux, notamment l'exposition des travailleurs et des résidents du secteur aux contaminants. De plus, cette approche ne pourrait sans doute pas retirer tout le sol contaminé par du LID dans l'esker, particulièrement à de grandes profondeurs, et ne réhabiliterait pas du tout la zone source de LID dans le roc fracturé. Enfin, l'excavation ne ferait que transférer les sols contaminés à une autre localisation où ces sols devraient être enfouis dans un site sécurisé. Ces avis d'experts et les autres témoignages entendus lors de ses audiences ont amené le BAPE (1994) à ne pas soutenir l'excavation en tant qu'approche applicable au site de Mercier. Puisque les conditions ayant mené à ces conclusions sur l'applicabilité de l'excavation sont encore valides aujourd'hui, cette technologie n'est pas discutée dans le présent rapport.

Nous avons vu au chapitre 2 qu'aucune zone source de LID dans le roc fracturé n'avait pu être réhabilitée avec succès en Amérique du Nord. Compte tenu des capacités technologiques actuelles, ceci implique que la zone source de LID dans le roc au site des anciennes lagunes de Mercier ne pourrait pas être réhabilitée. Il faudra donc continuer à mettre en œuvre des mesures de contrôle de la migration du panache de contaminants dissous émis par la zone source au roc et les maintenir à très long terme. Il est donc acquis que des mesures de contrôle devront être maintenues au moins pour l'aquifère au roc au site des anciennes lagunes de Mercier.

La contamination au roc à Mercier est analogue à celle du site de Smithville, en Ontario, où du LID (incluant du BPC) forme une zone source dans le roc fracturé. Un long processus de caractérisation et de sélection des approches possibles a été suivi pour le site de Smithville, incluant l'évaluation détaillée de toutes les techniques disponibles de réhabilitation des zones sources (Golder, 2002). Après avoir fait cette évaluation, c'est un système de pompage et traitement qui a été retenu pour faire le contrôle du panache de contaminants dissous émis par cette zone source. Racine (2005) a suivi la démarche définie par Golder (2002) dans ses travaux qui ont porté sur la sélection de méthodes applicables au contrôle du site de Mercier.

La zone source de LID dans l'esker se retrouve à l'intérieur et à l'extérieur de l'enceinte des anciennes lagunes. Comme nous l'avons vu au chapitre 2, pour ce type de contamination dans les dépôts meubles, la réhabilitation *in situ* peut tout au plus permettre l'enlèvement de 70 % à 80 %

de la masse de contaminants dans la zone source dans des conditions favorables. Compte tenu de la grande complexité de la zone source de LID dans les dépôts meubles à Mercier, on peut même douter que les technologies actuelles puissent atteindre un taux d'enlèvement aussi important. Cependant, même si un enlèvement de 70 % à 80 % de la masse pouvait être fait, cet enlèvement de masse ne permettrait pas à la qualité de l'eau souterraine qui entre en contact avec les LID encore présents dans la zone source de respecter les critères environnementaux (Geosyntec, 2004; McGuire et coll., 2006).

Conséquemment, même si la réhabilitation des contaminants de la zone source dans l'esker était tentée, il faudrait encore maintenir des mesures de contrôle à long terme dans l'esker. Les coûts importants impliqués dans une telle réhabilitation ne se traduiraient donc pas en avantages concrets pour la gestion environnementale du site. Malheureusement, cette situation est normale pour une zone source de LID comme celle présente dans les dépôts meubles à Mercier. En effet, tout en favorisant les tentatives de réhabilitation des zones sources de LID dans les dépôts meubles, l'IRTC (2004) reconnaît que le contrôle à long terme restera une stratégie fonctionnelle et efficace pour la majorité des sites complexes contaminés par du LID.

Considérant que des mesures de contrôle devraient être maintenues après des travaux de réhabilitation des zones sources de LID, tant pour la zone source au roc que celle dans l'esker, à moyen terme nous ne pouvons pas recommander la réhabilitation des zones sources de LID pour le site des anciennes lagunes de Mercier. Pour ce qui est du roc, aucun essai de réhabilitation de zone source de LID dans le roc fracturé n'a été un succès jusqu'à maintenant. En ce qui concerne l'esker, le succès de la réhabilitation est très incertain compte tenu de la complexité du site. Selon l'IRTC (2004), il serait aussi très difficile d'évaluer la performance même de l'enlèvement de masse dans la zone source dans les dépôts meubles comme ceux de l'esker. Présentement, l'état des connaissances ne permet pas non plus de prévoir l'amélioration de la qualité d'eau qui découlerait d'une telle réhabilitation.

4.1.2 Contrôle des panaches dissous émis par les zones sources

Le contrôle de la zone source de LID au roc devra être maintenu à très long terme. Sans présumer de la nature de ces mesures de contrôle, il est prévisible qu'elles soient constituées d'un système

de pompage et traitement qui est normalement bien adapté à des situations complexes avec des zones sources mal définies. Comme mentionné, c'est le type de mesure qui a été retenu au site de Smithville, en Ontario, pour contrôler les émissions de contaminants dissous à partir d'une zone source de LID dans le roc fracturé (Golder, 2002). Il est toutefois envisageable que des améliorations des conditions de contrôle hydraulique puissent être faites, notamment pour minimiser le volume d'eau contaminée pompée qui devra être traité. Il est très difficilement envisageable qu'un confinement physique de la zone source de LID au roc puisse être mis en œuvre puisque l'imperméabilisation d'un tel milieu est problématique et que la zone source au roc s'étend jusqu'aux fenêtres dans le till qu'il serait impraticable d'imperméabiliser.

Pour la zone source dans l'esker, les deux approches générales de contrôle apparaissent envisageables a priori : confinement physique ou contrôle hydraulique. Cependant, pour que le confinement soit applicable, il faudrait que les profondeurs des sédiments contaminés à confiner n'excèdent pas les capacités technologiques et surtout qu'il y ait une assise imperméable (le till) avec une épaisseur suffisante sous les sols contaminés pour assurer un confinement adéquat. Une caractérisation récente a mis en évidence le prolongement de la zone source de LID dans l'esker jusqu'à la fenêtre dans le till (Leppert Associates Inc., 2006). Ceci permet de douter de la capacité d'appliquer le confinement à l'ensemble de la zone source dans l'esker. Même si un confinement était fait, il faudrait aussi s'assurer que le système ne permet pas aux contaminants de fuir l'enceinte en pompant à l'intérieur, ce qui impliquerait des coûts importants.

Le contrôle hydraulique du panache dans l'esker a déjà été prouvé efficace par le système actuel de l'UTES. On peut donc présumer que ce système ou une configuration améliorée pourrait assurer le contrôle efficace du panache dans l'esker. Des systèmes de contrôle passifs *in situ* ont été appliqués à des sites en mettant en place des murs réactifs. Ces systèmes représentent donc des solutions de rechange au pompage et traitement à d'autres sites. Cependant, au site de Mercier, environ 50 % des contaminants présents dans le panache ne seraient pas dégradés par les murs réactifs conventionnels constitués de fer monovalent (EnviroMetal Technologies Inc., s.d.). De tels murs réactifs ne permettraient donc pas de remplacer un système de pompage et traitement au site de Mercier.

En résumé, à moyen terme, nous ne pouvons pas recommander d'effectuer des travaux de réhabilitation des zones sources de LID au site des anciennes lagunes de Mercier, considérant l'efficacité mitigée qu'auraient les technologies de réhabilitation à ce site et la nécessité de maintenir par la suite des mesures de contrôle similaires à celles actuellement en place. Lors du remplacement de l'UTES, la recommandation est donc faite de mettre en œuvre des mesures de contrôle des zones sources dans l'esker et dans le roc. De telles mesures de contrôle devront être maintenues pendant plusieurs décennies. La conception d'un système de contrôle optimal nécessitera de bien tenir compte des conditions complexes du site et de procéder à des caractérisations complémentaires ciblées répondant aux besoins particuliers de la conception. Un tel nouveau système de contrôle devra aussi être mis en place progressivement, en incluant une phase pilote, et faire l'objet d'un suivi de performance approprié.

5. Bibliographie

Note : Pour faciliter leur recherche, les documents présentés dans la liste des références citées peuvent aussi se retrouver dans les références sur le site de Mercier et dans la liste des publications de l'auteur qui ont un lien avec le site de Mercier (voir annexe).

5.1 Références citées

- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API), 2006. *Downward solute plume migration: Assessment, significance, and implications for characterization and monitoring of “diving plumes”*. API Soil and Groundwater Technical Task Force, Bulletin 24, 29 p.
- BAPE, 1994. *Restauration du lieu contaminé de Mercier*. Bureau d’audiences publiques sur l’environnement, Rapport d’enquête et d’audience publique n° 85, 222 p.
- COHEN, R.M., ET J.W. MERCER, 1993. *DNAPL Site Evaluation*. C.K. Smoley, CRC Press, Boca Raton, Floride, États-Unis.
- COMITÉ DES EXPERTS INTERNATIONAUX, 1994. *Un cadre conceptuel pour la restauration de la contamination du site de Mercier*. Préparé pour le ministère de l’Environnement et de la Faune du Québec.
- CÔTÉ, M.-J., ET COLL., 2006. *Atlas du bassin versant de la rivière Châteauguay – Territoire, Eau souterraine, Aménagement*. Ministère du Développement durable, de l’Environnement et des Parcs, Québec, 57 p.
- ENVIROMETAL TECHNOLOGIES INC., s.d. Site Internet, <http://www.eti.ca/>.
- EPA, 1999a. *Monitored Natural Attenuation of Petroleum Hydrocarbons*. United States Environmental Protection Agency Remedial Technology Fact Sheet, EPA/600/F-98/021, 3 p.
- EPA, 1999b. *Monitored Natural Attenuation of Chlorinated Solvents*. United States Environmental Protection Agency Remedial Technology Fact Sheet, EPA/600/F-98/022, 3 p.
- EPA, 2003. *The DNAPL Remediation Challenge: Is There a Case for Source Depletion?* United States Environmental Protection Agency, 600/R-03/143, 112 p.
- EPA, 2004. *Site Characterization Technologies for DNAPL Investigations*. United States Environmental Protection Agency, 542-R-04-017, 105 p. et annexes.
- FAGNAN, N., ET COLL., 1999. « Hydrogéologie des complexes deltaïques sur la marge nord de la mer de Champlain ». *Hydrogéologie*, n° 4, p. 9-22.
- FREEZE, R.A., 2000. *The Environmental Pendulum – The Quest for the Truth About Toxic Chemicals, Human Health and Environmental Protection*. University of California Press, Berkeley et Los Angeles, Californie, États-Unis, 323 p.
- GEOSYNTEC CONSULTANTS, 2004. *Assessing the Feasibility of DNAPL Source Zone Remediation: Review of Case Studies*. Naval Facility Engineering Command, Contract Report CR-04-002-ENV, 60 p. plus tableaux, figures et annexes.
- GOLDER ASSOCIATES LTD., 2002. *Smithville Phase 4 Bedrock Remediation Program. Recommendation Report and supporting documents for the former CWML Site Smithville, Ontario*. Ministère de l’Environnement de l’Ontario. CD.
- ITRC, 2002. *DNAPL Source Reduction: Facing the Challenge*. The Interstate Technology & Regulatory Council, Dense Non-Aqueous Phase Liquids Team, 20 p. et annexes.

