

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

**ÉTUDE DES ALTERNATIVES DE CONTRÔLE
DES PANACHES D'EAU SOUTERRAINE CONTAMINÉE
PAR DES LIQUIDES IMMISCIBLES DENSES ET LÉGERS,
VILLE-MERCIER, QUÉBEC, CANADA**

Par

Cintia Racine

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

Jury d'évaluation

Examineur externe

Daniel Cassidy, Ph.D.
Université Laval

Examineur interne

Claudio Paniconi, Ph.D.
INRS-ETE

Directeur de recherche

René Lefebvre, Ph.D.
INRS-ETE

Mars 2005

© droits réservés de Cintia Racine, 2005



RÉSUMÉ

La contamination des aquifères granulaire et de roc fracturé au site des anciennes lagunes de Ville-Mercier a débuté il y a 30 ans. La contamination aux liquides immiscibles denses et légers est contrôlée par un système de pompage et traitement qui intercepte les panaches d'eau souterraine contaminée présents dans les deux aquifères. Ce système arrive maintenant au terme de sa durée de vie utile. Dans le but de le remplacer, l'INRS-ETE a reçu le mandat de réaliser une étude permettant de préciser les technologies qui pourraient être considérées pour le contrôle et le traitement des panaches d'eau contaminée. Dans le but de trouver une alternative efficace au système actuel, un cheminement logique d'étapes à réaliser a été établi, soit le processus de sélection.

Le processus de sélection a débuté par la définition de l'objectif principal, soit sélectionner des technologies et concevoir des concepts de solution pour le contrôle et le traitement des panaches d'eau contaminée de Ville-Mercier. Subséquemment un modèle conceptuel du site regroupant les contextes locaux et régionaux a été réalisé. La création du modèle conceptuel a permis de définir les contraintes du site à considérer pour l'applicabilité des technologies de réhabilitation sur le site. Le modèle conceptuel a été intégré par la suite dans un modèle numérique d'écoulement local afin de simuler les conditions hydrauliques naturelles du site ainsi que les conditions hydrauliques actuelles influencées par le pompage des puits de contrôle (travaux de Pontlevoy, 2004).

Par la suite, un inventaire des technologies de réhabilitation des aquifères contaminés a été réalisé et une sélection des technologies potentiellement applicables au site a été poursuivie. Subséquemment, les technologies retenues par la sélection ont été intégrées dans l'élaboration de concepts de solution préliminaires pour les deux aquifères. Les concepts de solution établis pour l'aquifère granulaire sont le contrôle hydraulique, le contrôle passif, le contrôle par zone réactive du panache d'eau contaminée et le confinement des zones sources. Seul le concept de contrôle hydraulique a été développé pour l'aquifère de roc fracturé. Une seconde sélection a été réalisée pour déterminer les concepts de solution préliminaires qui présentent le plus d'intérêt pour le contrôle et le

traitement du panache d'eau contaminée dans l'aquifère granulaire. Les concepts retenus, soit le confinement des zones sources et le contrôle hydraulique, ont été chacun combinés au concept de contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé afin de constituer des concepts de solution intégrés. Par la suite, les conditions de mise en œuvre de ces concepts ont été modélisées et optimisées. Les résultats de ces travaux ont permis de réaliser des designs détaillés des infrastructures impliquées dans les concepts de solution intégrés et d'évaluer leurs coûts globaux.

Les analyses économiques réalisées sur les deux concepts de solution intégrés indiquent que le concept de confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire combiné au contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé est plus coûteux que le contrôle hydraulique dans les deux aquifères. Cependant, le premier concept constitue une progression vers une solution à long terme du cas de contamination de Ville-Mercier par rapport au deuxième qui est un *statu quo* amélioré.

Suite à cette étude, il a été démontré que les deux concepts intégrés constituent des solutions techniquement viables et devraient être efficaces. Toutefois, la mise en œuvre du concept de confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire combiné au contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé est favorisée.



Étudiante



Directeur de recherche

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier mon directeur de recherche, René Lefebvre, sans qui je n'aurais pas eu la chance de réaliser ce projet de maîtrise si intéressant. René ton dévouement pour tes étudiants est la source de notre motivation à nous surpasser.

J'aimerais remercier Olivier Pontlevoy pour son soutien et les travaux de modélisation qu'il a réalisés dans le cadre de ce projet. Un gros merci également à Richard Martel, Pierre Gélinas et René Therrien pour leurs conseils judicieux en matière de réhabilitation des aquifères contaminés et de modélisation.

Je tiens à souligner et à remercier l'appui de Charles Lamontagne, Michel Ouellet, Francine Lagacé, Robert Séguin et Yvan Bousquet du ministère de l'Environnement qui m'ont fourni entre autres des informations essentielles à la réalisation de ce projet. Merci à l'INRS et au ministère de l'environnement pour leur soutien financier.

Merci à mes parents, Pierre et Lina, qui m'ont tout donné et à ma sœur, Annie, pour ta présence dans ma vie. Merci à mon conjoint Pascal pour son appui et tous ces moments de bonheur.

Enfin je tiens à remercier tous les étudiants de l'INRS qui m'ont soutenu au cours de ces deux années.

Merci à tous



TABLE DES MATIÈRES

Résumé.....	i
Remerciements.....	iii
Table des matières.....	v
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	ix
Liste des annexes.....	xi
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION.....	1
1.1 Localisation.....	1
1.2 Historique de la contamination.....	1
1.3 Mandat.....	3
1.4 Méthodologie.....	3
CHAPITRE 2 : MODÈLE CONCEPTUEL DU SITE.....	7
2.1 Contexte régional géologique et hydrogéologique.....	7
2.1.1 Géologie.....	7
2.1.2 Écoulement et propriétés hydrauliques.....	10
2.2 Contexte local des anciennes lagunes de Ville-Mercier.....	13
2.2.1 Définition des unités géologiques présentes au site.....	13
2.2.2 Distribution des unités dans la zone d'étude.....	16
2.2.3 Piézométrie et écoulement dans l'unité 3 de sable et gravier.....	19
2.2.4 Migration des contaminants dissous dans l'eau souterraine.....	21
2.3 Contraintes associées aux contextes du site.....	25
2.3.1 Contraintes anthropiques.....	26
2.3.2 Contraintes géologiques.....	28
2.3.3 Contraintes hydrogéologiques.....	30
2.3.4 Contraintes associées à la contamination.....	33
2.4 Synthèse des contraintes.....	37
CHAPITRE 3 : MODÈLE NUMÉRIQUE D'ÉCOULEMENT.....	39
3.1 Modèle numérique d'écoulement local.....	39
3.1.1 Logiciel utilisé.....	41
3.1.2 Limites du modèle.....	41
3.1.3 Maillage.....	42
3.1.4 Construction du modèle en trois dimensions (3D).....	43
3.1.5 Calage.....	44
3.2 Résultats et application du modèle numérique d'écoulement local.....	49
3.2.1 Effet hydraulique des fenêtres dans les tills.....	49
3.2.2 Vitesses d'écoulement et aire d'alimentation des puits de l'UTES.....	53
3.2.3 Impact de l'arrêt soudain des puits de l'UTES.....	55

CHAPITRE 4 : PHASE I - Technologies potentiellement applicables.....	57
4.1 Inventaire des technologies de réhabilitation	57
4.2 Sélection des technologies de réhabilitation potentiellement applicables.....	59
4.2.1 Critères de sélection.....	59
4.2.2 Matrice de décision.....	62
4.3 Résultats de la sélection initiale.....	62
4.3.1 Technologies de réhabilitation retenues par la sélection initiale	62
4.3.2 Technologies de traitement ex situ retenues par la sélection initiale.....	64
 CHAPITRE 5 : PHASE II – Concepts de solution préliminaires.....	 67
5.1 Élaboration de concepts de solution préliminaires	67
5.1.1 Contraintes affectant les concepts de solution préliminaires.....	71
5.1.2 Localisation des concepts de solution préliminaires	73
5.1.3 Confinement des zones sources de l'aquifère granulaire	77
5.1.4 Contrôle passif et semi-passif de l'aquifère granulaire	83
5.1.5 Contrôle par zone réactive dans l'aquifère granulaire	89
5.1.6 Contrôle hydraulique de l'aquifère granulaire.....	96
5.1.7 Contrôle hydraulique de l'aquifère de roc fracturé.....	101
5.1.8 Mesures complémentaires aux concepts de solution préliminaires	108
5.1.9 Traitement des effluents	109
5.2 Sélection des concepts de solution préliminaires	114
5.2.1 Sélection des concepts de solution préliminaires pour l'aquifère granulaire.	114
5.3 Résultats de la sélection des concepts de solution préliminaires.....	117
5.3.1 Concepts préliminaires applicables à l'aquifère granulaire retenus par la sélection	118
5.3.2 Concepts préliminaires applicables à l'aquifère granulaire rejetés par la sélection	120
5.3.3 Options d'application du concept de contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé retenues et rejetées.....	121
 CHAPITRE 6 : PHASE III – Concepts de solution intégrés.....	 123
6.1 Élaboration des concepts de solution intégrés	123
6.2 Description détaillée des concepts de solution intégrés	125
6.2.1 Concept 1 – Confinement des lagunes et contrôle hydraulique au roc....	125
6.2.2 Concept 2 – Contrôle hydraulique dans les deux aquifères.....	137
6.3 Modélisation numérique et optimisation des concepts de solution intégrés..	142
6.3.1 Programme de modélisation	143
6.3.2 Modélisations détaillées et résultats	144
6.4 Infrastructures et coûts des concepts de solution intégrés	167
6.4.1 Méthode	168
6.4.2 Évaluation des coûts des infrastructures du concept intégré 1	169
6.4.3 Évaluation des coûts des infrastructures du concept intégré 2	173
6.4.4 Coûts de l'usine de traitement d'eau souterraine actuelle	173

CHAPITRE 7 : PRISE DE DÉCISION – Conclusions et recommandations	177
7.1 Conclusion sur les phases du processus de sélection	177
7.2 Conclusion sur les avantages et désavantages des concepts de solution intégrés	181
7.3 Recommandations	185
RÉFÉRENCES	187

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Localisation du site	2
Figure 1.2 : Processus de sélection.....	4
Figure 2.1 : Étape 3 du processus de sélection.....	8
Figure 2.2 : Topographie régionale du roc	9
Figure 2.3 : Répartition régionale des dépôts meubles	10
Figure 2.4 : Piézométrie régionale du roc	11
Figure 2.5 : Carte de localisation du site des anciennes lagunes de Ville-Mercier.....	15
Figure 2.6 : Vue selon laquelle les figures 2.7 a, b et 2.9 sont présentées.....	16
Figure 2.7 a et b : Vues en perspective de la distribution 3D des unités.....	18
Figure 2.8 : Piézométrie dans l'unité de sable et gravier	20
Figure 2.9 : Vue en perspective de la section d'écoulement dans l'unité de sable et gravier	21
Figure 2.10 : Panache de contaminants dissous dans l'unité de sable et gravier	22
Figure 2.11: Concentrations totales en contaminants dissous en aval des anciennes lagunes.....	24
Figure 2.12 : Contraintes anthropiques	27
Figure 2.13 : Contraintes géologiques.....	29
Figure 2.14 : Contraintes hydrogéologiques	32
Figure 2.15 : Contraintes associées à la contamination	34
Figure 3.1 : Processus de sélection : Modèle numérique d'écoulement local.....	40
Figure 3.2: Carte de la piézométrie simulée dans le roc	41
Figure 3.3 : Maillage 2D de la zone de modélisation.....	42
Figure 3.4 : Modèle géologique en trois dimensions	43
Figure 3.5 : Divisions en sous-couches des différentes unités dans le modèle géologique 3D.....	44
Figure 3.6 : Conditions imposées aux limites	45
Figure 3.7 : Charges simulées comparées aux charges observées dans les dépôts meubles (sans pompage).....	48
Figure 3.8: Piézométrie simulée dans le roc sans pompage.....	49
Figure 3.9 : Comparaison des piézométries simulées (a) et observées (b) dans le roc avec pompage	50

Figure 3.10 : Comparaison de la piézométrie observée (a) et de la piézométrie simulée (b) dans les sables et graviers (avec pompage)	51
Figure 3.11: Directions et vitesses verticales d'écoulement.....	52
Figure 3.12: Aire d'alimentation des puits de l'UTES dans les dépôts meubles ..	53
Figure 3.13 : Aire d'alimentation des puits de l'UTES dans le roc.....	54
Figure 3.14 : Vitesses verticales au niveau des fenêtres suite à l'arrêt du pompage de l'UTES.....	55
Figure 4.1 : Phase I du processus de sélection.....	58
Figure 5.1 : Phase II du processus de sélection	68
Figure 5.2 : Localisations considérées pour la mise en place des concepts de solution	76
Figure 5.3 : Concept de confinement des zones sources situées dans l'aquifère granulaire	82
Figure 5.4 : Concept de contrôle passif et semi-passif de l'aquifère granulaire....	88
Figure 5.5 : Concept de contrôle par zone réactive dans l'aquifère granulaire	95
Figure 5.6 : Concept de contrôle hydraulique dans l'aquifère granulaire	100
Figure 5.7 : Concept de contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracture	105
Figure 6.1 : Phase III du processus de sélection.....	124
Figure 6.2 : Concept 1 - Confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire combiné au contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé	128
Figure 6.3 : Concept 2 : Contrôle hydraulique dans les aquifères granulaire et de roc fracturé.....	139
Figure 6.4 : Programme de modélisation numérique du concept intégré 1	145
Figure 6.5 : Programme de modélisation numérique du concept intégré 2.....	147
Figure 6.6 : Aire d'alimentation dans le roc pour un puits de débit de 300 m ³ /d	148
Figure 6.7 : Aire d'alimentation dans le roc pour un puits de débit de 400 m ³ /d	148
Figure 6.8 : Aire d'alimentation des puits dans le roc sans le pompage de l'UTES	149
Figure 6.9 : Aire d'alimentation des puits dans le roc avec le pompage de l'UTES.	149
Figure 6.10 : Résumé des simulations de la solution choisie pour le contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé	151
Figure 6.11: Évolution du panache à résorber en fonction du temps d'opération de l'UTES à un débit total de pompage de 3880 m ³ /d	154
Figure 6.12 : Aire d'alimentation des puits de l'UTES pour un débit de 1200 m ³ /d.	155
Figure 6.13 : Aire d'alimentation des puits de l'UTES pour un débit de 1500 m ³ /d.	155
Figures 6.14 : Évolution du panache à résorber en fonction du temps d'opération de l'UTES à un débit total de pompage de 1500 m ³ /d	156
Figure 6.15 : Aire d'alimentation pour un puits implanté dans le panache avec un débit de 900 m ³ /d.....	158
Figure 6.16 : Aire d'alimentation pour un puits implanté dans le panache avec un débit de 1000 m ³ /d.....	158