- ITRC, 2003. *An Introduction to Characterizing Sites Contaminated with DNAPLs*. The Interstate Technology & Regulatory Council, Dense Non-Aqueous Phase Liquids Team, 36 p. et annexes.
- ITRC, 2004. *Strategies for Monitoring the Performance of DNAPL Source Zone Remedies*. The Interstate Technology & Regulatory Council, Dense Non-Aqueous Phase Liquids Team, 20 p. et annexes.
- KUEPER, B.H., ET COLL., 2003. *An Illustrated Handbook of DNAPL Transport and Fate in the Subsurface*. R&D Publication 133, Environment Agency, Royaume-Uni, 63 p.
- LAVIGNE, M.-A., ET COLL., 2005. « Hydraulic properties of sedimentary rock aquifers in the Chateauguay River watershed, Quebec, Canada ». *Proceedings, 58th Canadian Geotechnical Conference and 6th Joint CGS/IAH Conference*, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, Session 3E, Paper 550, 8 p.
- LEFEBVRE, R., 2006. *Écoulement multiphase en milieux poreux*. Notes de cours, INRS-Eau, Terre et Environnement, 371 p. et annexes.
- LEPPERT ASSOCIATES, INC., 2006. *Former Mercier Lagoons 2005 Hydrogeological Conceptual Model Site Data*. CD.
- MCGUIRE, T.M., J.M. MCDADE ET C.J. NEWELL, 2006. « Performance of DNAPL Source depletion technologies at 59 chlorinated solvent-impacted sites ». *Groundwater Monitoring & Remediation*, vol. 26, n° 1, p. 73-84.
- MERCIER REMEDIATION PANEL, 1993. *Evaluation of Long-Term Remedial Measures for the Subsurface Contamination Associated with the Former Mercier Lagoons*. Préparé pour les Services Environnementaux Laidlaw (Mercier) Itée.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA FAUNE (MENV), 1997. *Rapport technique, anciennes lagunes de Ville Mercier*. Préparé par le Bureau des enquêtes de Montréal, 18 volumes.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC), 2004. *Contaminants in the Subsurface: Source Zone Assessment and Remediation*. National Research Council, Committee on Source Removal of Contaminants in the Subsurface, The National Academies Press, Washington, D.C., États-Unis, 370 p.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC), 1994. *Alternatives for Ground Water Cleanup*. Committee on Ground Water Cleanup Alternatives, Commission on Geosciences, Environment and Resources, The National Academies Press, Washington, D.C., 315 p.
- PANKOW, J.F., ET J.A. CHERRY, 1996. *Dense Chlorinated Solvents and Other DNAPLs in Groundwater: History, Behavior and Remediation*. Waterloo Press, Portland, Oregon, États-Unis, 525 p.
- PARADIS, D., ET COLL., 2006. « Impact of agricultural activities on nitrate in ground and surface water in the Wilmot Watershed, PEI, Canada ». *Proceedings, 59th Canadian Geotechnical*

Conference and 7th Joint CGS/IAH Conference, Vancouver, Colombie-Britannique, Canada, Paper 244, 8 p.

PONTLEVOY, O., 2004. *Modélisation hydrogéologique pour supporter la gestion du système aquifère de la région de Ville-Mercier*. Mémoire de maîtrise, INRS-Eau, Terre et Environnement.

PONTLEVOY, O., ET COLL., 2002. « Regional groundwater modeling to support aquifer system management in the Ville Mercier area, Quebec, Canada ». *Proceedings, 3rd Joint IAH-CNC*

and CGS Groundwater Specialty Conference, 55th Canadian Geotechnical Conference, Niagara Falls, Ontario, Canada, p. 1151-1158.

RACINE, C., 2005. *Étude des alternatives de contrôle des panaches d'eau souterraine contaminée par des liquides immiscibles denses et légers, Ville-Mercier, Québec, Canada*. Mémoire de maîtrise, INRS-Eau, Terre et Environnement.

Schwille, F., 1988. *Dense Chlorinated Solvents in Porous and Fractured Media: Model Experiments*, traduit de l'allemand par J. F. Pankow, Lewis Publishers, Boca Raton, Floride, États-Unis, 146 p.

5.2 Références sur le site de Mercier

AIT-SSI, L., ET D. ISABEL, 1994. *Modélisation tridimensionnelle par le modèle MODFLOW de l'écoulement des eaux souterraines dans le site de Mercier*. Rapport GREGI-94-01 présenté à TecSult, 11 p. et 16 figures.

AQUATECH, 1995a. *Rapport annuel d'exploitation – Année 1995 – Usine de traitement des eaux souterraines de Ville Mercier – M.E.F.* S. Galarneau et B. Dumont, projet 0530290.

AQUATECH, 1995b. *Ville Mercier – MENVIQ : Filtration des eaux souterraines – 1995*. Rapport sur les volumes traités et le suivi des débits.

AQUATECH, 1994a. *Rapport annuel d'exploitation – Année 1994 – Usine de traitement des eaux souterraines de Ville Mercier – M.E.F.* G. Pelletier et B. Dumont, projet 0530290.

AQUATECH, 1994b. *Ville Mercier – MENVIQ : Filtration des eaux souterraines – 1994*. Rapport sur les volumes traités et le suivi des débits.

AQUATECH, 1993a. *Rapport annuel d'exploitation – Année 1993 – Usine de traitement des eaux souterraines de Ville Mercier – MENVIQ*. G. Pelletier et B. Dumont, projet 0530290.

AQUATECH, 1993b. *Ville Mercier – MENVIQ : Filtration des eaux souterraines – 1993*. Rapport sur les volumes traités et le suivi des débits.

BAPE, 1994. *Restauration du lieu contaminé de Mercier*. Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, Rapport d'enquête et d'audience publique n° 85, 222 p.

BIOGÉNIE, 1995. *Campagne de forage dans la région de Mercier*. Réf. MN5028.

CHAUSSÉ, M., 1994. *Échantillonnage d'eau et d'huile au site des anciennes lagunes de Mercier*. Québec, ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction des politiques du secteur industriel, Service des lieux contaminés, dossier 5124-06-01-60301.

CNFS, 1991. *Caractérisation exhaustive du site de Ville Mercier*. Compagnie nationale de forage et de sondage. Rapport final, préparé pour le ministère de l'Environnement du Québec.

CNFS, 1993. *Caractérisation exhaustive du panache de contamination des anciennes lagunes de Ville Mercier, volumes 1-5*. Compagnie nationale de forage et de sondage. Préparé pour le ministère de l'Environnement du Québec.

- COMITÉ DES EXPERTS INTERNATIONAUX, 1994. *Un cadre conceptuel pour la restauration de la contamination du site de Mercier*. Préparé pour le ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec.
- DDH, 1992. *Caractérisation supplémentaire, secteurs des anciennes lagunes de Ville Mercier*. D'Aragnon, Desbiens, Halde. Préparé pour le ministère de l'Environnement du Québec.
- DENIS, C., 1991. *Caractérisation hydrogéologique du substratum rocheux fracturé du site pollué de Ville Mercier*. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi.
- FORATEK INTERNATIONAL INC., 1987. *Tricil – Programme de forages*. Rapport 857, projet 87014, 12 p. et annexes.
- FORATEK INTERNATIONAL INC., 1984. *Projet MENVIQ – Mercier, rapport technique relatif à l'aménagement des ouvrages de captage et d'observation de la nappe aquifère contaminée de Ville Mercier*. Projet FFH P3018, rapport n° 619.
- FORATEK INTERNATIONAL INC., 1982. *Étude hydrogéologique de faisabilité du captage des eaux contaminées extraites de la nappe aquifère de Ville Mercier*. Rapport préparé par M. Poulin pour le ministère de l'Environnement du Québec, projet FF681037, rapport n° 514, 47 p.
- GÉLINAS, P., D. ISABEL ET A. ROULEAU, 1989. *Aquifer decontamination for toxic organics: the case of Mercier, Québec*. Contract KE405-8-6001/01-SS, Université Laval et Université du Québec à Chicoutimi.
- GÉLINAS, P., ET COLL., 1993. *Aquifer decontamination for toxic organics : the case of Mercier, Quebec*. Rapport final présenté à Environnement Canada, Wastewater Technology Center.
- GLOBENSKY, Y., 1986. *Géologie de la région de St-Chrysostome et de Lachine*. Rapport MM 84-02, ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec.
- GOLDER ASSOCIÉS LTÉE, 1995. *Programme d'échantillonnage de liquide en phase non aqueuse (LNAPL), Hiver 1995, Ville Mercier*. Rapport présenté à Laidlaw Services Environnementaux ltée, Réf. MN 5028.
- HYDROGÉO CANADA INC., 1978. *Sondages de reconnaissance et expertise hydrogéologique*. Rapport préparé pour Tricil, contrat 2848, 13 p.
- LAPIERRE, C., 1995. *Travaux d'excavation réalisés le 12 mai 1994 au site des anciennes lagunes de Mercier*. Québec, ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction des politiques du secteur industriel, Service des lieux contaminés, dossier 5124-06-01-60301.
- LASALLE, P., 1980. *Les sédiments meubles de la région Saint-Jean–Lachine*. Rapport DPV-780, ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Direction de la géologie.
- LEPPERT ASSOCIATES, INC., 2006. *Former Mercier Lagoons 2005 Hydrogeological Conceptual Model Site Data*. CD.
- MCCORMACK, R., 1981. *Étude hydrogéologique – Bassin versant de la Châteauguay*. Ministère de l'Environnement du Québec, rapport E.F.-2.

- MERCIER REMEDIATION PANEL, 1993. *Evaluation of Long-Term Remedial Measures for the Subsurface Contamination Associated with the Former Mercier Lagoons*. Préparé pour les Services Environnementaux Laidlaw (Mercier) Itée.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA FAUNE (MENV), 1997. *Rapport technique, anciennes lagunes de Ville Mercier*. Préparé par le Bureau des enquêtes de Montréal, 18 volumes.
- QUIRION, F., 1996. *Rapport d'analyse, contaminants industriels inorganiques*. INRS-Énergie et matériaux, rapport préparé pour la Direction des laboratoires, ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec.

Tableaux

Tableau 3.1. Composantes du contexte régional des anciennes lagunes de Mercier
(Voir la figure 3.2 pour une illustration du contexte régional)

	Rivière Châteauguay	Plaine argileuse	Esker	Puits	Collines
Principales caractéristiques de la composante	La rivière a érodé les dépôts meubles et est en contact direct avec le roc par endroits	Topographie plane et épaisse couche d'argile reposant sur le till	Accumulation de sable et gravier partiellement enfouie sous l'argile et en contact avec le roc par endroits	Tubages de protection à travers les dépôts meubles et trous ouverts dans la partie supérieure du roc fracturé	Les hauts topographiques sont recouverts de till qui peut être remanié par endroits
Rôle de la composante dans le système d'écoulement	La rivière draine l'eau souterraine provenant de l'écoulement dans l'aquifère rocheux fracturé	La couche d'argile (et le till) protège l'aquifère au roc, mais empêche la recharge par infiltration des précipitations	Recharge directe par l'infiltration d'une partie des précipitations et échanges avec l'aquifère au roc où l'esker est en contact	Exploitent l'aquifère rocheux fracturé en interceptant des fractures ouvertes reliées au réseau d'écoulement	Zones préférentielles de recharge de l'aquifère au roc par l'infiltration d'une partie des précipitations

Tableau 3.2. Synthèse des contraintes du site des anciennes lagunes de Mercier
(D'après Racine, 2005)

Type de contrainte	Description
Anthropique	<ul style="list-style-type: none"> • Les zones d'exploitation de l'eau souterraine réglementées par le MDDEP • Les terrains agricoles adjacents • Les propriétés privées situées dans la zone d'étude autres que les propriétés appartenant au gouvernement • L'enceinte des infrastructures de l'incinérateur • L'usine de traitement des eaux souterraines (UTES) • Les trois puits du MDDEP reliés à l'UTES
Géologique	<ul style="list-style-type: none"> • Le talus dans la topographie du roc (faille possible) et la fracturation du roc et ses propriétés hydrauliques • L'épaisseur de till compact • Les contacts directs entre les aquifères granulaire et de roc fracturé à travers les fenêtres dans les tills • La morphologie de la section d'écoulement dans l'aquifère granulaire
Hydrogéologique	<ul style="list-style-type: none"> • Les patrons d'écoulement propres aux deux aquifères • Le pompage au puits au roc de l'incinérateur • Les infrastructures de pompage de l'UTES et les variations de débit
Liée à la contamination	<ul style="list-style-type: none"> • La spécificité des zones sources dans les aquifères granulaire et de roc fracturé et les types de contaminants présents • L'étendue des liquides immiscibles denses (LID) et légers (LIL) dans les aquifères granulaire et de roc fracturé • La présence d'une accumulation de LID en aval de la zone source dans l'aquifère granulaire • Les panaches d'eau contaminée dans les aquifères granulaire et de roc fracturé • Les changements d'émission des zones sources dans l'aquifère granulaire en fonction des conditions d'écoulement • Le grand volume d'eau contaminée emmagasiné dans les anciennes lagunes

Figures

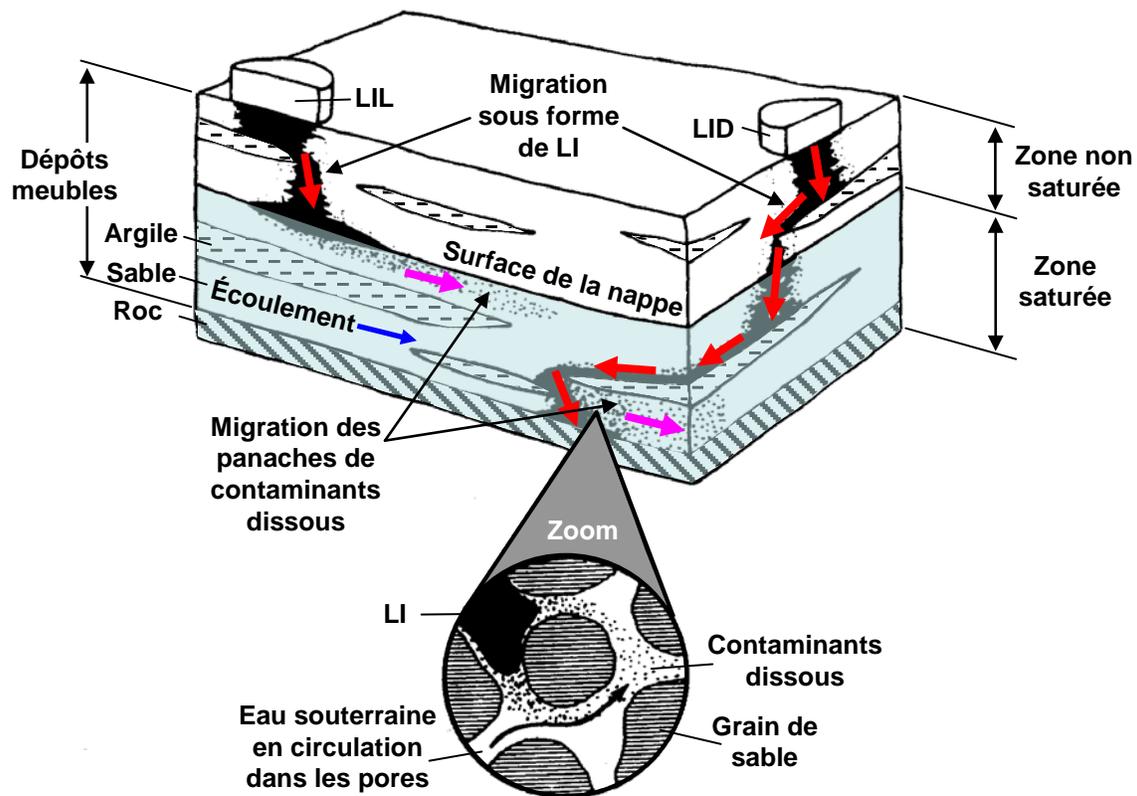


Figure 2.1. Modèle conceptuel de migration de LIL et de LID dans les aquifères granulaires (Modifié de Pankow et Cherry, 1996)

La migration sous forme de LI se fait vers le bas dans la zone non saturée par son écoulement à travers les sols perméables (comme le sable). Les lentilles de sols peu perméables (comme l'argile) font dévier le cheminement du LI. L'écoulement du LIL en profondeur cesse lorsque la surface de la nappe est atteinte, car le LIL flotte sur l'eau. L'écoulement de LID se poursuit dans la nappe tant qu'une surface de faible perméabilité n'est pas rencontrée. Partout où du LI s'est écoulé, du LI résiduel reste piégé dans le sol. Le contact de l'eau qui s'infiltré dans le sol ou de l'eau souterraine avec du LI a pour effet de dissoudre une partie des contaminants organiques formant le LI. Il en résulte un panache de contaminants dissous qui migre suivant l'écoulement de l'eau souterraine.

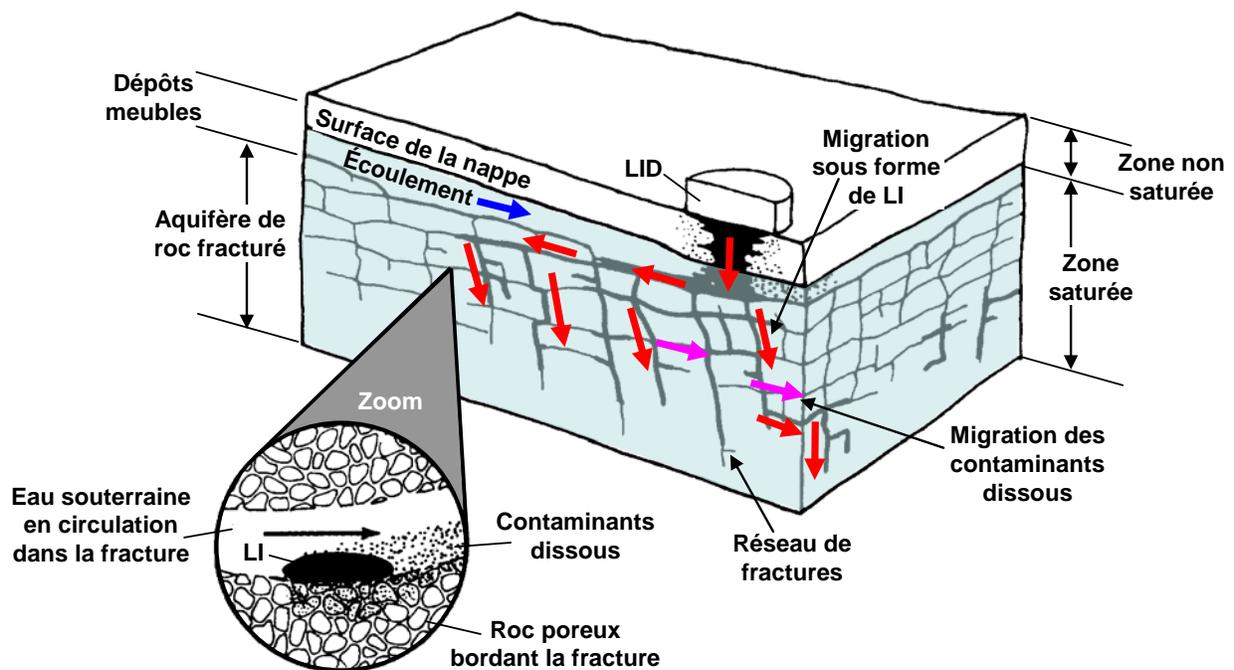


Figure 2.2. Modèle conceptuel de migration de LID dans les aquifères fracturés
(Modifié de Pankow et Cherry, 1996)