Figures 6.17 : Évolution du panache à résorber en fonction du temps d'opération de l'UTES à un débit total de pompage de 1500 m ³ /d et d'un puits implanté dans le panache à résorber pompant à un débit de 1000 m ³ /d.....	159
Figure 6.18 : Aire d'alimentation pour un puits implanté en aval des lagunes pour un débit de 900 m ³ /d.....	163
Figure 6.19 : Aire d'alimentation pour un puits implanté en aval des lagunes pour un débit de 1000 m ³ /d.....	163
Figures 6.20 : Simulation des conditions reliées au contrôle hydraulique dans les deux aquifères ainsi que la résorption du panache par l'UTES en fonction du temps	165
Figure 6.21 : Localisation possible d'un puits de ré-injection et effet hydraulique dans l'aquifère granulaire	167
Figure 7.1 : Processus de sélection : Prise de décision	178

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Données hydrogéologiques du roc à Mercier.....	12
Tableau 2.2 : Propriétés hydrogéologiques des dépôts meubles à Mercier	12
Tableau 3.1 : Conditions aux limites après calage (avec et sans pompage).....	46
Tableau 3.2 : Paramètres hydrogéologiques appliqués à chaque unité après calage (avec et sans pompage)	46
Tableau 3.3 : Recharge appliquée après calage (avec et sans pompage)	47
Tableau 4.1 : Critères et choix de réponses associés.....	61
Tableau 4.2 : Exemple de la matrice de décision.....	63
Tableau 4.3 : Technologies de réhabilitation retenues par le processus de sélection	64
Tableau 4.4 : Technologies de traitement <i>ex situ</i> retenues par la sélection initiale ..	65
Tableau 5.1 : Résumé des concepts de solution envisagés	70
Tableau 5.2 : Emplacements favorisés pour les concepts de solution préliminaires	77
Tableau 5.3 : Avantages et désavantages des technologies de confinement vertical	81
Tableau 5.4 : Avantages et désavantages des technologies de contrôle passif et semi-passif.....	86
Tableau 5.5 : Avantages et désavantages des technologies de contrôle par zone réactive	92
Tableau 5.6 : Avantages et désavantages des technologies de contrôle hydraulique	98
Tableau 5.7 : Effluents du confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire et traitements envisagés.....	112
Tableau 5.8 : Effluents du contrôle par zone réactive dans l'aquifère granulaire et traitements envisagés.....	113
Tableau 5.9 : Effluents du contrôle hydraulique dans les aquifères granulaire et de roc fracturé et traitements envisagés	113

Tableau 5.10 : Cahier des charges : Grille de sélection des concepts de solution préliminaires de l'aquifère granulaire.....	115
Tableau 5.11 : Matrice de décision : Compilation de l'évaluation des concepts de solution préliminaires de l'aquifère granulaire avec la grille de sélection	116
Tableau 5.12 : Applications rejetées du concept de confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire et cause principale de leur rejet.....	119
Tableau 5.13 : Applications rejetées du concept de contrôle hydraulique dans l'aquifère granulaire et cause principale de leur rejet	120
Tableau 5.14 : Applications rejetées du concept de contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé et cause principale de leur rejet	121
Tableau 6.1 : Design de base : Confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire	130
Tableau 6.2 : Design de base : Contrôle hydraulique linéaire dans l'aquifère de roc fracturé.....	131
Tableau 6.3 : Design de base : Puits distribués dans le panache d'eau contaminée à résorber	131
Tableau 6.4 : Éléments de design des puits d'observation du concept intégré 1 et fonctions principales.....	136
Tableau 6.5 : Design de base : Contrôle hydraulique dans l'aquifère granulaire	138
Tableau 6.6 : Objectifs, calculs préliminaires et choix technologiques associés aux modélisations de la mise en œuvre du concept intégré 1.....	146
Tableau 6.7 : Objectifs, calculs préliminaires et choix technologiques associés aux modélisations de la mise en œuvre du concept intégré 2.....	147
Tableau 6.8 : Conditions de modélisation du contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé.....	148
Tableau 6.9 : Localisations envisagées pour les puits de contrôle dans l'aquifère de roc fracturé.....	150
Tableau 6.10: Design des puits de l'UTES adapté au maillage du modèle	153
Tableau 6.11 : Conditions de modélisation de la résorption du panache avec les puits de l'UTES à débit total minimal de contrôle.....	155
Tableau 6.12 : Conditions de modélisation d'un puits implanté dans le panache à résorber	157
Tableau 6.13 : Résultats des simulations des options pour la résorption du panache dans l'aquifère granulaire.....	160
Tableau 6.14 : Résumé des choix technologiques optimaux du concept intégré 1	161
Tableau 6.15 : Conditions de modélisation du contrôle hydraulique dans l'aquifère granulaire	163
Tableau 6.16 : Résumé des choix technologiques optimaux du concept intégré 2	166
Tableau 6.17 : Coûts du concept intégré 1	172
Tableau 6.18 : Coûts du concept intégré 2	175
Tableau 6.19: Coûts associés à l'UTES.....	175
Tableau 7.1: Comparaison des deux concepts de solution intégrés.....	182

LISTE DES DOSSIERS (CD)

Dossier : Annexes en PDF
Dossier : Présentation du 10 février 2004
Dossier : RACER_PDF
Dossier : Rapport en PDF (Figures en couleurs)

LISTE DES ANNEXES (CD)

Annexe A: Résumé des contraintes du site
Annexe B: Liste des technologies de réhabilitation
Annexe C: Résumé des contextes locaux
Annexe D: Sélection initiale : Matrice de décision
Annexe E: Technologies rejetées de la sélection initiale
Annexe F: Concepts de solution préliminaires et contraintes associées
Annexe G : Avantages et désavantages des localisations des concepts de solution préliminaires
Annexe H : Définitions des technologies applicables au site
Annexe I : Documentation d'Envirometal.Inc.
Annexe J : Compte-rendu de la réunion du 10 février 2004
Annexe K : Matrice des résultats qualitatifs du cahier des charges
Annexe L : Design d'une tour de ventilation
Annexe M : Calculs théoriques des débits minimaux de contrôle pour les concepts intégrés
Annexe N : Calcul théorique de la capacité d'un puits installé au roc
Annexe O : Calcul théorique de la distance entre les puits installés au roc
Annexe P : Calcul de capacité de l'UTES en conditions transitoires
Annexe Q : Calcul de capacité de l'UTES en conditions permanentes pour le concept intégré 1 : option 2
Annexe R : Calcul de capacité de l'UTES en conditions permanentes pour le concept intégré 2
Annexe S : Éléments de design des infrastructures du concept intégré 1
Annexe T : Éléments de design d'une usine indépendante pour le traitement de l'eau fortement contaminée du concept intégré 1
Annexe U : Éléments de design des infrastructures du concept intégré 2



CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Ce chapitre présente la localisation du site à l'étude, soit les anciennes lagunes de Ville-Mercier, et un résumé de l'historique de la contamination. Il est décrit également dans ce chapitre le mandat accordé à l'INRS-ETE dans le cadre de cette étude et la méthodologie employée pour répondre à ce mandat.

1.1 Localisation

Le site à l'étude, soit les anciennes lagunes de Ville-Mercier, se situe dans la province de Québec, au sud sud-ouest de Montréal dans le comté de Châteauguay, dans la localité de Ville-Mercier (Figure 1.1). Le site fait partie de la province géologique des Basses Terres du Saint-Laurent. Les cours d'eau d'importance dans la localité de Ville-Mercier sont la rivière Châteauguay à l'ouest et la rivière Esturgeon au sud sud-est. Les principales municipalités de la région autres que Ville-Mercier sont Châteauguay, Sainte-Martine, Sainte-Chotilde, Saint-Isidore et Saint-Rémi.

1.2 Historique de la contamination

L'exploitation du site a débuté en 1968 par la compagnie LaSalle Oil Carrier. La principale fonction du site lors de ces années d'exploitation a été l'entreposage de liquides organiques dans des lagunes aménagées dans les sables et graviers qui affleurent au site. Ces dépôts meubles présentent la forme d'un complexe fluvio-glaciaire. Suite à deux années d'exploitation, une sérieuse contamination aux composés organiques a été retrouvée dans les puits privés localisés au sud-ouest du site. Cette contamination est supposée provenir de la migration des liquides organiques immiscibles denses et légers (LID et LIL) contenus dans les lagunes sous forme de phases libre et dissoute dans l'eau souterraine.

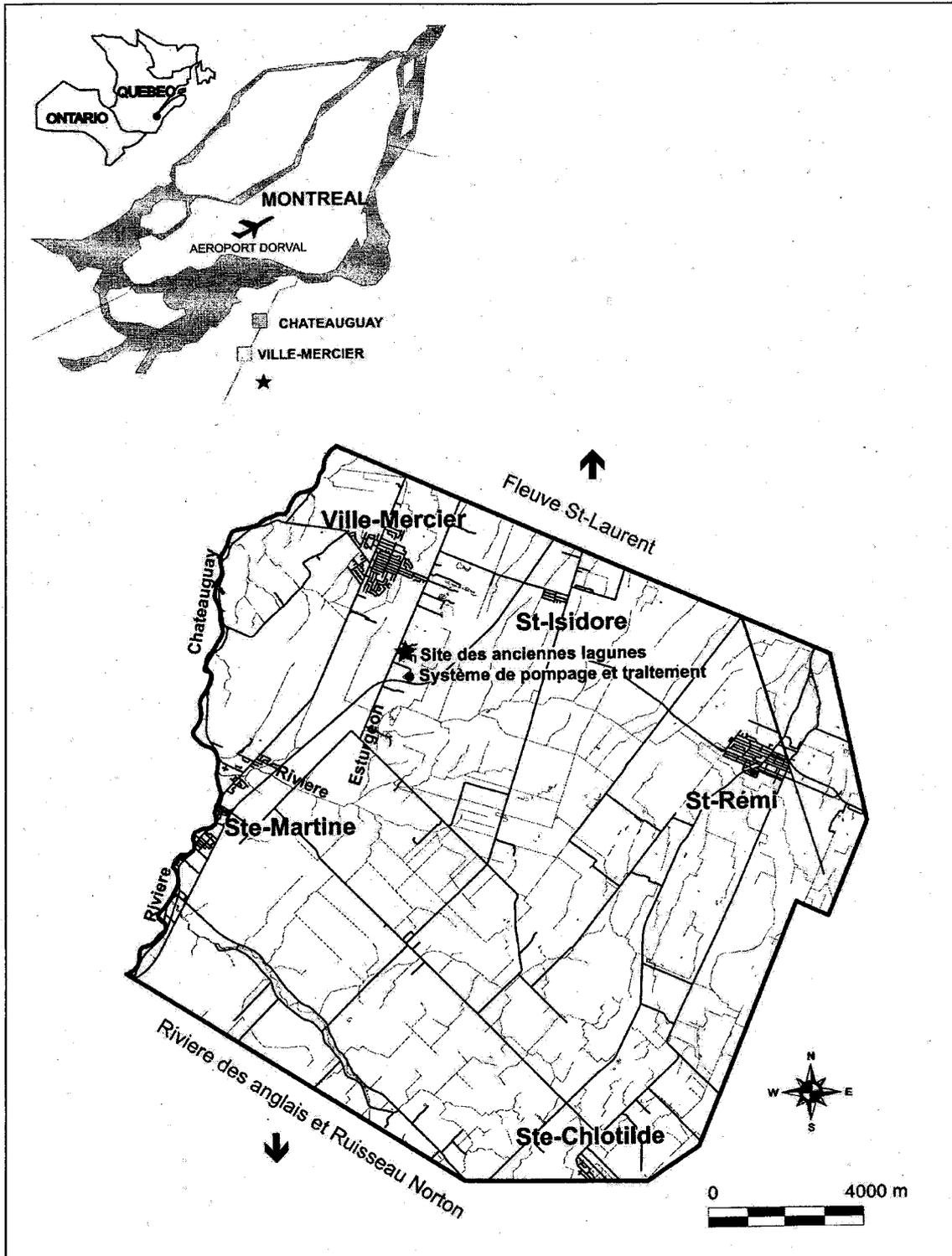


Figure 1.1 : Localisation du site
 (tirée de Pontlevoy, 2004)

La contamination s'est produite localement par la formation d'un panache d'eau contaminée dans les sables et graviers par la solubilisation des liquides organiques des lagunes dans l'eau souterraine. Progressivement, l'écoulement de la phase libre de contaminants dans l'aquifère de roc fracturé, par le biais de contacts directs avec les sables et graviers (où les tills sont absents « fenêtres »), a permis la migration des LID dans le roc et la formation d'un second panache d'eau contaminée. Pour éviter la migration des contaminants à partir des lagunes, le ministère de l'Environnement (MENV) a délimité une zone d'exclusion où tout pompage est interdit. Également, il a mis en œuvre en 1984 un système de pompage et traitement afin de contrôler par interception les panaches d'eau contaminée présents dans les aquifères granulaire et de roc fracturé (Pontlevoy, 2004).

1.3 Mandat

Les travaux de cette étude sont liés au mandat qu'a reçu l'INRS-ETE de réaliser une étude permettant au Ministère de l'environnement (MENV) de sélectionner les technologies qui pourraient être considérées pour le contrôle et le traitement des panaches d'eau contaminée dans la région des anciennes lagunes de Ville-Mercier. Cette étude vise à identifier les technologies et à développer des concepts de solution aptes à remplacer le présent système de pompage et de traitement (Unité de traitement des eaux souterraines, UTES) qui arrive au terme de sa vie utile et qui utilise des technologies datant d'une vingtaine d'années. L'objectif général du projet est de concevoir et d'optimiser des concepts de solution qui permettraient de contrôler les panaches d'eau contaminée du site des anciennes lagunes de Ville-Mercier.

1.4 Méthodologie

La méthodologie employée pour répondre au mandat a été dérivée de celle utilisée par Golder (1997) dans le cadre du projet Smithville qui présente plusieurs similarités au cas de contamination des anciennes lagunes de Ville-Mercier. Cette méthodologie est le processus de sélection qui est défini par un cheminement logique d'étapes à réaliser pour trouver une alternative efficace de contrôle et de traitement à un cas de contamination particulier. La figure 1.2 montre le processus de sélection suivi pour cette étude.