Dans le roc fracturé, la migration sous forme de LID se fait généralement par son écoulement vers le bas, mais le LID doit suivre le réseau de fractures ouvertes, ce qui mène à un cheminement complexe du LID dans le roc fracturé. L'écoulement de LID se poursuit dans le réseau fracturé tant qu'il y a suffisamment de LID à migrer et que le réseau de fractures ouvertes se poursuit. L'intensité de la fracturation diminue souvent avec la profondeur. Partout où du LID s'est écoulé dans les fractures, du LID résiduel reste piégé. Le contact de l'eau souterraine avec du LID a pour effet de dissoudre une partie des contaminants organiques du LID pour former un panache de contaminants dissous qui migre avec l'écoulement de l'eau souterraine.

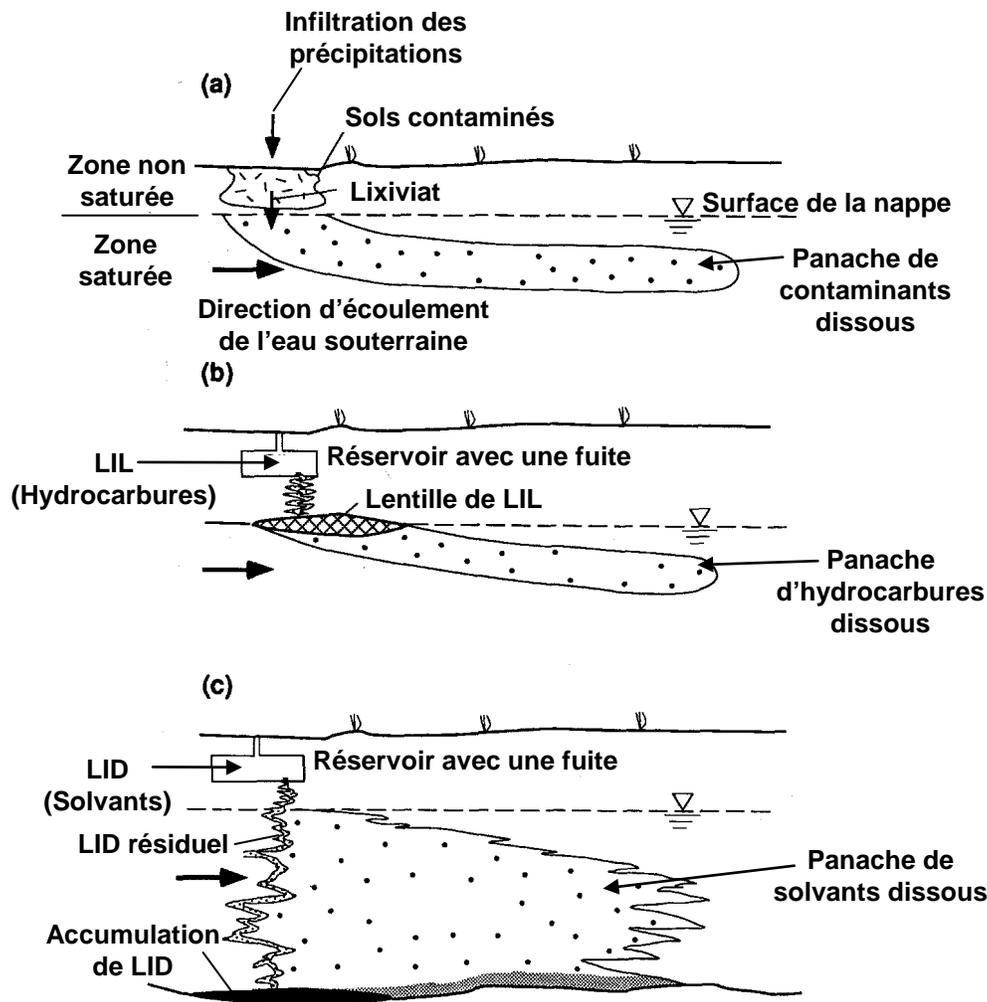


Figure 2.3. Panaches de contaminants dissous émis par différents types de zones sources
 (a) Zone source de déchets sans LI; (b) Zone source de LIL; (c) Zone source de LID.
 (Modifié de Pankow et Cherry, 1996)

Les panaches de contaminants dissous émis par des zones sources où il n'y a pas présence de liquides immiscibles (a) sont très semblables à ceux émis par les zones sources de LIL (b) : les panaches prennent leur origine à la surface de la nappe à partir de l'eau de pluie ou de fonte qui s'infiltré à travers les zones sources. Ces panaches s'enfoncent progressivement à mesure qu'ils s'éloignent des zones sources à cause de l'apport d'eau non contaminée qui recharge les nappes (API, 2006). Au contraire, les panaches émis par les zones sources où il y a du LID (c) s'étendent généralement sur toute l'épaisseur des aquifères, parce que le LID à la zone source a pu s'écouler de la surface jusqu'à la base de l'aquifère.

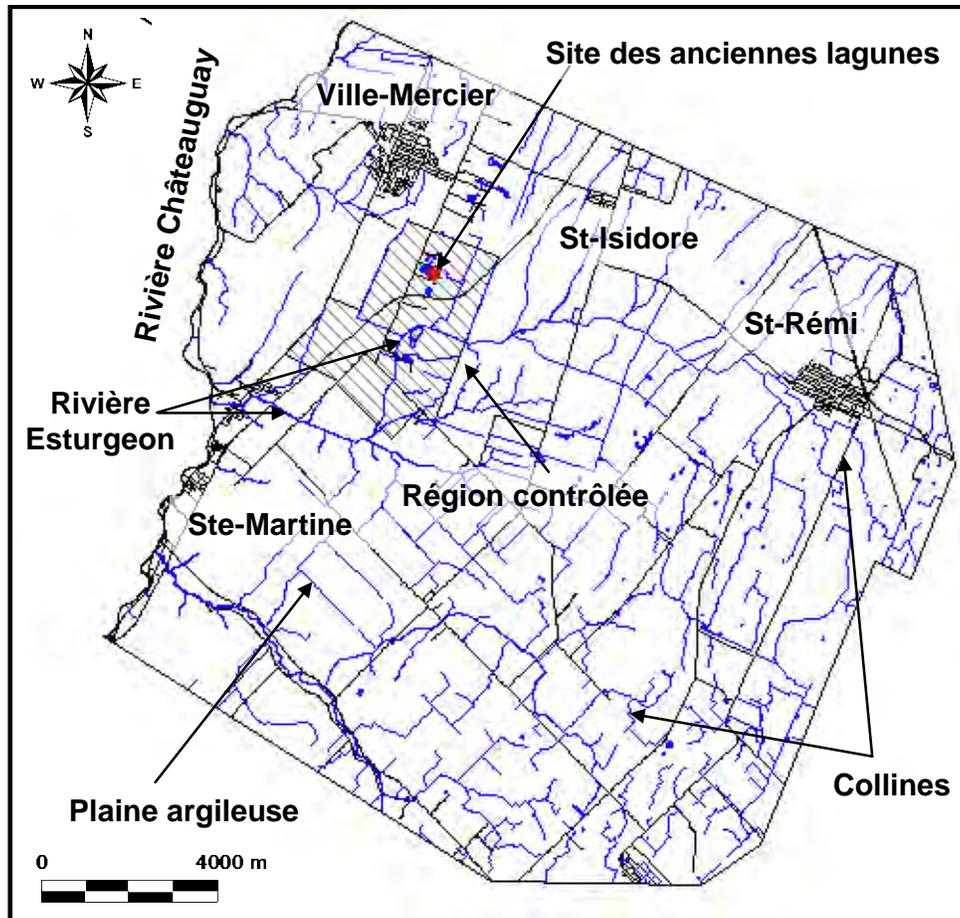


Figure 3.1. Localisation du site des anciennes lagunes de Mercier
(Modifié de Pontlevoy et coll., 2002)

Le site des anciennes lagunes de Mercier est situé au sud-est de cette municipalité. La région a principalement une vocation agricole, surtout maraîchère. La région est bordée à l'ouest par la rivière Châteauguay et à l'est, par des collines correspondant à une ligne de partage des eaux souterraines, c'est-à-dire que l'écoulement de l'eau souterraine à partir de ces collines se fait en partie vers l'est et en partie vers l'ouest et la rivière Châteauguay. Parmi les cours d'eau montrés en bleu, la rivière Esturgeon, citée dans le texte, est un affluent de la Châteauguay. Dans la région, les principaux milieux récepteurs potentiels de la contamination sont : 1) la rivière Châteauguay, qui est localement en contact avec l'aquifère rocheux; 2) la rivière Esturgeon au sud du site des anciennes lagunes de Mercier, qui est en contact par endroit avec l'esker et à d'autres, avec l'aquifère rocheux; 3) les puits forés au roc.