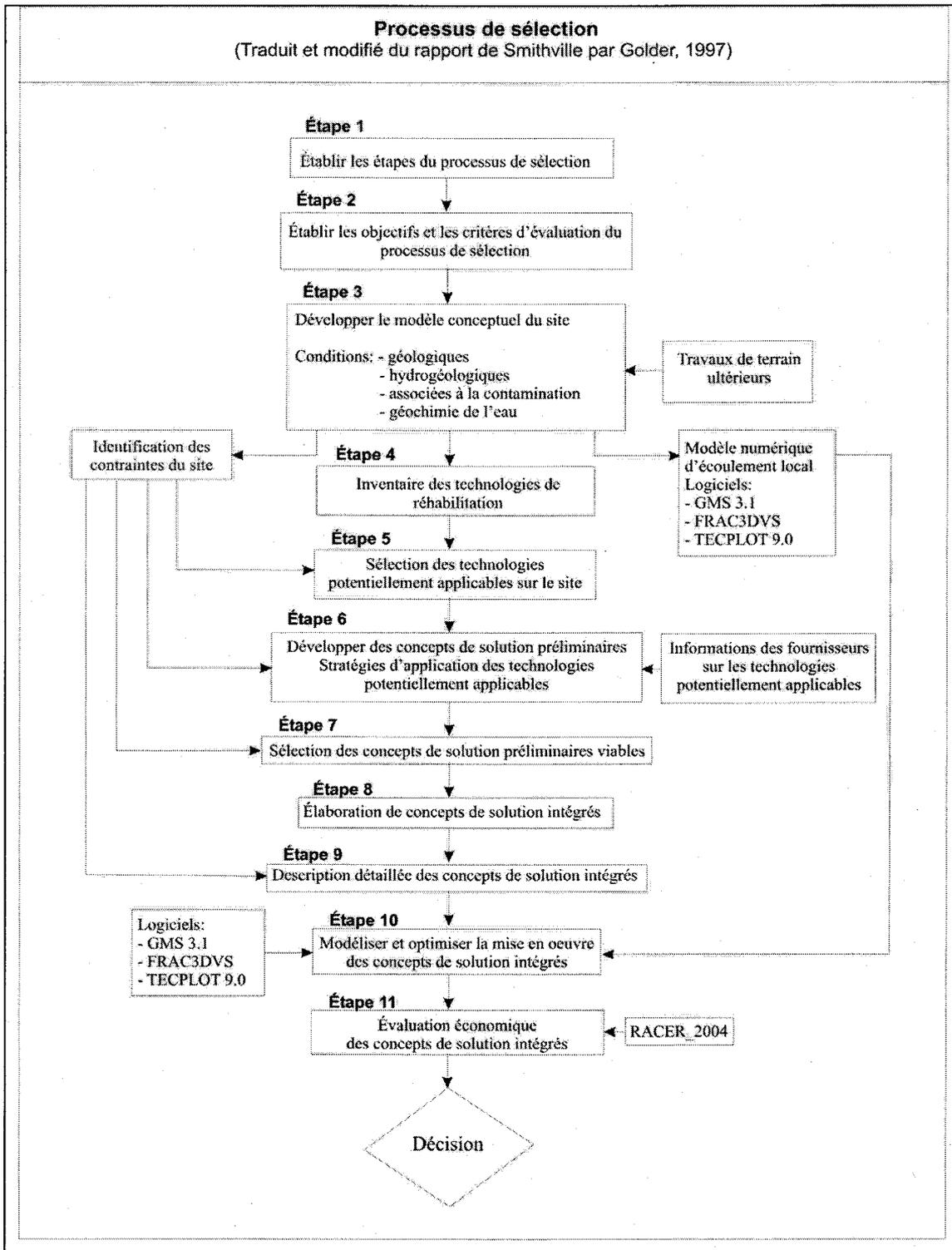


Figure 1.2 : Processus de sélection

Suite à l'adaptation de la méthodologie au cas de contamination de cette étude (Étape 1), l'objectif principal du processus est défini, soit sélectionner des technologies et concevoir des concepts de solution pour le contrôle et le traitement des panaches d'eau contaminée de Ville-Mercier (Étape 2).

L'étape 3 du processus de sélection est caractérisée par la création d'un modèle conceptuel du site regroupant les contextes locaux et régionaux et la définition des contraintes à considérer pour l'applicabilité des technologies de réhabilitation sur le site (Chapitre 2). Également à l'étape 3, le modèle conceptuel du site est intégré dans un modèle numérique d'écoulement local (Chapitre 3).

À l'étape 4 du processus de sélection, un inventaire des technologies de réhabilitation existantes est réalisé. Une sélection initiale de ces technologies est poursuivie à l'étape 5 dans le but de déterminer lesquelles sont applicables au site à l'étude (Chapitre 4).

Suite à cette sélection, des concepts de solution préliminaires pour l'aquifère granulaire et l'aquifère de roc fracturé sont développés (Étape 6). Ceux-ci constituent des applications potentielles au site des technologies retenues. À l'étape 7, une seconde sélection est poursuivie afin de déterminer lesquels des concepts présentent le plus d'intérêt pour la suite des travaux (Chapitre 5).

Les concepts de solution préliminaires retenus par la seconde sélection sont ensuite combinés pour former des concepts de solution intégrés qui sont des solutions complètes pour le contrôle et le traitement des deux panaches d'eau contaminée qui se trouvent dans les aquifères granulaire et de roc fracturé (Étape 8). Ces concepts de solution intégrés sont détaillés à l'étape 9 du processus de sélection et leurs conditions de mise œuvre sont modélisées et optimisées à l'étape 10. Ces travaux permettent de préciser davantage les éléments de design des infrastructures associées aux concepts de solution intégrés et d'évaluer leurs coûts globaux (Étape 11) (Chapitre 6).

La prise de décision, soit le choix de l'alternative à adopter pour le contrôle et le traitement des panaches d'eau contaminée de Ville-Mercier, survient à la suite de l'intégration des étapes du processus de sélection (Chapitre 7).

CHAPITRE 2

MODÈLE CONCEPTUEL DU SITE

Ce chapitre présente le modèle conceptuel du site. Celui-ci intègre le contexte régional géologique et hydrogéologique ainsi que les contextes locaux des anciennes lagunes de Ville-Mercier, comprenant la géologie, l'hydrogéologie et la contamination. Le modèle conceptuel est la base du processus de sélection. Il a permis, entre autre, de définir les contraintes du site qui sont déterminantes pour évaluer l'applicabilité des technologies envisagées pour le contrôle et le traitement des panaches d'eau contaminée de Ville-Mercier. Dans ce chapitre, les contraintes du site sont présentées à la suite du modèle conceptuel. L'élaboration du modèle conceptuel et la définition des contraintes du site constituent l'étape 3 du processus de sélection montré à la figure 2.1.

2.1 Contexte régional géologique et hydrogéologique

2.1.1 Géologie

Le socle rocheux est constitué de roches sédimentaires fracturées et très peu déformées datant de l'Ordovicien et du Cambrien (Globensky, 1986). La topographie régional du roc est présentée à la figure 2.2. Le roc est recouvert par un till basal dense et compact lui-même recouvert par un till remanié plus perméable. Les sables et graviers fluvioglaciaires déposés par-dessus ces tills affleurent en partie sous la forme d'un esker de 11 km de long au niveau de Ville-Mercier et ont été recouverts en partie lors de la transgression de la mer de Champlain par les argiles marines (Lasalle, 1980). La répartition régionale des dépôts meubles est présentée à la figure 2.3. L'extension en profondeur des dépôts meubles est abordée localement à l'échelle du site aux figures 2.7 a et b et lors de la présentation du modèle d'écoulement local à la figure 3.4.

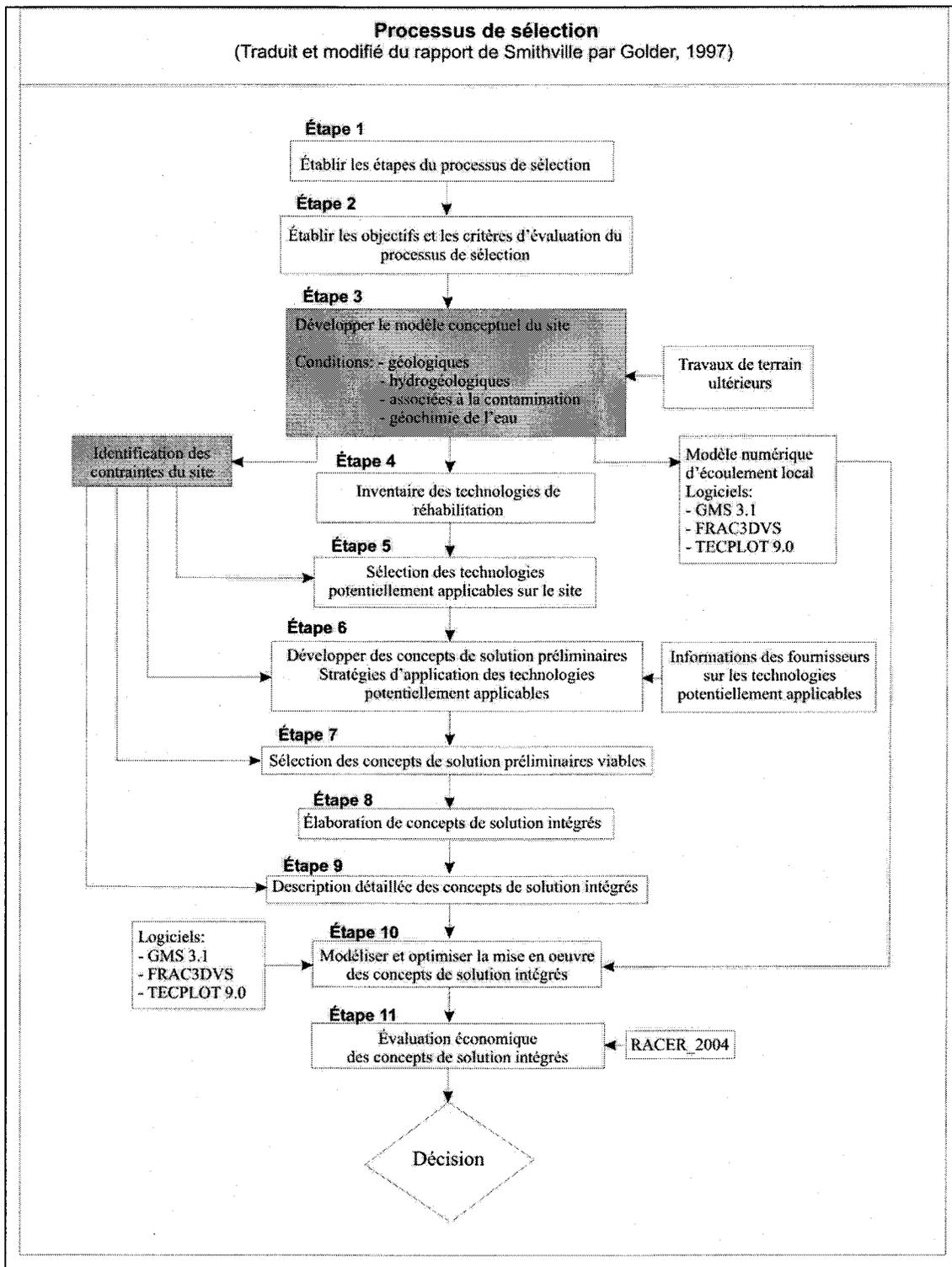


Figure 2.1 : Étape 3 du processus de sélection

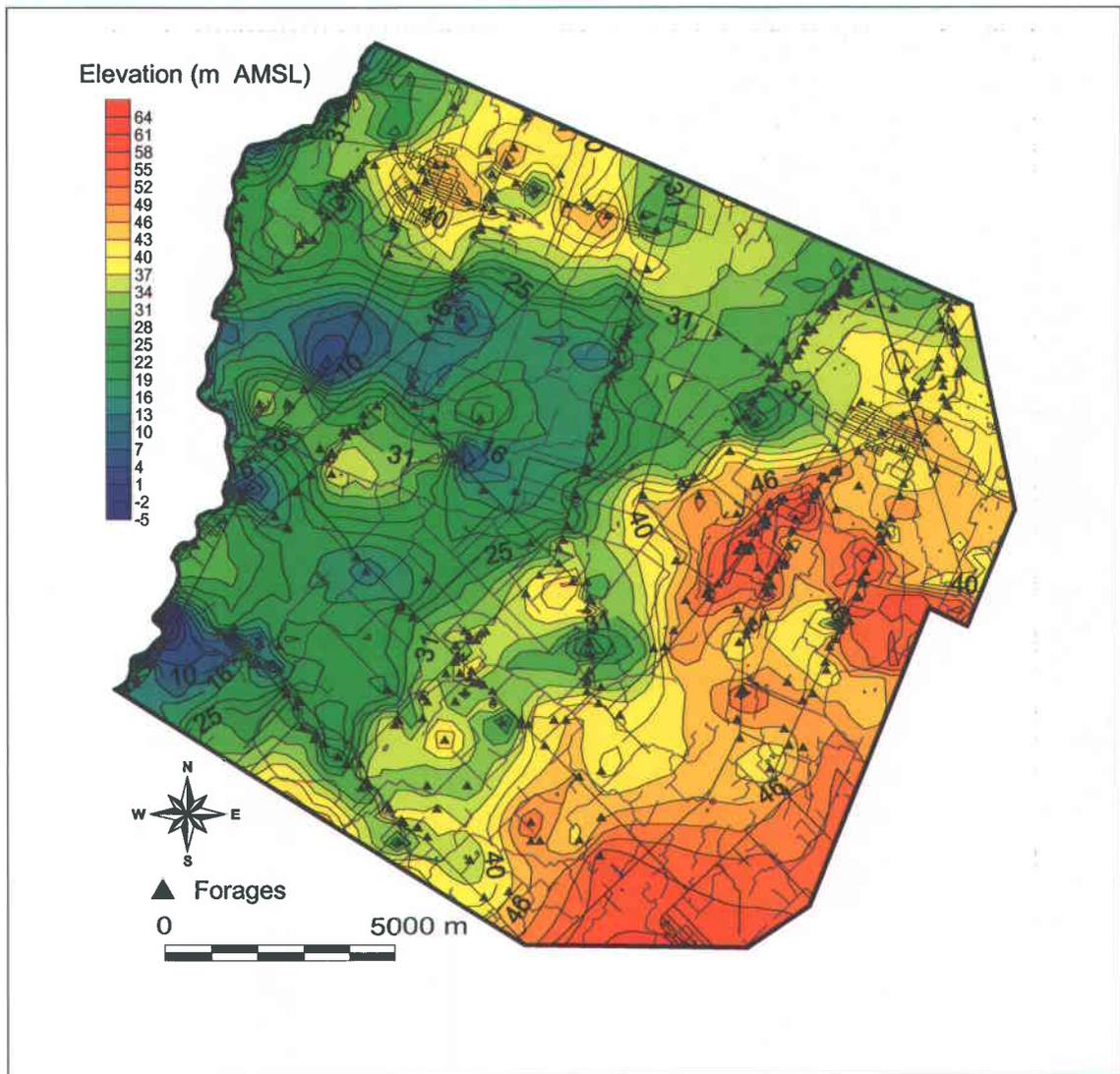


Figure 2.2 : Topographie régionale du roc
(Pontlevoy et al., 2003)

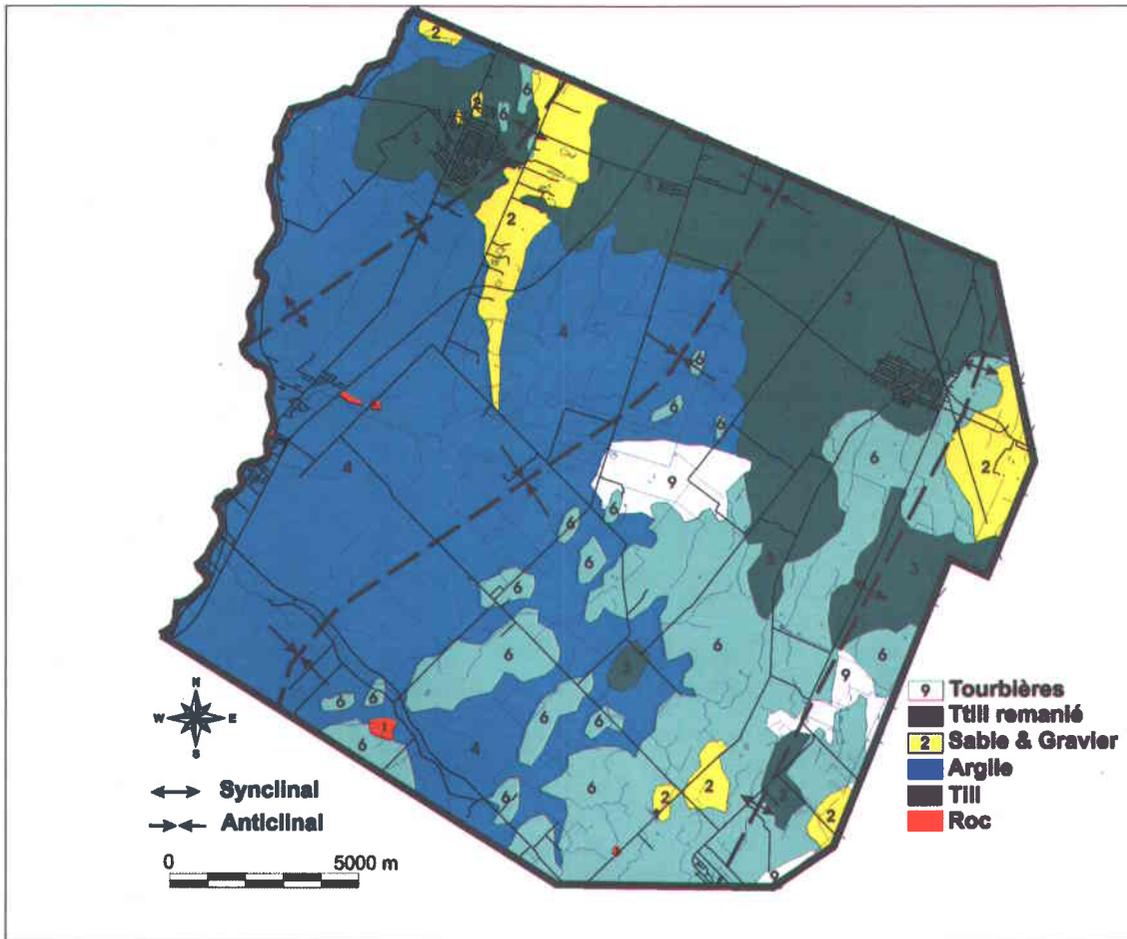


Figure 2.3 : Répartition régionale des dépôts meubles
 (Tirée de Pontlevoxy et al., 2002, d'après Globensky, 1986 et Lasalle, 1980)

2.1.2 Écoulement et propriétés hydrauliques

La figure 2.4 présente la piézométrie régionale observée dans l'aquifère de roc fracturé à Mercier. L'écoulement dans le roc se fait de l'est vers l'ouest. L'écoulement dans les dépôts meubles est présenté et discuté à la section 2.2.3. Une compilation des propriétés du roc relevées sur le site de Ville-Mercier est présentée au tableau 2.1 où T est la transmissivité, K la conductivité hydraulique, S le coefficient d'emmagasinement et n la porosité.

À sa suite, le tableau 2.2 présente un résumé des propriétés hydrogéologiques des dépôts meubles. Les tills et les argiles sont considérés comme des dépôts imperméables ou à faible perméabilité tandis que les sables et graviers constituent l'une des formations les

plus perméables de la région (McCormack, 1981). Des essais de perméabilité réalisés sur le till de base au site des anciennes lagunes de Ville-Mercier montrent une conductivité hydraulique moyenne de $1,7 \times 10^{-8}$ m/s (Lefebvre, communication personnelle). Des essais réalisés également sur le till remanié affichent une conductivité hydraulique moyenne de $1,3 \times 10^{-5}$ m/s (Lefebvre, communication personnelle) et une porosité variant de 0,15 à 0,2 (CNFS, 1993). La conductivité hydraulique des argiles mesurée en laboratoire par Hydrogéologie Canada (1978) varie de $6,4 \times 10^{-10}$ à 4×10^{-10} m/s. L'horizon supérieur silto-sableux est plus perméable avec une conductivité hydraulique variant de 10^{-4} à 10^{-6} m/s (GREGI, 1993). La porosité varie de 0,36 à 0,65 et la conductivité hydraulique verticale K_z est de 10^{-10} m/s (Géomines, 1983). L'unité des sables et graviers constitue un aquifère semi-confiné répertorié par Géomines (1983). La conductivité hydraulique moyenne est de $2,16 \times 10^{-4}$ m/s (Lefebvre, communication personnelle), le coefficient d'emmagasinement varie de 0,03 à 0,4 (Foratek Inc., 1987) et la porosité est de 0,3 (Poulin, 1977).

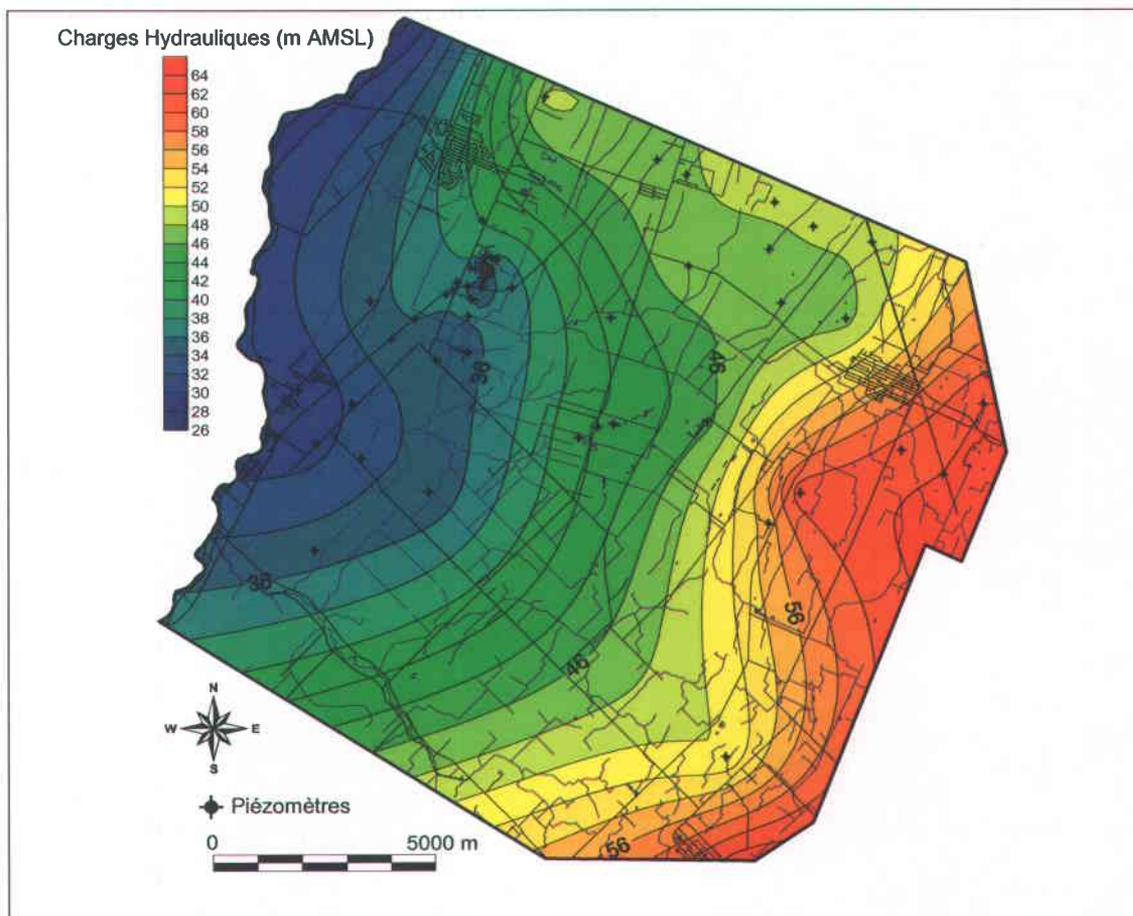


Figure 2.4 : Piézométrie régionale du roc (Tirée de Pontlevoy et al., 2002)

Tableau 2.1 : Données hydrogéologiques du roc à Mercier
(Tirée de Pontlevoy, 2004)

Sources	T (m ² /s)	K (m/s)	S	n
Poulin, 1977	$3,9 \times 10^{-7}$	$6,4 \times 10^{-8}$	-	0,05 Fracture: 0,12
	$1,8 \times 10^{-5}$	$9,5 \times 10^{-6}$	-	
	$1,8 \times 10^{-6}$	$5,1 \times 10^{-7}$	-	
	$8,7 \times 10^{-7}$	$9,6 \times 10^{-7}$	-	
	$6,4 \times 10^{-6}$	$2,1 \times 10^{-6}$	-	
Foratek inc., 1987	$8,5 \times 10^{-3}$	-	-	
Bachand, 1987	$8,0 \times 10^{-3}$	-	-	
D'Anjou, 1991	$9,2 \times 10^{-5}$	-	-	
Gélinas et al, 1989	De $2,9 \times 10^{-4}$ à $2,4 \times 10^{-6}$	-	De $2,4 \times 10^{-3}$ à $2,4 \times 10^{-4}$	
Denis, 1991	$1,0 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-5}$	Effective: 0,02 Totale : 0,036 à 0,096
Moyenne	$1,5 \times 10^{-3}$	$2,2 \times 10^{-6}$	$8,8 \times 10^{-4}$	

Tableau 2.2 : Propriétés hydrogéologiques des dépôts meubles à Mercier
(Tirée de Pontlevoy, 2004)

Unité	Conductivité hydraulique (m/s)	Source	Coefficient d'emménagement	Source	Porosité	Source
Argile	$6,4 \times 10^{-10}$ à	2			0,36 à	2
	$4,0 \times 10^{-10}$	2			0,65	2
	$K_z : 10^{-10}$	4				
Sable et gravier	$2,16 \times 10^{-4}$	6	0,03 à 0,4	3	0,3	1
Till remanié	$1,31 \times 10^{-5}$	6			0,15 à	5
					0,2	5
Till de base	$1,73 \times 10^{-8}$	6				

1 Poulin, 1977

2 Hydrogeo, 1978

3 Foratek International, 1987

4 Géomines, 1983

5 CNFS, 1993

6 Lefebvre, communication personnelle

2.2 Contexte local des anciennes lagunes de Ville-Mercier

La description du contexte local rencontré au site des anciennes lagunes de Ville-Mercier est basée sur les travaux d'expertise de l'INRS-ETE réalisés pour le MENV. Dû à l'utilisation de cette expertise dans un contexte légal, le détail des résultats obtenus n'est pas présenté dans cette étude. La localisation du site des anciennes lagunes de Ville-Mercier est présentée à la figure 2.5. Cette figure est un agrandi de la zone étoilée de la figure 1.1.

2.2.1 Définition des unités géologiques présentes au site

Suite à la caractérisation du MENV de 1995-1996, certaines précisions ont été apportées aux définitions des unités et de nouvelles sous-unités ont été utilisées. Ces définitions sont plus rigoureuses que lors des études antérieures et sont basées sur des considérations sédimentologiques (M. Parent, comm. pers.). Les unités retrouvées au site, généralement rencontrées de la surface vers la base, sont définies comme suit :

Unité 1A, remblai : Cette sous-unité de remblai est constituée d'argile silteuse grise et brune avec des traces à un peu de sable et gravier. Localement, elle peut renfermer des racines et des coquillages. L'unité affleure ou se retrouve très près de la surface au niveau des anciennes lagunes comme couche de recouvrement des matériaux de remplissage plus grossiers (unité 1B). Cette unité est constituée de matériaux fins (silt, argile) semblables à ceux des unités argileuses 2A et 2B. Cette nouvelle sous-unité a été définie pour permettre de distinguer les matériaux fins ayant servi au recouvrement des anciennes lagunes, des autres matériaux généralement plus grossiers constituant les remblais pour les lagunes ou d'autres endroits du site (unité 1B).

Unité 1B, remblai : Cette autre unité de remblai est constituée de tous les matériaux, autres que ceux de l'unité 1A, ayant servi de remblai sur le site. Généralement, ces matériaux sont du sable et gravier gris et brun avec des proportions variables de silt, cailloux et blocs ; localement, de l'argile est retrouvée. Cette unité est constituée de matériaux naturels mais présente des corps étrangers non naturels indiquant que ces matériaux ont été remaniés. Par

exemple, l'unité 1B peut contenir des racines, des boues, de la chaux, des cendres, des objets métalliques et autres. La distinction visuelle est souvent difficile entre le remblai 1B et l'unité 3 de sable et gravier.

Unité 2A, silt et sable argileux : Cette unité de couleur brune est constituée de silt sablonneux à du sable silteux et argileux avec des proportions variables de gravier, cailloux, et blocs. Cette unité argileuse se retrouve au-dessus de l'unité argileuse 2B.

Unité 2B, argile silteuse : Cette unité de couleur grise et brune est constituée d'argile silteuse avec traces à un peu de silt et des quantités variables de cailloux et blocs.

Unité 3, sable et gravier : Cette unité contient du gravier sablonneux à du sable graveleux avec des traces à un peu de silt et des quantités variables de cailloux et blocs. Ce dépôt est généralement gris-noir, mais parfois la partie supérieure est brune en raison d'une forte oxydation.

Unité 4A, till supérieur : Cette unité de couleur grise comprend un mélange de sédiments non classés contenant une large gamme de tailles granulométriques (diamiction) ; des lits sablonneux ou graveleux peuvent s'y intercaler. La matrice est silto-sableuse et plus ou moins homogène. Il y a parfois présence de zones compactes. Les galets sont généralement non striés.

Unité 4B, till inférieur : Cette unité de couleur grise comprend un mélange de sédiments non classés contenant une large gamme de tailles granulométriques (diamicton). La matrice est silto-sableuse et dominante ; l'homogénéité est globale. L'unité est compacte. Des galets striés sont présents. Localement, il peut y avoir de petits lits de sable.

Unité 5, roc : Cette unité de quartzite blanche représente la roche en place sous les dépôts meubles. La fracturation de l'unité 5 est décrite par Denis (1991) ainsi que Gélinas et al. (1989).