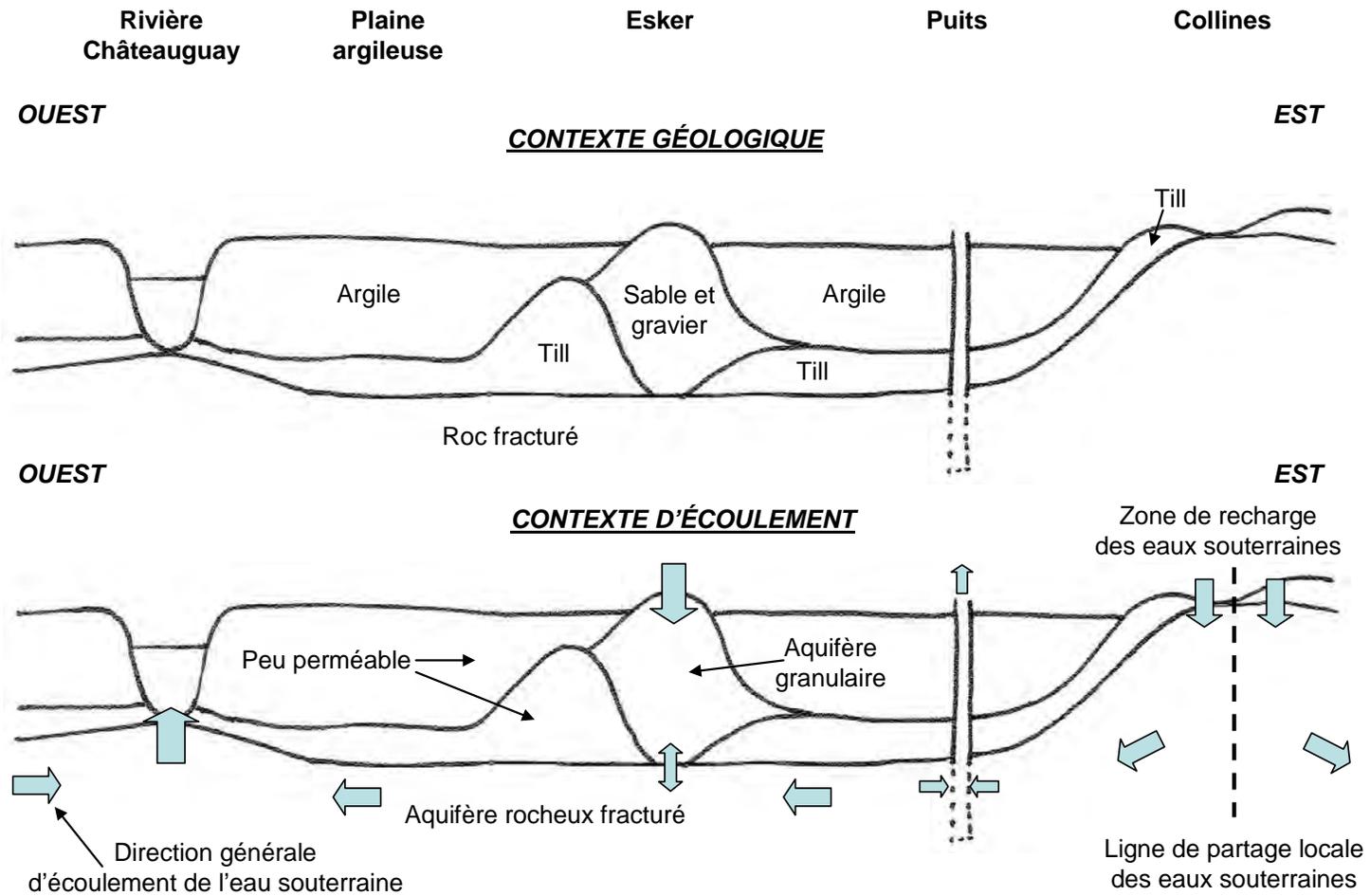


Figure 3.2. Illustration schématique du contexte régional du site des anciennes lagunes de Mercier (Voir le tableau 3.1 résumant les caractéristiques des composantes du contexte régional)

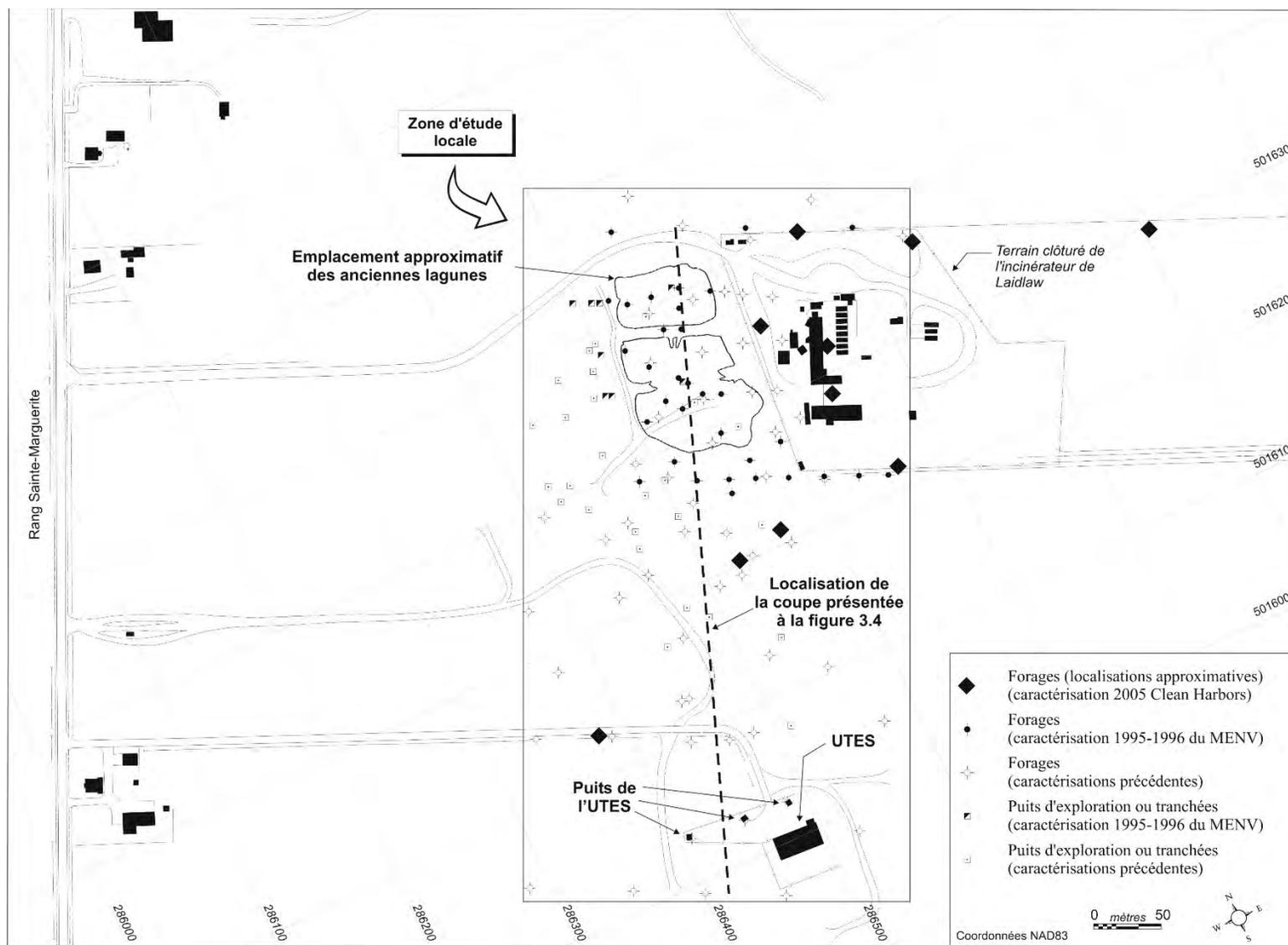


Figure 3.3. Localisation du site des anciennes lagunes de Mercier montrant les principaux forages et tranchées disponibles (Certains des forages réalisés à ce jour n'apparaissent pas sur cette carte.)