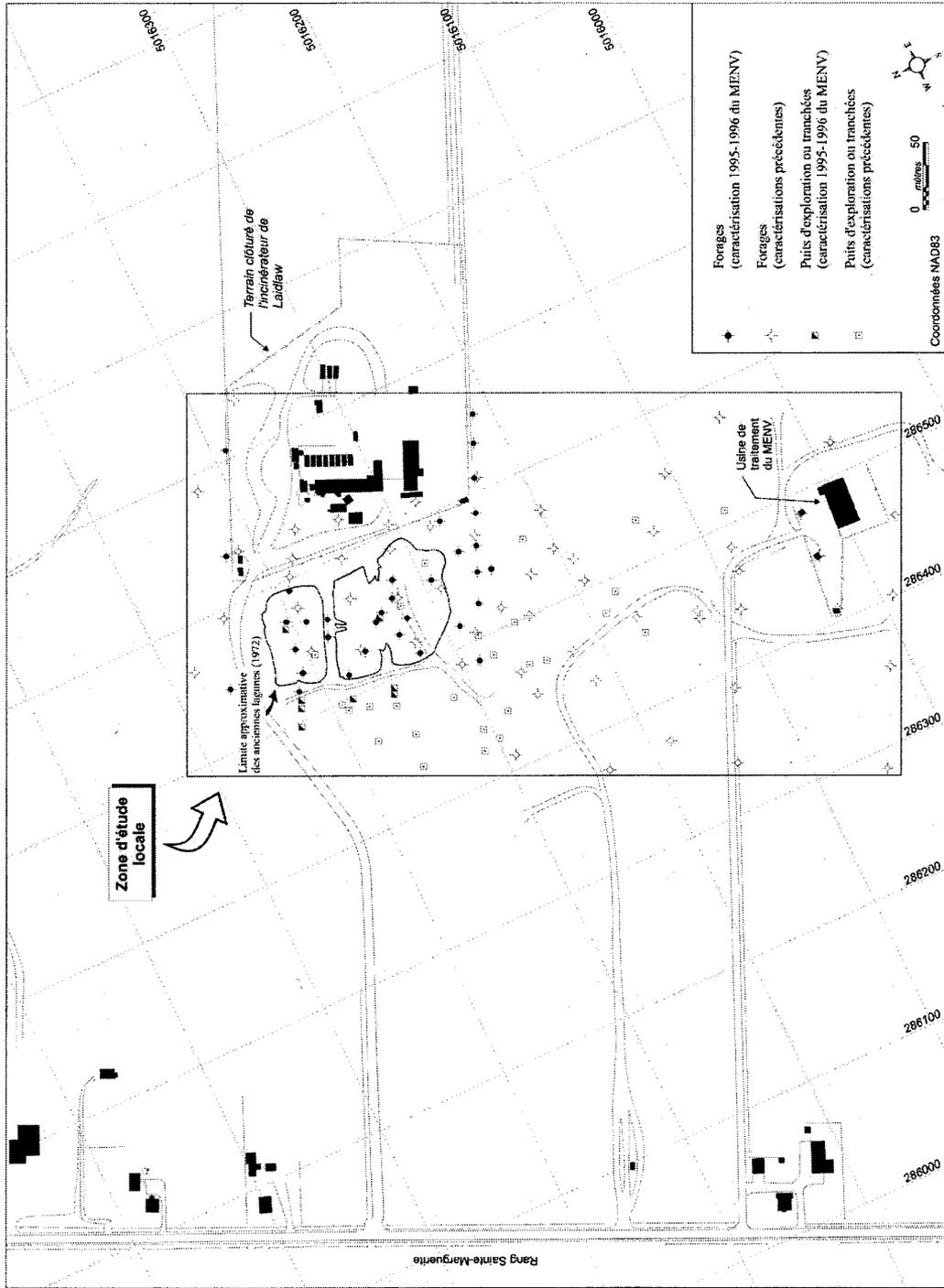


Figure 2.5 : Carte de localisation du site des anciennes lagunes de Ville-Mercier

2.2.2 Distribution des unités dans la zone d'étude

Les anciennes lagunes de Mercier se trouvent dans un contexte géologique et hydrogéologique complexe. La figure 2.6 montre la perspective selon laquelle les figures en trois dimensions 2.7a et 2.7b de même que 2.9 sont présentées. Ces figures illustrent le contexte du secteur d'étude.

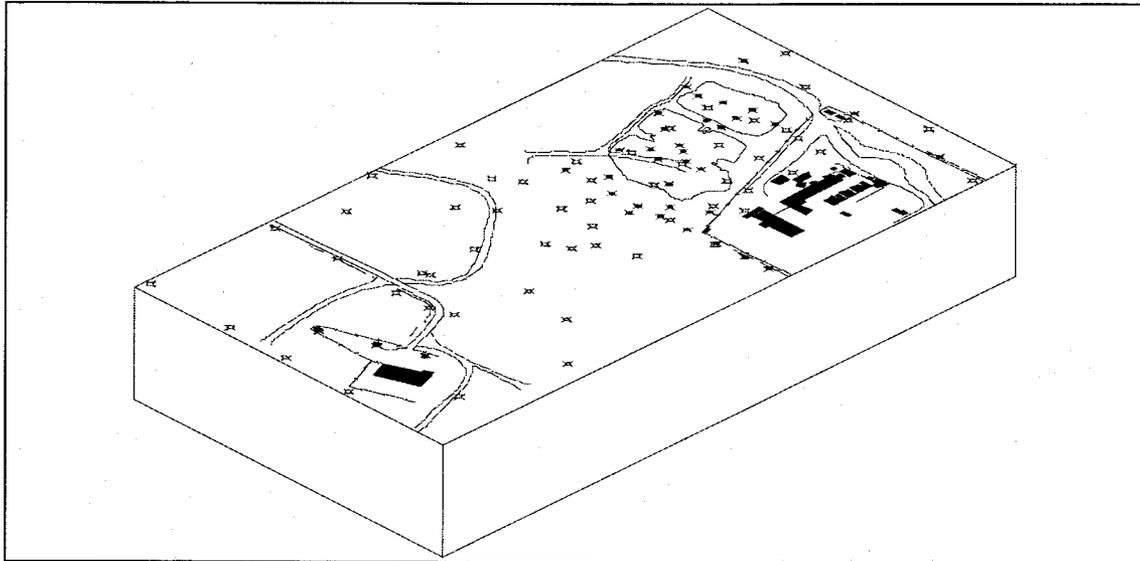


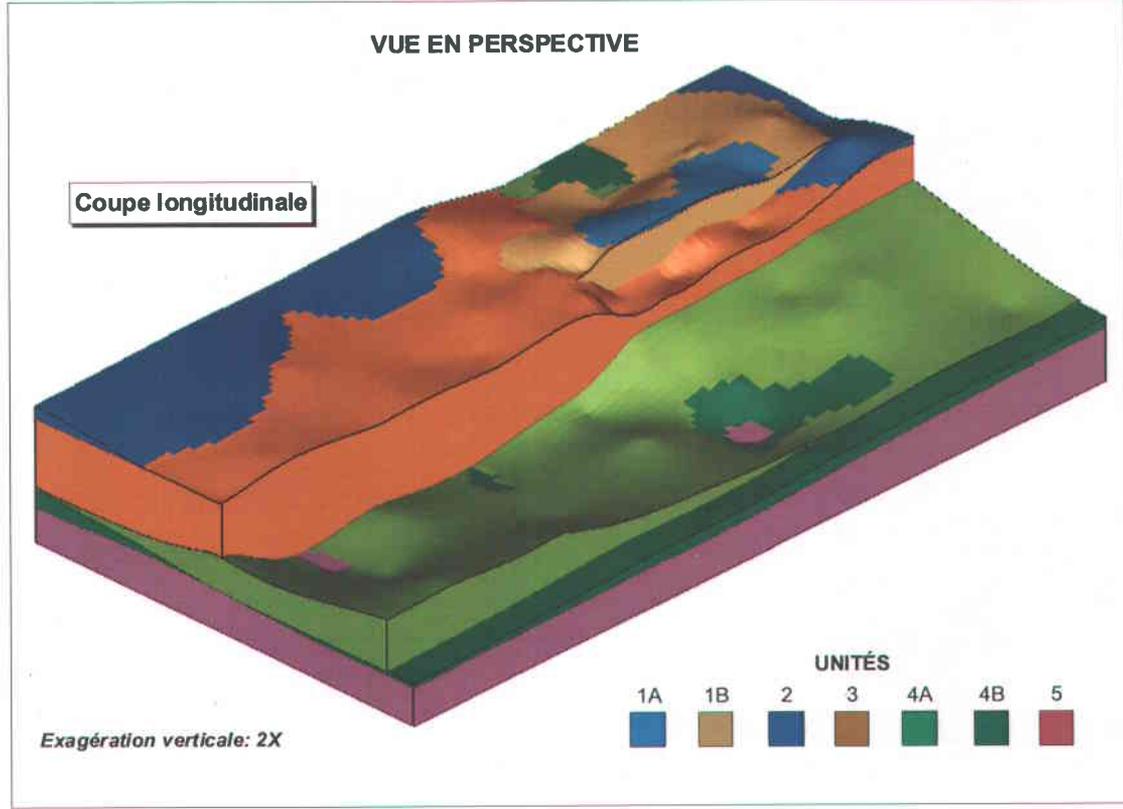
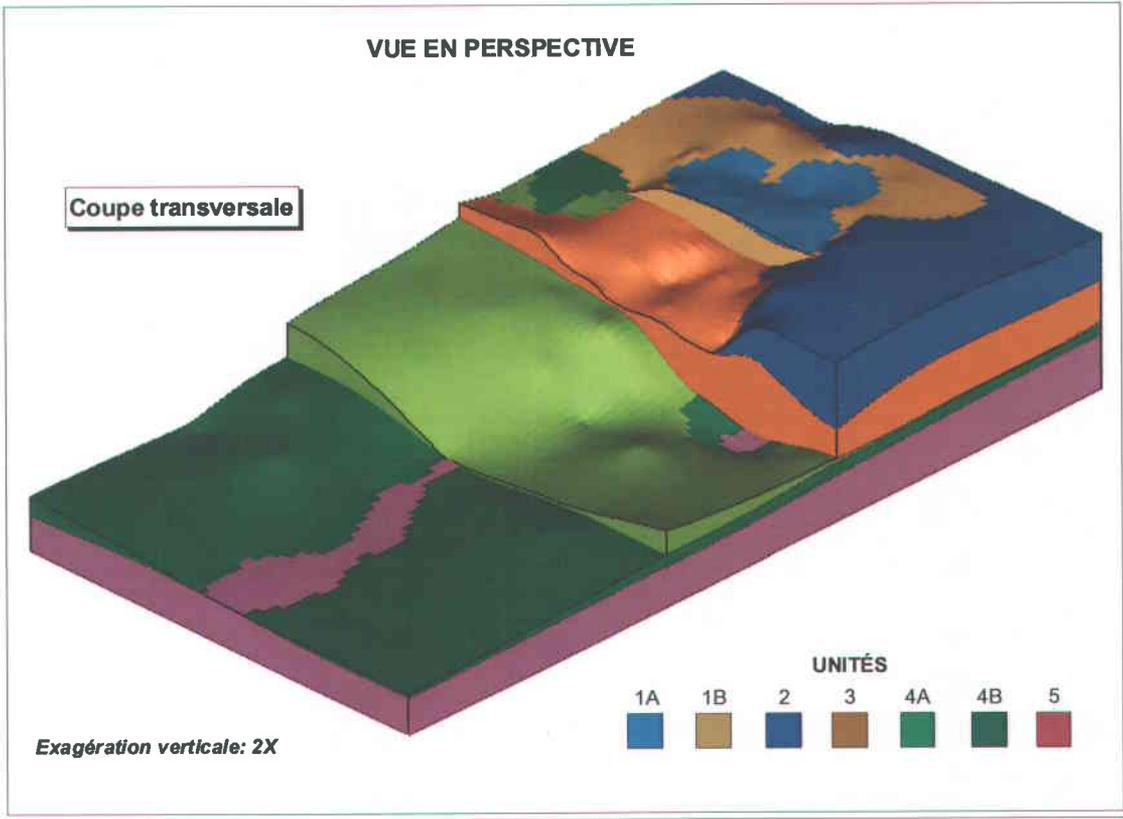
Figure 2.6 : Vue selon laquelle les figures 2.7 a, b et 2.9 sont présentées.
(Tirée d'un rapport confidentiel de l'INRS-ETE)

Les figures 2.7 a et b montrent des sections transversale et longitudinale à travers l'assemblage d'unités présent localement au site et illustrent les relations entre les unités. Ces figures mettent en évidence la variation de la section d'écoulement de l'eau souterraine dans l'unité 3 de sable et gravier qui résulte de la topographie accentuée de la surface des tills 4B et 4A ainsi qu'à la présence des unités argileuses 2B et 2A. Ces figures montrent l'existence de contacts directs entre les deux aquifères où les tills sont absents (fenêtres dans les tills). Ceux-ci permettent des échanges hydrauliques entre les unités 3 (sable et gravier) et 5 (roc).

Les anciennes lagunes sont recouvertes d'une couche de matériaux argileux de l'unité 1A, généralement de 0,5 à 2 m d'épaisseur. Le secteur des anciennes lagunes forme un "dôme" plus élevé que les terrains situés au nord, à l'ouest ou au sud. Des remblais

grossiers de l'unité 1B (principalement du sable et gravier) sont présents surtout dans le secteur des anciennes lagunes où ils représentent des anciennes digues ou du matériel de remplissage des anciennes lagunes.

Les matériaux argileux constituant les unités 2A et 2B entourent la zone d'étude et présentent des épaisseurs considérables principalement du côté est. La surface de l'unité 3 de sable et gravier présente des irrégularités qui résultent en partie de son exploitation en tant que gravière ainsi que des opérations reliées aux anciennes lagunes. Le till supérieur (unité 4A) recouvre généralement le till 4B et présente le même type de relief. La distribution du till 4A est cependant distincte du till 4B car l'élévation du till 4A remonte du côté est de la zone d'étude où il devient plus épais. Par contre, le till 4A s'amincit par endroits et est même absent au centre, au nord-est et au nord-ouest de la zone d'étude. La surface de l'unité 4A a la forme générale d'une "vallée" qui contient les épaisseurs les plus importantes de l'unité 3 de sable et gravier. Au centre de cette dépression, les unités 4B et 4A ne sont pas présentes sur l'ensemble de la surface du roc, de sorte que l'unité de sable et gravier se trouve par endroits directement en contact avec le roc. Ces fenêtres sont susceptibles d'avoir permis la migration initiale des contaminants immiscibles ou sous forme dissoute en provenance du sable et gravier vers le roc. La présence de ces fenêtres semble aussi affecter l'écoulement des eaux souterraines en réponse au pompage intensif à l'UTES. La surface du till inférieur (Unité 4B) présente un relief important. Le till 4B est très épais (jusqu'à 24 m) au nord-ouest de la zone d'étude locale et il possède une pente importante surtout vers l'est sous les anciennes lagunes et vers le sud en aval des anciennes lagunes. La surface du roc (Unité 5) est assez plane et présente quelques irrégularités, dont un bris de pente au milieu de la zone d'étude locale.



Figures 2.7 a et b : Vues en perspective de la distribution 3D des unités
 (Tirée d'un rapport confidentiel de l'INRS-ETE)

2.2.3 Piézométrie et écoulement dans l'unité 3 de sable et gravier

La figure 2.8 montre la piézométrie de la surface libre déterminée pour l'unité 3 de sable et gravier ainsi que les puits utilisés pour déterminer les niveaux d'eau. Également, il est indiqué sur cette figure le secteur, à l'est de la zone d'étude, où l'aquifère de l'unité 3 est captif (où le niveau piézométrique est plus élevé que la limite supérieure de l'unité 3). La zone sans contours de niveau d'eau dans le coin nord-ouest représente un secteur où l'unité 3 de sable et gravier est soit absente ou non saturée.

Les directions générales d'écoulement peuvent être déduites de la piézométrie de la figure 2.8. L'effet de la présence d'une zone épaisse de sable et gravier à l'est des anciennes lagunes est apparent à partir de la piézométrie. Le fort écoulement dans cette zone draine l'eau provenant du secteur ouest moins épais où se situent les anciennes lagunes. La piézométrie indique également que les eaux souterraines dans le sable et gravier en provenance des anciennes lagunes sont captées efficacement par les puits de pompage de l'UTES et que les contaminants émis dans cette unité ne dépassent sûrement pas ces puits. Cette conclusion est confirmée par les résultats de la modélisation numérique présentés au chapitre 3.

La figure 2.9 montre une vue isométrique de la section d'écoulement (l'intervalle saturé en eau est illustré en bleu pâle) dans l'unité 3 de sable et gravier. Considérant que le sable et gravier possède une conductivité hydraulique généralement élevée, l'épaisseur saturée indique directement la capacité relative d'écoulement de l'eau souterraine dans les différents secteurs de la zone d'étude. La figure 2.9 illustre que l'écoulement de l'eau souterraine est chenalisé à l'est des anciennes lagunes. Cet écoulement majeur draine les secteurs à l'ouest, donc les anciennes lagunes, tandis que le secteur à l'est de la zone d'étude contribue moins à l'écoulement dû à la diminution de l'épaisseur d'unités perméables. La figure 2.9 permet également de constater que la base des anciennes lagunes, contenant des remblais généralement contaminés de l'unité 1, est située dans la zone saturée.

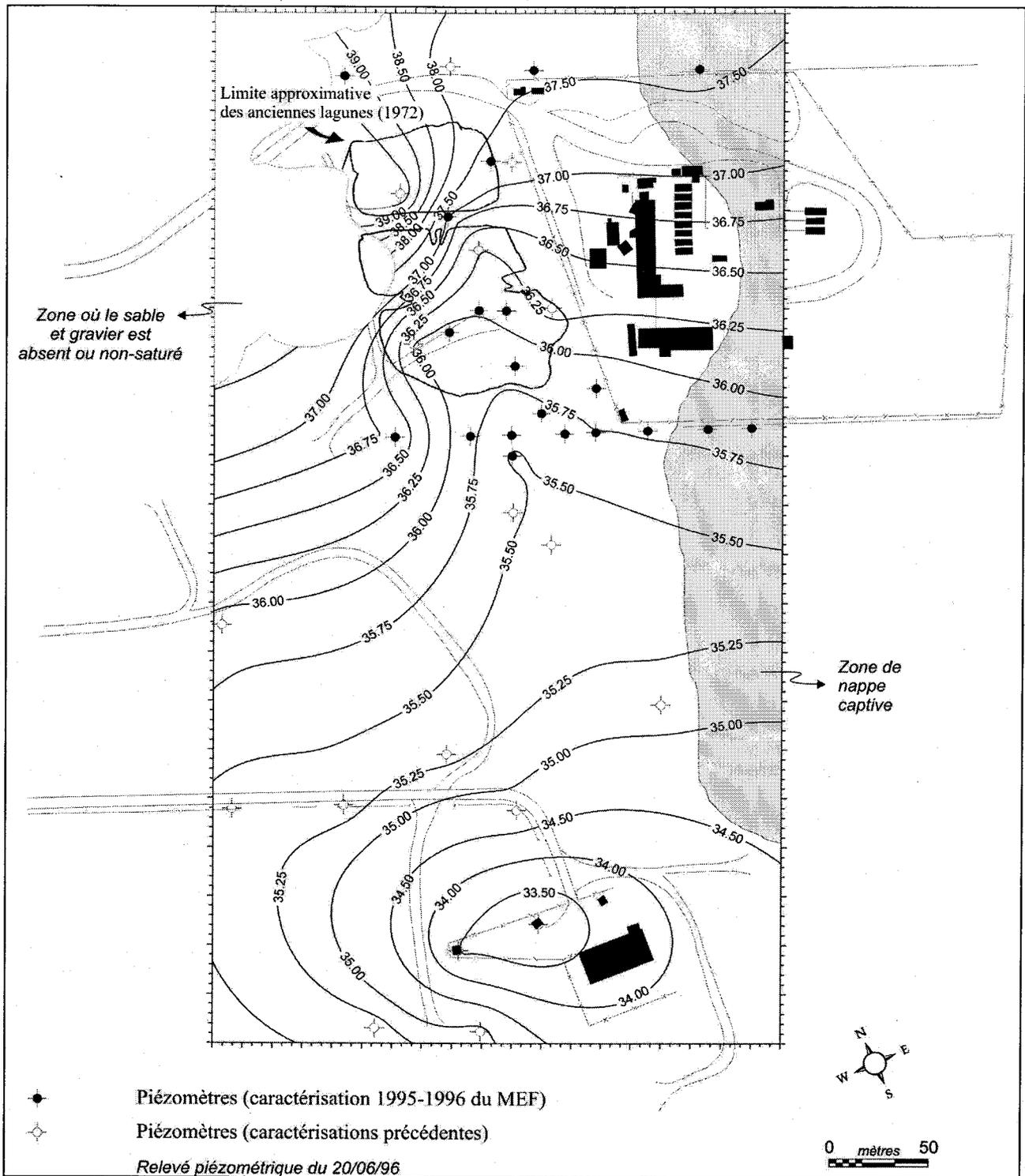


Figure 2.8 : Piézométrie dans l'unité de sable et gravier
 (Tirée d'un rapport confidentiel de l'INRS-ETE)

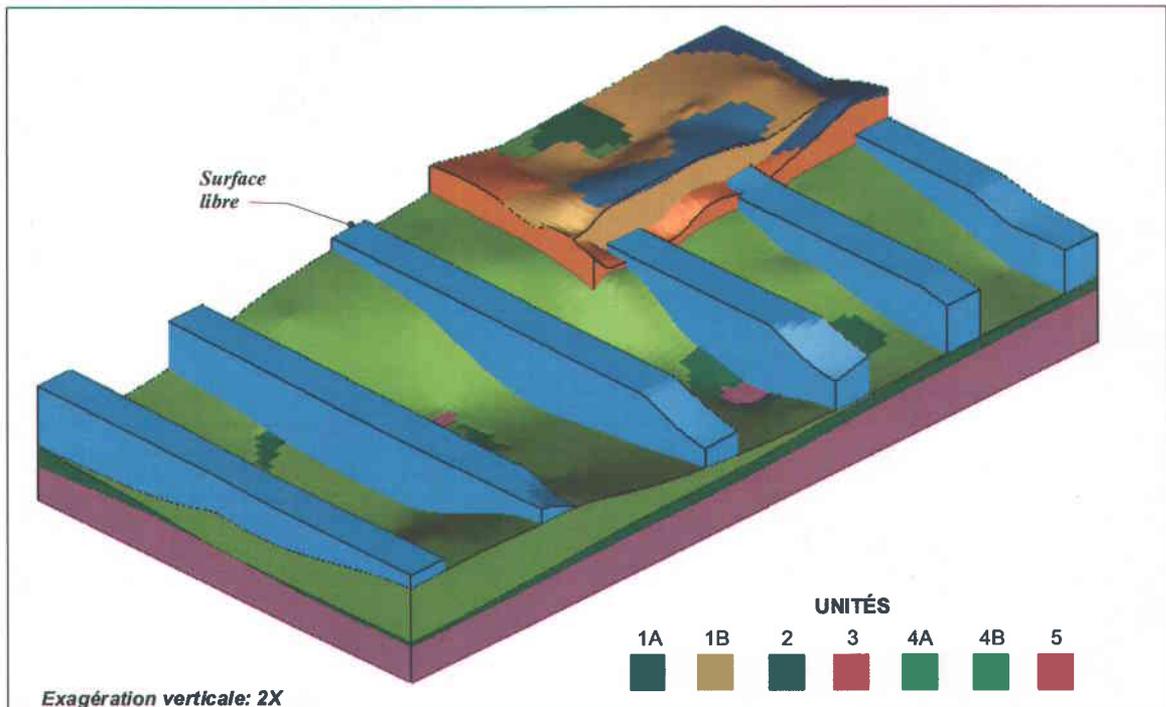


Figure 2.9 : Vue en perspective de la section d'écoulement dans l'unité de sable et gravier
(Tirée d'un rapport confidentiel de l'INRS-ETE)

Ceci implique que l'eau souterraine qui circule au niveau des anciennes lagunes entre directement en contact avec des remblais contaminés par des liquides immiscibles et se charge ainsi de contaminants dissous. Ce phénomène est illustré à la section suivante.

2.2.4 Migration des contaminants dissous dans l'eau souterraine

La figure 2.10 montre une carte approximative de la distribution des concentrations en contaminants dissous dans les anciennes lagunes et dans le panache d'eau contaminée de l'aquifère granulaire. Cette figure met aussi en relation les concentrations avec la piézométrie qui permet de déduire les directions d'écoulement. L'information disponible est assez dense pour les anciennes lagunes de sorte que les iso-contours de concentration sont interpolés. En aval des anciennes lagunes, il y a très peu de données disponibles de sorte que les contours approximatifs y sont dessinés manuellement.

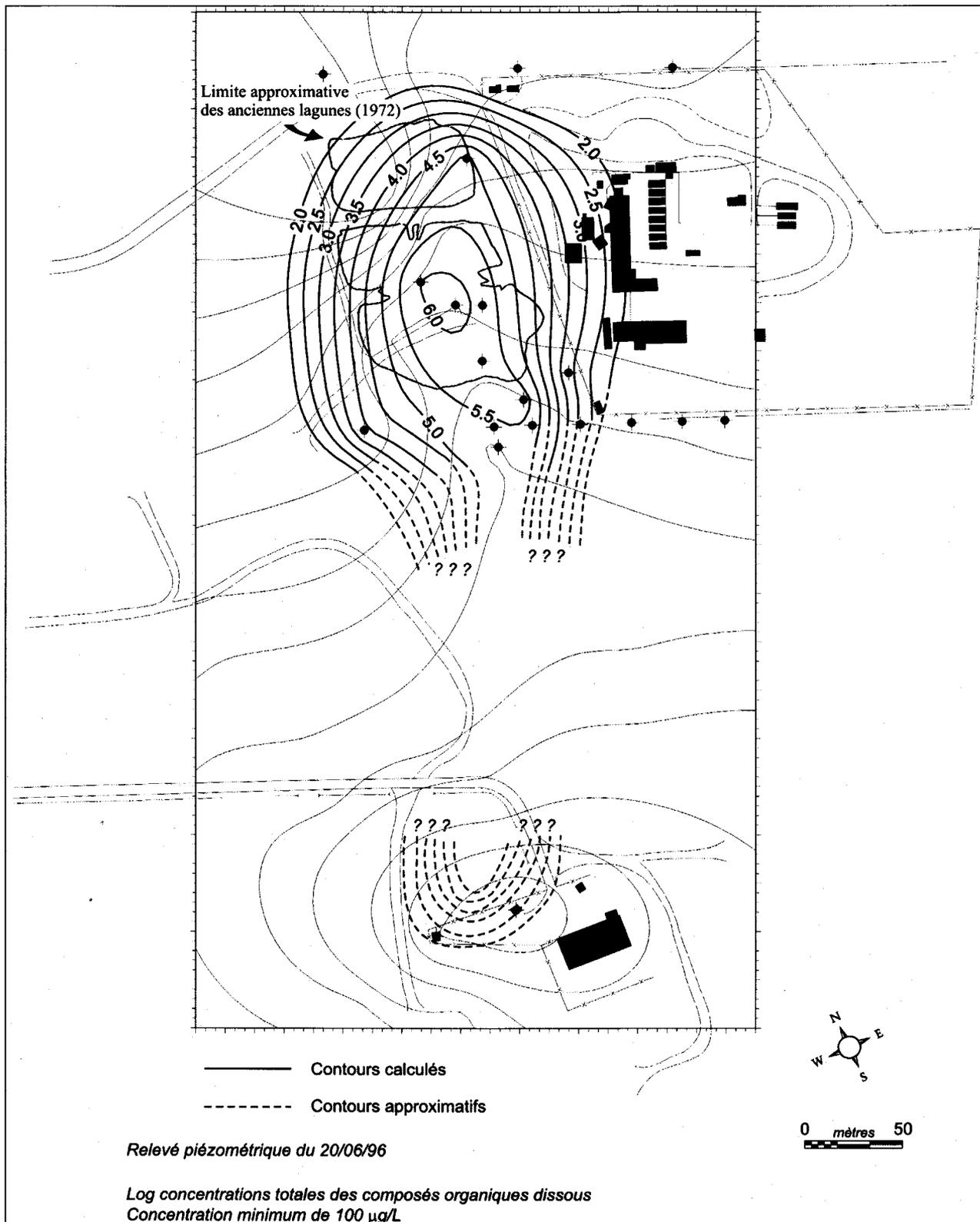


Figure 2.10 : Panache de contaminants dissous dans l'unité de sable et gravier
(Tirée d'un rapport confidentiel de l'INRS-ETE)

La figure 2.10 montre que la zone d'eau souterraine contaminée est assez large dans le secteur des anciennes lagunes. Cependant, les patrons d'écoulement confinent l'intervalle à travers lequel les contaminants peuvent migrer de sorte que le panache d'eau contaminée dans l'aquifère granulaire est relativement restreint. Ceci est confirmé par la coupe de la ligne des Z montrée à la figure 2.11. Bien que le panache d'eau contaminée de la figure 2.10 soit approximatif, il est possible de constater que l'aire d'alimentation des puits de captage de l'UTES englobe un secteur beaucoup plus large que le panache. Ceci implique que le piège hydraulique est sûrement efficace pour empêcher la migration de la contamination dans l'aquifère granulaire. Cependant, il y a beaucoup de dilution de l'eau provenant du panache avec de l'eau non contaminée de sorte qu'une très grande quantité d'eau doit être traitée pour extraire les contaminants captés.

Des forages stratigraphiques et des puits de surveillance ont été mis en place en aval des anciennes lagunes. Ces installations sont appelées « section des Z » en relation avec la nomenclature des puits qui sont situés à cet endroit.

La figure 2.11 montre les unités présentes à la section des Z de même que les concentrations totales en contaminants organiques dissous mesurées en 1995 à cet endroit. La section est présentée avec une exagération verticale de 5 fois pour permettre de bien visualiser la distribution des propriétés.

À la figure 2.11, l'unité 5, le roc, n'est atteinte que dans un forage de la section. La limite supérieure du roc peut cependant être facilement déduite des autres forages du secteur puisque son élévation est peu variable. L'unité de till 4B a une épaisseur très variable, allant de plus de 18 m à zéro. Cette unité constitue l'obstacle le plus important à la migration verticale de contaminants sous forme de liquide immiscible. Le till 4A recouvre le till 4B, mais son épaisseur est moindre variant entre 0 et 10 m. L'unité 3, constituée principalement de sable et gravier, comble les irrégularités de la topographie au-dessus du till 4A (ou 4B).