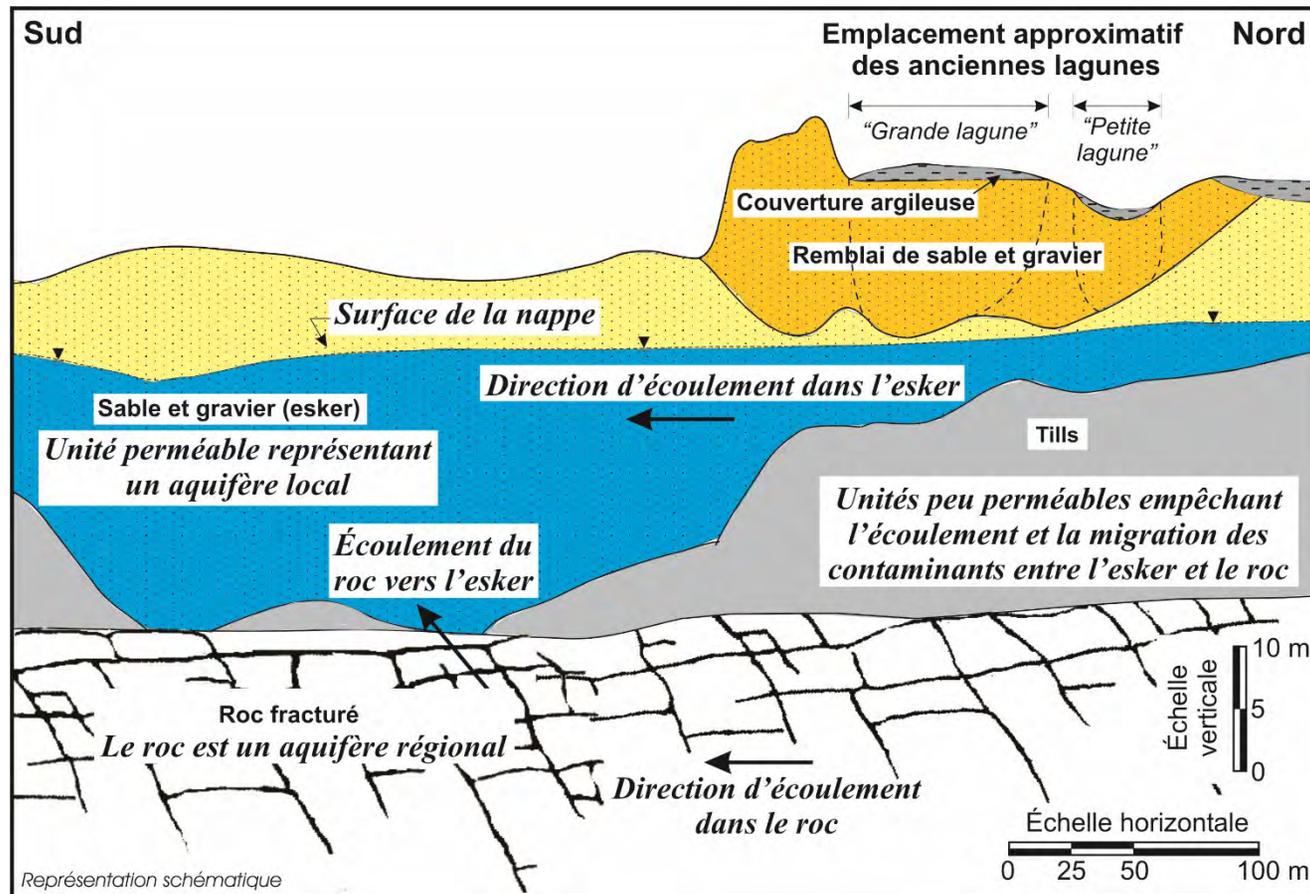


Figure 3.4a. Modèle conceptuel du site des anciennes lagunes de Mercier – Unités géologiques et écoulement

L'esker constitué de sable et gravier ainsi que le roc fracturé représentent deux aquifères. Le till est un matériau peu perméable qui isole les deux aquifères lorsqu'il est présent. Des fenêtres où le till est absent permettent cependant des échanges d'eau souterraine entre les aquifères. Le patron de fracturation du roc illustré schématiquement est plus détaillé que ce que les données disponibles au site permettent de définir.

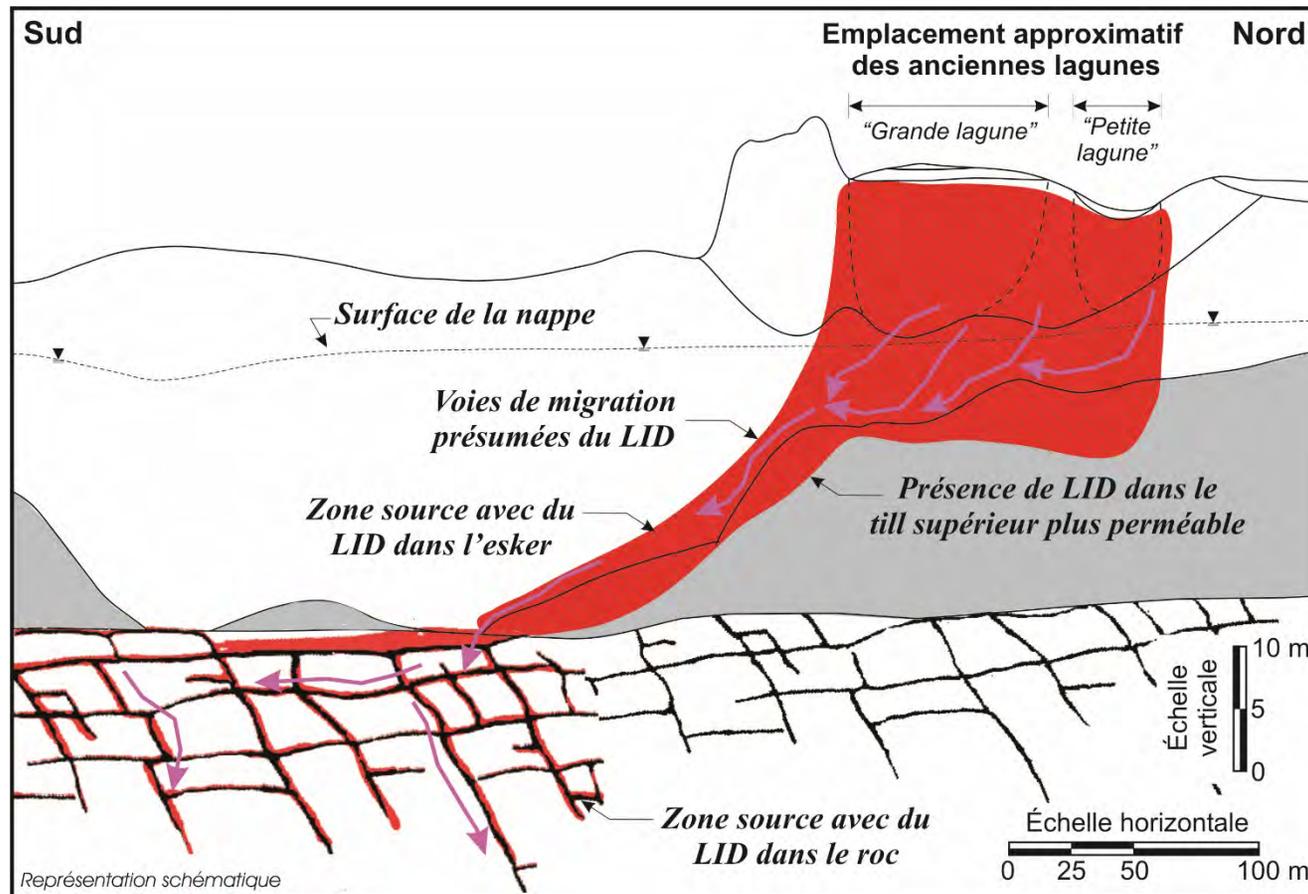


Figure 3.4b. Modèle conceptuel du site des anciennes lagunes de Mercier – Zones sources

Du LID s'est écoulé hors de l'enceinte des anciennes lagunes pour se retrouver dans l'esker. Le LID a suivi la topographie de la surface du till pour s'écouler vers la base de l'esker. Le LID a pu pénétrer dans les fractures du roc à cause de la présence de fenêtres où l'esker est en contact direct avec le roc fracturé. La figure illustre schématiquement la distribution de LID dans le réseau de fractures du roc avec plus de détails que ne le permettent les données disponibles au site.

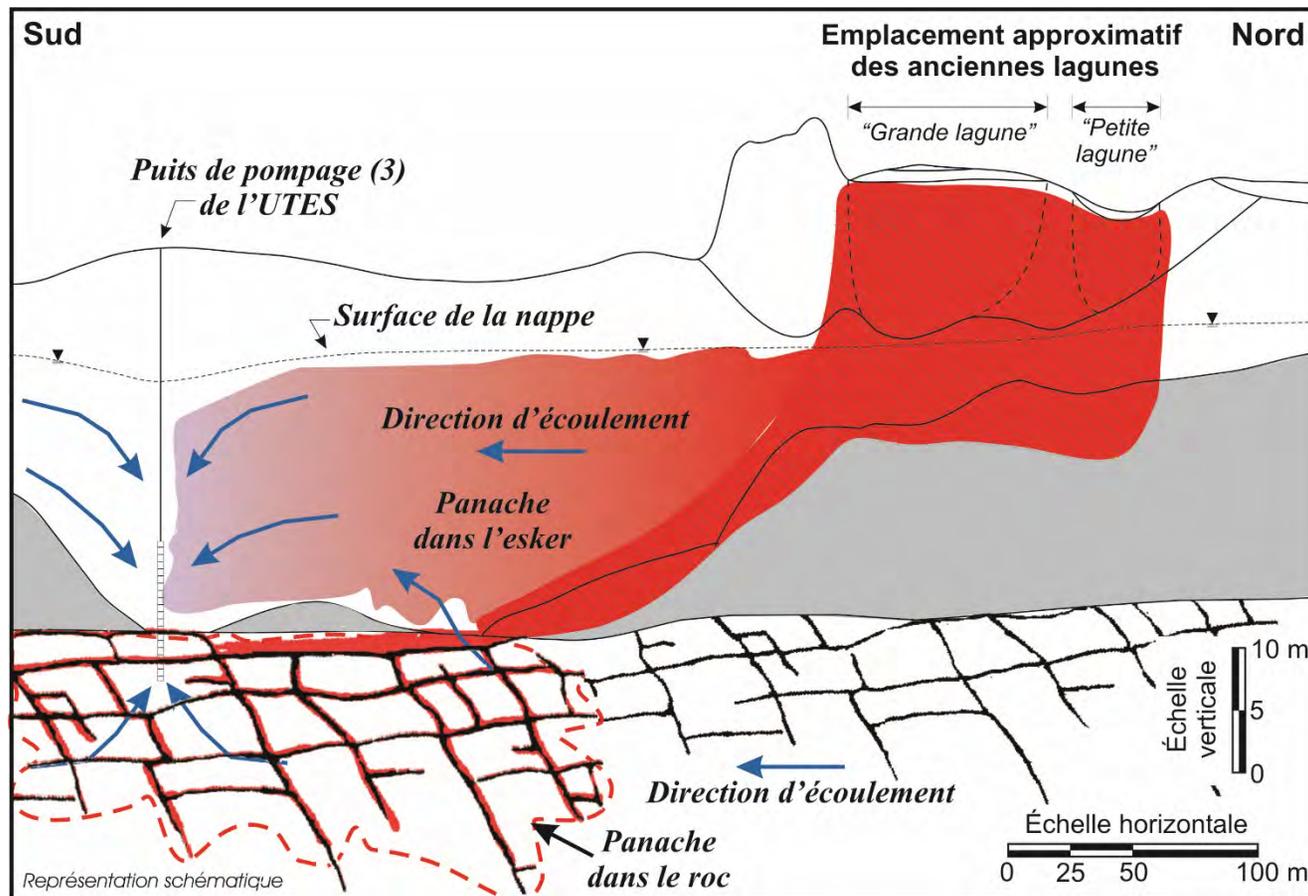


Figure 3.4c. Modèle conceptuel du site des anciennes lagunes de Mercier – Panaches de contaminants dissous et UTES

Le contact de l'eau souterraine avec le LID présent dans les zones sources de l'esker et du roc permet la formation de panaches de contaminants dissous. Ces panaches migrent suivant l'écoulement de l'eau souterraine, mais sont interceptés par les puits de l'UTES qui pompent dans l'esker et le roc. Le panache au roc est restreint à l'eau souterraine présente dans les fractures du roc et la figure illustre schématiquement l'étendue présumée de ce panache au roc par une ligne pointillée.

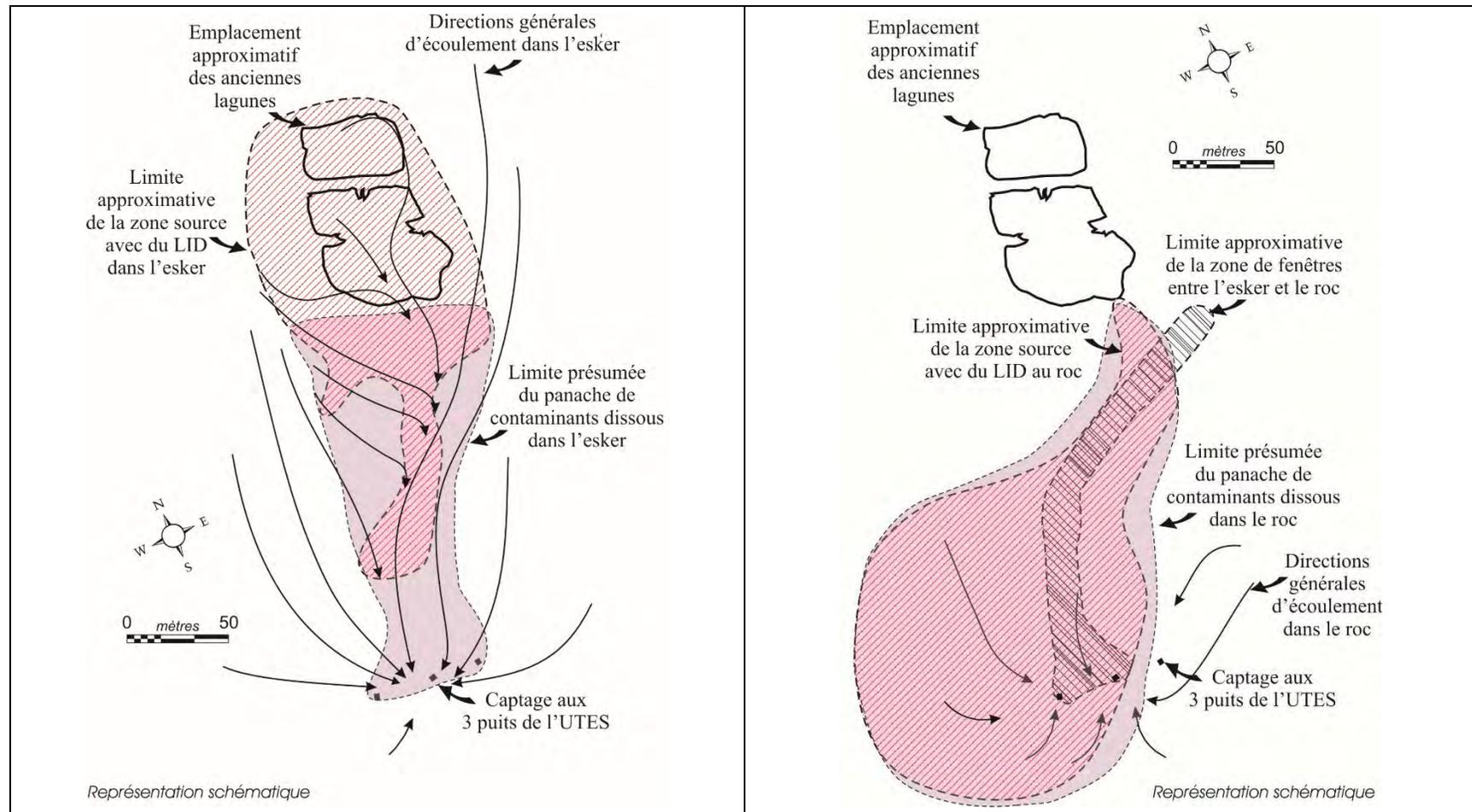


Figure 3.5. Zones sources, panaches et directions générales d'écoulement dans l'esker (à gauche) et dans le roc sous-jacent (à droite)

Le contact de l'eau souterraine avec les zones sources engendre la formation de panaches de contaminants dissous qui migrent suivant l'écoulement de l'eau souterraine. Le pompage aux puits de l'UTES permet l'interception des panaches. La zone de fenêtres où les tills sont de faible épaisseur ou absents permet des échanges d'eau souterraine entre les aquifères de l'esker et du roc fracturé.

Annexe

Travaux antérieurs de l'auteur et connaissance du site

L'auteur du rapport est professeur-chercheur titulaire à l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) et travaille au centre INRS-Eau, Terre et Environnement de Québec depuis 1994. Il est diplômé en génie géologique et a reçu un doctorat de l'Université Laval (Géologie, spécialisation hydrogéologie) ainsi qu'une maîtrise de l'Université de Calgary (Géologie, spécialisation géochimie). Il a travaillé dans l'industrie pétrolière au Canada et aux États-Unis durant sept années. Ceci l'a amené à se spécialiser sur l'écoulement multiphase, sur les processus de transfert (fluides, masse, chaleur) en milieux géologiques poreux et fracturés, ainsi que sur les réactions géochimiques accompagnant ces transferts. Ses travaux sont de nature appliquée et visent la solution de problèmes concrets liés aux ressources en eau souterraine ou à la contamination des sites. En ce qui concerne les ressources en eau, il a été l'initiateur de grands travaux de caractérisation de systèmes aquifères régionaux appliqués au développement de la protection et de la gestion des eaux souterraines. Au chapitre des problèmes de contamination, il considère surtout les questions liées aux liquides organiques immiscibles. Ses recherches impliquent la caractérisation et la modélisation numérique de systèmes d'écoulement locaux et régionaux.

Les travaux de l'auteur en relation avec ce mandat sont résumés dans la liste à la fin de l'annexe. Ces travaux impliquent des études régionales sur l'hydrogéologie des Basses-Laurentides et celle du bassin versant de la rivière Châteauguay, qui présentent des caractéristiques similaires. Le site des anciennes lagunes de Mercier fait partie du bassin de la Châteauguay. Ces travaux ont couvert les questions de distribution des sédiments de surface (Ross et coll., 2005), les propriétés des aquifères (Nastev et coll., 2004a; Lavigne et coll., 2005), l'écoulement de l'eau souterraine (Paradis et coll., 2002; Nastev et coll., 2004b, 2005 et 2006), la recharge des nappes et leur vulnérabilité (Croteau et coll., 2005; Ross et coll., 2004), les aires d'alimentation des puits (Paradis et coll., 2007) ainsi que la qualité de l'eau souterraine (Cloutier et coll., 2004 et 2006; Blanchette et coll., 2005). Dans le bassin de la rivière Châteauguay, l'auteur a encadré trois projets de maîtrise réalisés dans le cadre d'un projet conjoint du MDDEP et de la Commission géologique du Canada (Croteau, 2006; Lavigne, 2006; Blanchette, 2006). L'auteur a fait la promotion de la cartographie hydrogéologique dans un mémoire soumis aux audiences du BAPE sur *La gestion de l'eau au Québec* (Lefebvre et

coll., 1999) et son expertise sur ce sujet est démontrée par sa participation à la rédaction de deux guides à être publiés par le MDDEP sur la cartographie hydrogéologique dans les dépôts meubles (Michaud et coll., sous presse) et dans le roc (Savard et coll., sous presse). Son expertise sur la gestion et la protection des eaux souterraines lui a aussi valu d'être invité à titre de conférencier sur ce sujet (Lefebvre, 2003).

L'auteur a aussi fait des travaux sur les sites contaminés, notamment les sites contenant des liquides immiscibles (Lefebvre et Boutin, 2000), ce qui est le sujet du cours gradué qu'il donne à l'INRS (Lefebvre, 2006). Son expertise à ce sujet a été sollicitée par des sociétés d'experts en environnement et des organismes gouvernementaux. Il a notamment fait des travaux sur la contamination en TCE dans le secteur de Valcartier (Lefebvre et col., 2003), incluant des approches novatrices de caractérisation environnementale (Lefebvre et coll., 2004) et la modélisation numérique de ce système d'écoulement complexe (Boutin et coll., 2004). L'auteur a aussi participé au développement de la technologie de réhabilitation des zones sources de liquides immiscibles par lavage des sols avec des solutions tensioactives et de polymères (Martel, K.E., et coll., 1998; St-Pierre et coll., 2004; Martel et coll., 1998, 1999, 2004 et 2005; Robert et coll., 2006).

M^{me} Cintia Racine, assistante de recherche à l'INRS-ETE, a participé à la réalisation du mandat, notamment pour la revue de littérature sur la réhabilitation des zones sources de LID et pour la description des conditions du site de Mercier. M^{me} Racine a une excellente connaissance de ce site à suite de ses travaux de maîtrise qui ont été pris en considération pour la réalisation du mandat (Racine, 2005). Depuis 1995, l'auteur a fourni une expertise au MDDEP sur le site de Mercier et connaît donc bien le site et les études réalisées antérieurement. Ses propres travaux au site de Mercier ont porté sur le contexte régional (Pontlevoy et coll., 2002), sur la caractérisation réalisée par le MDDEP en 1995 (MENV, 1997), sur la modélisation numérique de l'écoulement et du transport de contaminants au site (Pontlevoy et coll., 2004) ainsi que sur les options de gestion environnementale du site (Racine, 2005). Deux projets de maîtrise directement reliés au site de Mercier ont été encadrés par l'auteur (Pontlevoy, 2004; Racine, 2005).