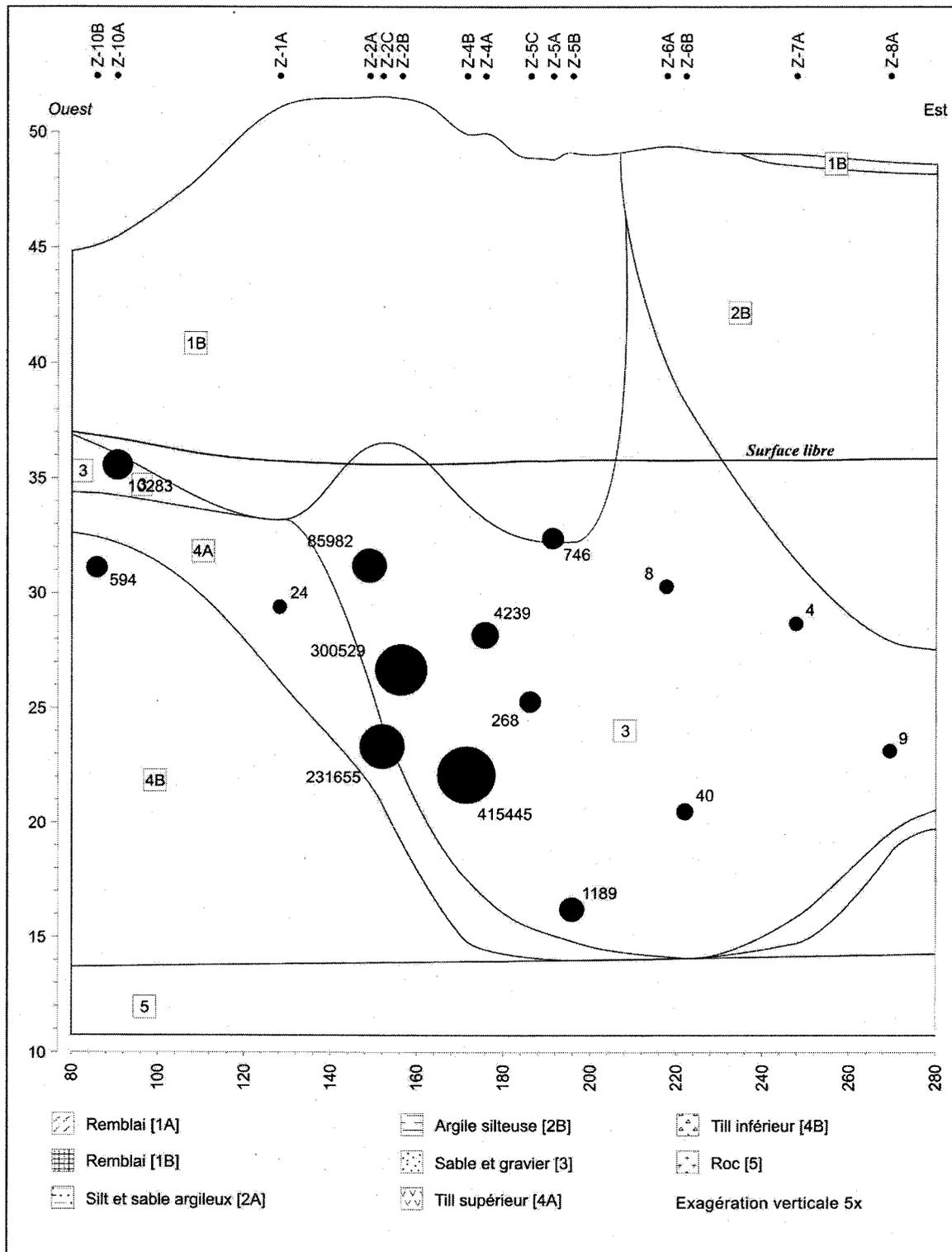


Figure 2.11: Concentrations totales en contaminants dissous en aval des anciennes lagunes

(Tirée d'un rapport confidentiel de l'INRS-ETE)

La caractérisation de 1995-1996 a mis en évidence une forte épaisseur de l'unité 3 se prolongeant vers l'est sous la propriété de l'incinérateur. Ceci constitue la voie principale d'écoulement de l'eau souterraine en marge des anciennes lagunes. L'unité 3 est recouverte par les argiles de l'unité 2 ou par les remblais de l'unité 1B qui comblent ou entourent les anciennes lagunes. L'unité 2 argileuse atteint la surface à l'est des anciennes lagunes et recouvre le sable et gravier à une profondeur s'amplifiant vers l'est. Les matériaux remaniés qui forment les digues des anciennes lagunes ou les comblent ont une épaisseur importante dans la section des Z variant entre 8 à 16 m.

Des analyses de concentrations totales en contaminants volatils et semi-volatils dissous ont été réalisées sur des échantillons d'eau prélevés dans les puits d'observation de la ligne des Z en 1995-1996. Les résultats de ces analyses ont été quantifiés par les méthodes analytiques EPA624 et EPA625. La figure 2.11 montre les concentrations totales en contaminants dissous et illustre les différences de concentrations par des cercles de tailles proportionnelles. Les fortes concentrations sont limitées à la partie ouest de la section d'écoulement, soit sous les anciennes lagunes et au contact du rehaussement du till. Cette distribution s'explique par le fait que l'eau souterraine dans la partie est de la section d'écoulement provient d'eau non contaminée de l'amont des anciennes lagunes qui a été faiblement mise en contact avec les contaminants dissous ou immiscibles près des anciennes lagunes. Les contaminants dissous présents sous les anciennes lagunes sont en fait entraînés en bordure de la section d'écoulement par l'eau y circulant vers le sud.

2.3 Contraintes associées aux contextes du site

Afin d'évaluer l'applicabilité des technologies de réhabilitation des aquifères contaminés au site des anciennes lagunes de Ville-Mercier, il est nécessaire de considérer les contraintes associées au site: 1) anthropiques, 2) géologiques, 3) hydrogéologiques, et 4) associées à la contamination. Ces contraintes, définies à partir des données du modèle conceptuel, sont considérées dans l'élaboration de concepts de solution préliminaires au chapitre 5. Ces contraintes sont discutées dans les prochaines sections.

2.3.1 Contraintes anthropiques

Dans la zone à l'étude, six contraintes anthropiques sont à considérer dans l'élaboration de stratégies d'application des technologies de contrôle (Figure 2.12) :

- Les zones d'exploitation de l'eau souterraine réglementées par le ministère de l'environnement du Québec (MENV);
- Les terrains agricoles adjacents;
- Les propriétés privées situées dans la zone d'étude autres que celles gouvernementales;
- L'enceinte des infrastructures de l'incinérateur;
- L'usine de traitement de l'eau souterraine (UTES); et
- Les trois puits du MENV reliés à l'UTES.

2.3.1.1 Les zones d'exploitation de l'eau souterraine réglementées par le MENV

Afin que le pompage dans l'aquifère local et régional ne vienne pas perturber le piège hydraulique contrôlant les panaches d'eau contaminée de Ville-Mercier, une zone d'exclusion et plusieurs zones restrictives de pompage dans l'aquifère régional ont été délimitées dans la région de Mercier (MENV, 2002). Ces règles d'exploitation permettent, entre autres, d'assurer la stabilité des conditions d'écoulement dans les aquifères (Pontlevoy et Lefebvre, 2002).

2.3.1.2 Les terrains agricoles adjacents

Les terrains agricoles adjacents à la zone d'étude sont des propriétés privées. L'implantation d'infrastructures de contrôle sur ces terrains peut impliquer une compensation financière au propriétaire ou l'achat du terrain requis. Dans le cas d'une location du terrain, l'accès peut être limité et des mesures de protection des infrastructures doivent être instaurées.

2.3.1.3 Les propriétés situées dans la zone d'étude autres que celles du MENV et de la municipalité

Les désavantages sont les mêmes que ceux mentionnés pour les terrains agricoles adjacents.

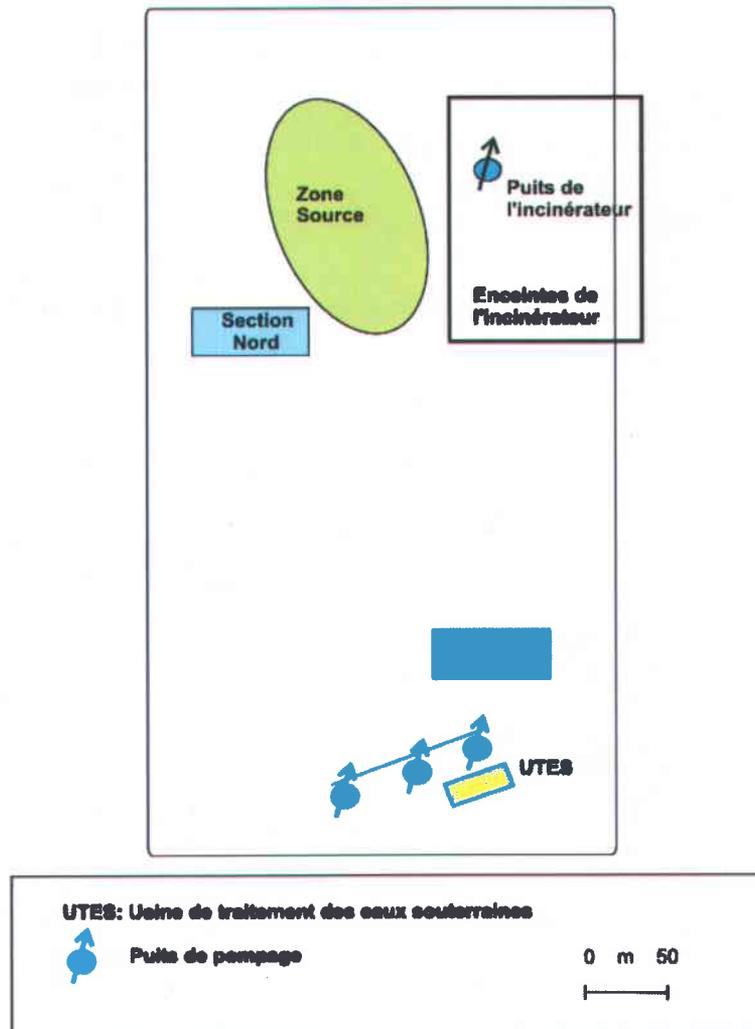


Figure 2.12 : Contraintes anthropiques

2.3.1.4 L'enceinte des infrastructures de l'incinérateur

L'enceinte des infrastructures de l'incinérateur comporte, en tout, une vingtaine de bâtiments. De ce fait, l'emplacement des bâtiments existants doit être considéré dans la localisation possible d'installations nouvelles. L'accès au terrain est limité et l'utilisation du terrain peut engendrer des frais. Advenant le cas où l'implantation d'infrastructures nécessite un arrêt des opérations de l'incinérateur, des compensations financières peuvent avoir à être versées au propriétaire.

2.3.1.5 L'usine de traitement de l'eau souterraine (UTES)

Les installations et les équipements de l'UTES peuvent éventuellement être réutilisés ou rénovés pour servir ou compléter de nouvelles infrastructures de contrôle.

2.3.1.6 Les trois puits du MENV

L'âge, la localisation et le type d'installation des puits du MENV limitent grandement la possibilité de les réutiliser pour une intervention de contrôle future. Tous ces puits âgés de vingt ans et plus ont été implantés dans un des contacts directs des aquifères granulaire et de roc fracturé (selon nos travaux antérieurs) et le pompage de ces puits sollicite les deux aquifères. Ce type d'installation limite grandement la possibilité d'utiliser ces puits pour un pompage spécifique dans l'un ou l'autre des aquifères.

2.3.2 Contraintes géologiques

Les quatre contraintes géologiques qui sont à considérer dans l'élaboration de stratégies d'application des technologies de contrôle et traitement sont les suivantes (voir figure 2.13):

- Le talus dans la topographie du roc (faille possible);
- L'épaisseur de till compact;
- Les contacts directs entre les aquifères granulaire et de roc fracturé à travers les fenêtres dans les tills; et
- La morphologie de la section d'écoulement dans l'aquifère granulaire (Figure 2.13).

2.3.2.1 Le talus dans la topographie du roc (faille possible)

Au centre de la zone à l'étude, selon une orientation est-ouest, la présence d'un talus dans la topographie du roc crée deux paliers d'élévation différente dans la surface du roc sous-jacent aux dépôts meubles. Le palier Nord possède une élévation moyenne de 14.5 m et le palier Sud présente une élévation moyenne de 12 m. La linéarité de ce talus suggère la présence possible d'une faille dans le roc à cet endroit. Cette structure géologique peut

jouer un rôle important dans l'écoulement et la migration possible des contaminants provenant des anciennes lagunes.

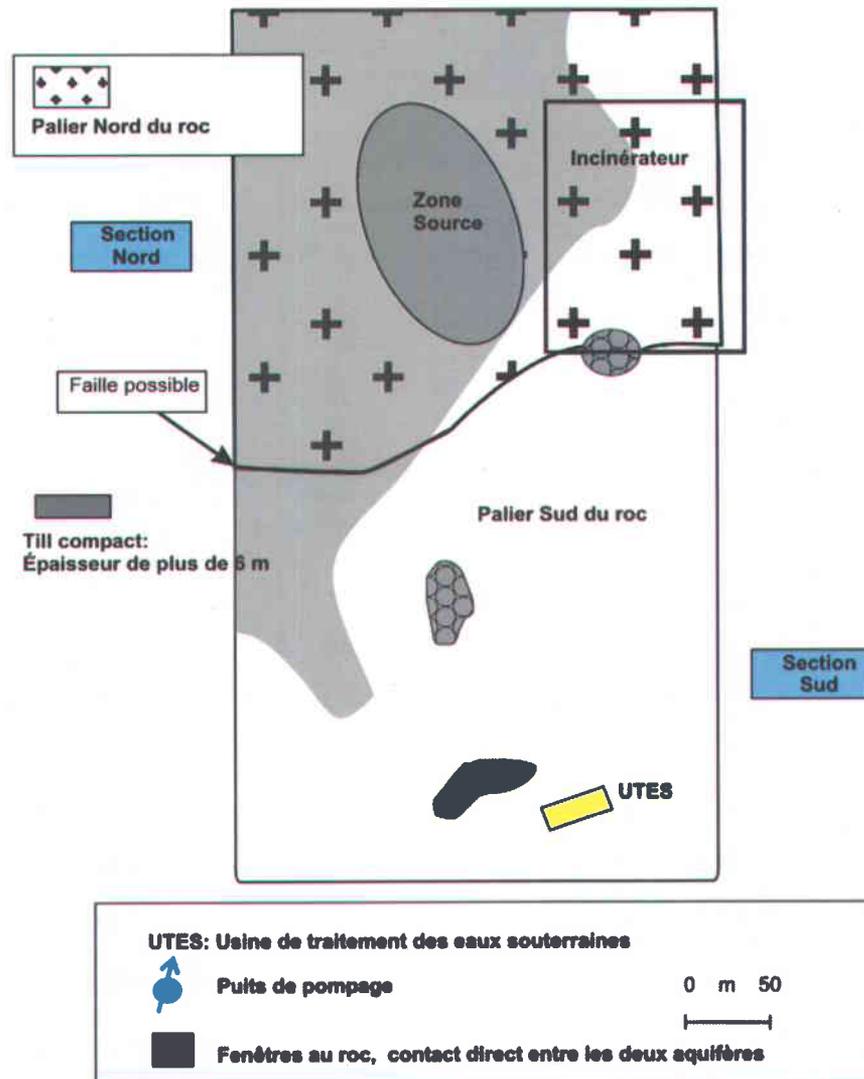


Figure 2.13 : Contraintes géologiques

2.3.2.2 L'épaisseur de till compact

Dans le nord-ouest de la zone à l'étude, le till compact possède une épaisseur substantielle, soit environ 6 m et plus (selon nos travaux antérieurs). La présence de ce till peut servir d'assise à des technologies de contrôle. Dans le choix de l'emplacement de nouvelles structures éventuelles, l'épaisseur variable de ce dépôt doit être prise en considération.