Liste des publications de l'auteur ayant un lien avec le site de Mercier

- BLANCHETTE, D., 2006. *Caractérisation géochimique des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Châteauguay, Québec, Canada*. Mémoire de maîtrise, INRS-ETE.
- BLANCHETTE, D., ET COLL., 2005. « Hydrochemical assesment of groundwater in the Chateauguay River watershed, Quebec ». *Proceedings, 58th Canadian Geotechnical Conference and 6th Joint CGS/IAH Conference*, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, Session 4E, Paper 555, 8 p.
- BOUTIN, A., ET COLL., 2004. « Modeling of groundwater flow and TCE transport in the Valcartier area aquifer system ». *Proceedings, 57th Canadian Geotechnical Conference and 5th Joint CGS/IAH Conference*, Québec, Québec, Canada, Session 4B, p. 36-43.
- CLOUTIER, V., ET COLL., 2006. « Hydrogeochemistry and groundwater origin of the Basses-Laurentides sedimentary rock aquifer system, St. Lawrence Lowlands, Québec, Canada ». *Hydrogeology Journal*, vol. 14, n^o 4, p. 573-590.
- CLOUTIER, V., R. LEFEBVRE, M. SAVARD ET R. THERRIEN, 2004. « Groundwater origin and geochemical processes in the Basses-Laurentides sedimentary rock aquifer system, St. Lawrence Lowlands, Quebec, Canada ». *Proceedings, 57th Canadian Geotechnical Conference and 5th Joint CGS/IAH Conference*, Québec, Québec, Canada, Session 2B, p. 18-25.
- CROTEAU, A., 2006. *Distribution spatiale et temporelle de la recharge à l'aquifère régional du bassin versant de la rivière Châteauguay*. Mémoire de maîtrise, INRS-ETE.
- CROTEAU, C., ET COLL., 2005. « Estimation of spatial and temporal distribution of recharge to des Anglais aquifer system, Quebec ». *Proceedings, 58th Canadian Geotechnical Conference and 6th Joint CGS/IAH Conference*, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, Session 8E, Paper 610, 8 p.
- LAVIGNE, M.-A., 2006. *Modélisations numériques de l'écoulement régional de l'eau souterraine dans le bassin versant de la rivière Châteauguay*. Mémoire de maîtrise, INRS-ETE.
- LAVIGNE, M.-A., ET COLL., 2005. « Hydraulic properties of sedimentary rock aquifers in the Chateauguay River watershed, Quebec, Canada ». *Proceedings, 58th Canadian Geotechnical Conference and 6th Joint CGS/IAH Conference*, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, Session 3E, Paper 550, 8 p.
- LEFEBVRE, R., 2006. *Écoulement multiphase en milieux poreux*. Notes de cours, 6^e éd., GEO-9602/GLG-65146, programme conjoint Université Laval/INRS, INRS-Eau, Terre et Environnement, 371 p. et annexes.
http://www.ete.inrs.ca/professeur.jsp?page=ReneLefebvre_Enseignement
- LEFEBVRE, R., ET COLL., 2004. Z Characterization of the hydrogeological context and dissolved TCE plume in the granular aquifer system of the Valcartier area, Quebec, Canada ».

Proceedings, 57th Canadian Geotechnical Conference and 5th Joint CGS/IAH Conference, Québec, Québec, Canada, Session 4B, p. 28-35.

LEFEBVRE, R., ET COLL., 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 soumis au ministère de la Défense nationale, rapport de recherche INRS-ETE n° R-631, 99 p., 28 planches et volume d'annexes séparé. http://www.ete.inrs.ca/index.jsp?page=5_1

LEFEBVRE, R., 2003. « Les outils de gestion et de protection des eaux souterraines ». Conférence invitée, Americana 2003, *Sommaire exécutif des conférences*, p. 229 et 235-239.

LEFEBVRE, R., ET A. BOUTIN, 2000. « Evaluation of free LNAPL volume and producibility in soils ». *Proceedings, 1st Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conference, 53rd Canadian Geotechnical Conference*, Montréal, Québec, Canada, p. 143-150.

LEFEBVRE, R., Y. MICHAUD, R. MARTEL, ET N. FAGNAN, 1999. *La cartographie hydrogéologique régionale – Un outil essentiel à l'inventaire des ressources en eaux souterraines.* Mémoire du Centre géoscientifique de Québec présenté au BAPE dans le cadre de la consultation publique sur « La gestion de l'eau au Québec », 22 p. et annexes.

MARTEL, R., ET COLL., 2005. « Polychlorinated biphenyl (PCB) recovery under a building with an in situ technology using micellar solutions ». *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 42, p. 932-948.

MARTEL, R., ET COLL., 2004. « Displacement and sweep efficiencies in a 5-spot pattern DNAPL recovery test using micellar and polymer solutions ». *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 75, n° 1-2, p. 1-29.

MARTEL, R., ET COLL., 1999. « Laboratory and field soil washing experiments with surfactant solutions: NAPL recovery mechanisms ». Dans *Emerging Technologies for Hazardous Waste Management VIII*, Amer. Chemical Soc., Plenum Publ. Corp., New York, NY, États-Unis.

MARTEL, R., R. LEFEBVRE ET P.J. GÉLINAS, 1998. « Aquifer washing by micellar solutions: 2. DNAPL recovery mechanisms for an optimized alcohol-surfactant-solvent solution ». *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 30, p. 1-31.

MARTEL, K.E., R. MARTEL, R. LEFEBVRE ET P. GÉLINAS, 1998. « Laboratory study of polymer solutions used for mobility control during *in situ* NAPL recovery ». *Groundwater Monitoring & Remediation*, vol. 18, n° 3, p. 103-113.

MICHAUD, Y., R. LEFEBVRE ET R. MACCORMACK, éditeurs, sous presse. *Guide méthodologique pour la cartographie hydrogéologique régionale des aquifères granulaires.* Guide

méthodologique produit par le Centre géoscientifique de Québec publié électroniquement par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec.

NASTEV, M., R. LEFEBVRE, A. RIVERA ET R. MARTEL, 2006. « Quantitative assessment of regional rock aquifers, south-western Quebec, Canada ». *Water Resources Management*, vol. 20, n° 1, p. 1-18.

NASTEV, M., ET COLL., 2005. « Numerical simulation of groundwater flow in regional rock aquifers, southwestern Quebec, Canada ». *Hydrogeology Journal*, vol. 13, n° 5-6, p. 835-848.

NASTEV, M., ET COLL., 2004a. « Hydraulic properties and scale effects investigation in regional rock aquifers, south-western Quebec, Canada ». *Hydrogeology Journal*, vol. 12, p. 257-269.

NASTEV, M., ET COLL., 2004b. « Hydrogeology of the transboundary aquifers in the Châteauguay River basin, Canada-United States ». *Proceedings, 2004 U.S. EPA / NGWA Fractured Rock Conference*, Portland, Maine, États-Unis, (CD version), p. 483-486.

PARADIS, D., ET COLL., 2007. « Comparative study of methods for wellhead protection area delineation ». *Ground Water*, vol. 45, n° 2, p. 158-167.

PARADIS, D., M.M. SAVARD, M. NASTEV ET R. LEFEBVRE, éditeurs, 2002. *Atlas hydrogéologique du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec. Partie III des livrables*. Commission géologique du Canada, atlas remis le 15 mai 2002 au Conseil de développement des Laurentides et aux MRC d'Argenteuil, de Deux-Montagnes, de Mirabel et de Thérèse-de-Blainville, et à Développement économique du Canada, 48 p.

PONTLEVOY, O., 2004. *Modélisation hydrogéologique pour supporter la gestion du système aquifère de la région de Ville-Mercier*. Mémoire de maîtrise, INRS-ETE.

PONTLEVOY, O., ET COLL., 2004. « Numerical modeling of groundwater flow in interconnected granular and rock aquifers at the Ville Mercier DNAPL-contaminated site, Quebec, Canada ». *Proceedings, 57th Canadian Geotechnical Conference and 5th Joint CGS/IAHb Conference*, Québec, Québec, Canada, Session 4B, p. 20-27.

PONTLEVOY, O., ET COLL., 2002. « Regional groundwater modeling to support aquifer system management in the Ville Mercier area, Quebec, Canada ». *Proceedings, 3rd Joint IAH-CNC*

and CGS Groundwater Specialty Conference, 55th Canadian Geotechnical Conference, Niagara Falls, Ontario, Canada, p. 1151-1158.

RACINE, C., 2005. *Étude des alternatives de contrôle des panaches d'eau souterraine contaminée par des liquides immiscibles denses et légers, Ville-Mercier, Québec, Canada*. Mémoire de maîtrise, INRS-ETE.

ROBERT, T., ET COLL., 2006. « Visualization of TCE recovery mechanisms using surfactant-polymer solutions in a two-dimensional heterogeneous sand model ». *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 86, no 1-2, p. 3-31.

ROSS, M., M. PARENT ET R. LEFEBVRE, 2005. « 3D geologic framework models for regional hydrogeology and land-use management: A case study from a Quaternary basin of southwestern Quebec, Canada ». *Hydrogeology Journal*, vol. 13, n° 5-6, p. 690-707.

ROSS, M., ET COLL., 2004. « Assessing rock aquifer vulnerability using downward advective times from a 3D model of surficial geology – A case study from the St. Lawrence lowlands ». *Geofísica Internacional*, vol. 43, n° 4, p. 591-602. Special issue: Selected papers presented at the First International Workshop on Aquifer Vulnerability and Risk, AVR-03, Salamanca, Mexico, May 2003.

SAVARD, M., ET COLL., éditeurs, sous presse. *Guide méthodologique pour la caractérisation hydrogéologique régionale des systèmes aquifères en roches sédimentaires fracturées*. Guide méthodologique produit par le Centre géoscientifique de Québec et publié électroniquement par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec.

SAINT-PIERRE, C., ET COLL., 2004. « TCE recovery mechanisms in 1D sand columns as predicted by phase diagrams of micellar and alcohol solutions ». *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 71, n° 1-4, p. 155-192.