2.3.2.3 Les contacts directs entre les aquifères granulaire et de roc fracturé (fenêtres dans les tills)

À certains endroits dans la zone à l'étude, l'absence des unités de till compact et de till lâche crée des contacts directs (fenêtres) entre l'aquifère granulaire et l'aquifère de roc fracturé, où des échanges hydrauliques se produisent (selon nos travaux antérieurs). Au nord du site, il existe un de ces contacts tandis qu'au sud deux autres fenêtres ont été identifiées. Il est possible que d'autres fenêtres non identifiées soient présentes. De ce fait, une caractérisation complémentaire est nécessaire pour évaluer la continuité des unités de till à la surface du roc.

2.3.2.4 La morphologie de la section d'écoulement dans l'aquifère granulaire

La section d'écoulement dans l'aquifère granulaire possède une épaisseur variant de 14 à 22 m (généralement 20 m) de sables et graviers saturés. Elle est chenalisée (largeur de 100 m) au nord de la zone d'étude en dessous des infrastructures de l'incinérateur, où elle contourne le dépôt épais de till compact. Au centre sud du secteur, l'épaisseur du till compact devient inférieure à 6 m et la section d'écoulement s'élargie pour atteindre une largeur d'environ 230 m (selon nos travaux antérieurs). Le positionnement d'éventuelles infrastructures de contrôle physique ou hydraulique du panache d'eau contaminée dans l'aquifère granulaire doit tenir compte de la morphologie de la section d'écoulement. La figure 2.13 présente les limites de l'unité de till compact, tandis que la morphologie de la section d'écoulement dans l'aquifère granulaire est montrée à la figure 2.14.

2.3.3 Contraintes hydrogéologiques

Au niveau hydrogéologique, les contraintes majeures qui sont à considérer dans l'élaboration de solutions de contrôle et de traitement des panaches d'eau contaminée de Ville-Mercier sont les suivantes (voir figure 2.14):

- Les patrons d'écoulement propres aux deux aquifères; et
- Les infrastructures de pompage et les variations de débit.

2.3.3.1 Les patrons d'écoulement propres aux deux aquifères

Les deux aquifères présentent des patrons d'écoulement distincts. La direction d'écoulement, la conductivité hydraulique, les vitesses d'écoulement et la transmisivité, entre autres, diffèrent pour les deux aquifères (selon nos travaux antérieurs, voir aussi les sections 2.1.2 et 2.2.3).

Dans le cas de l'aquifère granulaire, les propriétés physiques mentionnées précédemment sont assez bien définies. Toutefois, dans l'aquifère de roc fracturé, celles-ci sont mal connues dû à la faible densité de forages et de mesures au roc dans le secteur des anciennes lagunes.

2.3.3.2 Les infrastructures de pompage et les variations de débit

Les variations dans le débit de pompage des différentes infrastructures existantes telles que le puits au roc de l'incinérateur, les puits de l'UTES et ceux des agriculteurs qui possèdent des ententes avec le MENV ne doivent pas être permises sans avertissement au préalable (MENV, 2002). Cependant, tous les effets d'une variation de pompage dans la zone à l'étude sont considérés dans l'élaboration de stratégies d'application de technologies de contrôle. Entre autres, des variations de débit de pompage peuvent changer les conditions d'échange hydraulique entre l'aquifère régional et la rivière Esturgeon (Pontlevoy et Lefebvre, 2002).

Dans le cas d'une diminution du débit de pompage dans l'aquifère granulaire, il y a une possibilité que les zones sources soient envoyées suite à 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 augmentés. Le pompage de l'eau souterraine dans la partie sud du site, comme à l'UTES, engendre un écoulement latéral venant de l'ouest (selon nos travaux antérieurs). Cet apport supplémentaire d'eau non contaminée dilue les concentrations en contaminants dissous des panaches et augmente le volume d'eau à traiter. Des mesures de contrôle de l'eau non contaminée doivent être considérées dans l'élaboration de stratégies de contrôle des panaches d'eau contaminée de Ville-Mercier.

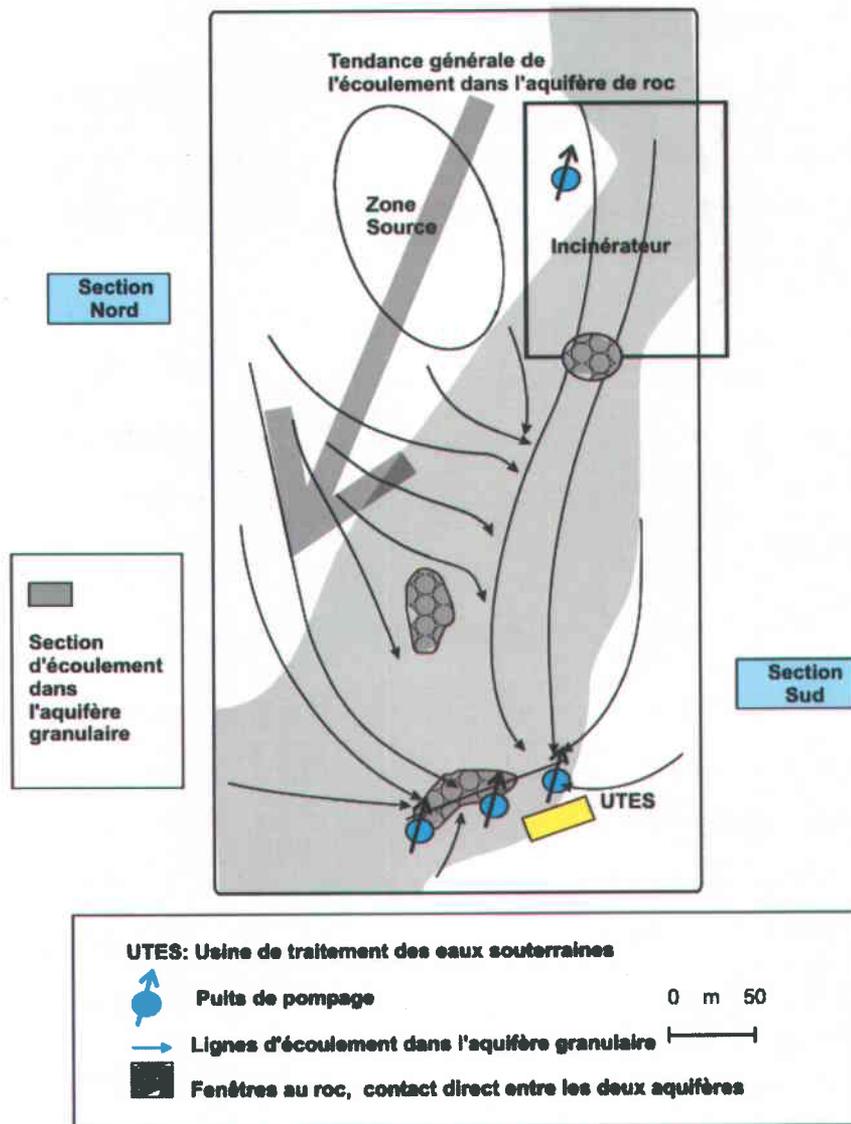


Figure 2.14 : Contraintes hydrogéologiques

Dû à la présence de fenêtres dans les tills, des échanges hydrauliques se produisent entre les deux aquifères. La présence de ces fenêtres implique que les deux aquifères ne sont pas des systèmes hydrauliques indépendants. L'écoulement et le niveau des charges hydrauliques dans ces deux aquifères s'influencent donc mutuellement. En conséquence, un pompage unique ou plus important dans l'aquifère granulaire engendre un écoulement de l'eau souterraine de l'aquifère de roc fracturé vers l'aquifère granulaire par le biais des fenêtres dans les tills. À l'inverse, un pompage unique ou plus élevé dans l'aquifère de roc fracturé peut engendrer des écoulements vers le bas à travers ces mêmes fenêtres.

L'arrêt possible de l'UTES et des puits de pompages, suite à la mise en place de nouvelles infrastructures de contrôle, doit considérer une période transitoire pour résorber le panache d'eau contaminée dans l'aquifère granulaire existant entre le point d'émission, aux anciennes lagunes, et son aboutissement présent aux puits de l'UTES.

Un des plus grands défis dans la conception de nouvelles infrastructures de contrôle est la prédiction adéquate des échanges entre l'aquifère granulaire et de roc fracturé suite aux changements du régime de pompage. Les modélisations du chapitre 6 montrent les effets transitoires suite à la mise en place des infrastructures envisagées pour le contrôle des panaches d'eau contaminée de Ville-Mercier.

2.3.4 Contraintes associées à la contamination

Les contraintes associées à la contamination sont nombreuses et complexes. Certaines de ces contraintes sont mal définies et doivent faire l'objet de caractérisation complémentaire ou d'observations attentives lors d'une phase pilote. Les contraintes associées à la contamination sont les suivantes (Figure 2.15) :

- 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.

2.3.4.1 Spécificité des zones sources dans les aquifères granulaire et de roc fracturé et les types de contaminants présents

Les zones sources situées dans les aquifères granulaire et de roc fracturé sont considérées comme étant des sources d'émission à très long terme. Les technologies de réhabilitation

envisagées pour le contrôle et le traitement des panaches d'eau contaminée de Ville-Mercier doivent donc être robustes et durables, conçues pour être en place à long terme (au moins 20 ans). La variété des contaminants organiques lourds et légers retrouvée dans les zones sources ainsi que les masses totales de contaminants en présence constituent des contraintes importantes qui doivent être considérées dans le choix des technologies de réhabilitation.

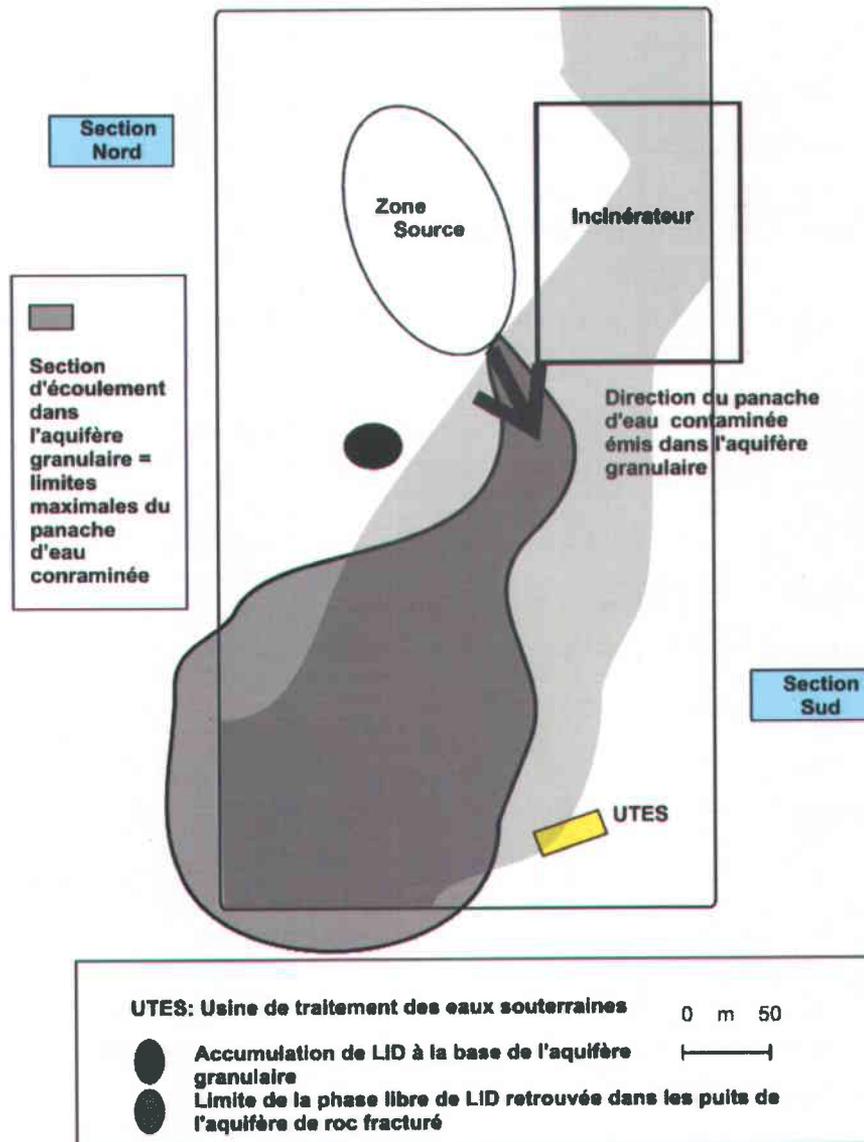


Figure 2.15 : Contraintes associées à la contamination

2.3.4.2 L'étendue des liquides immiscibles denses (LID) et légers (LIL) dans les aquifères granulaire et de roc fracturé

La compréhension de l'étendue des LIL et LID dans les aquifères granulaire et de roc fracturé dans la zone à l'étude est essentielle à l'élaboration de stratégies d'application des technologies de contrôle. Une caractérisation complémentaire est nécessaire pour pallier le manque de connaissance à ce niveau. Dans l'aquifère granulaire, entre les zones sources et l'UTES, aucune phase libre n'a été détectée. Ceci est dû principalement à la faible densité de forage dans cette zone. Également, la faible densité de forage dans l'aquifère de roc fracturé limite la définition de l'étendue des LID.

2.3.4.3 La présence d'une accumulation de LID en aval de la zone source dans l'aquifère granulaire

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 (selon nos travaux antérieurs). 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 les stratégies de contrôle.

2.3.4.4 Les panaches d'eau contaminée dans les aquifères granulaire et de roc fracturé

Les limites des panaches d'eau contaminée dans les aquifères granulaire et de roc fracturé sont méconnues. Certaines approximations peuvent être réalisées dans l'élaboration de stratégies de contrôle. Toutefois, une caractérisation complémentaire est nécessaire.

Dans l'aquifère granulaire, la profondeur, largeur et longueur du panache ont été comparées aux dimensions physiques de l'unité fluvio-glaciaire. De ce fait, la profondeur maximale du panache d'eau contaminée considérée dans l'élaboration de stratégies d'interception est de 28 à 32 m (selon nos travaux antérieurs).

Dans l'aquifère de roc fracturé, la profondeur du panache est considérée similaire à la profondeur de l'aquifère et la limite aval de la zone source est définie par la présence de LID dans les puits au roc au sud du site.

2.3.4.5 Les changements d'émission des zones sources dans l'aquifère granulaire en fonction des conditions d'écoulement

Précédemment, il a été mentionné que la diminution du débit de pompage dans l'aquifère granulaire peut potentiellement envoyer les zones sources présentes. De ce fait, un plus grand volume d'eau est mis en contact avec les zones sources et des changements d'émission de contaminants dans l'eau souterraine peuvent survenir. Si les conditions physico-chimiques du panache d'eau contaminée dans l'aquifère granulaire changent, ceci a plusieurs implications sur l'applicabilité des technologies de contrôle et de traitement.

2.3.4.6 Le grand volume d'eau contaminée emmagasiné dans les anciennes lagunes

Les matériaux de remblais présents dans la zone source des anciennes lagunes possèdent une capacité d'emmagasinement en eau élevée (selon nos travaux antérieurs). Le remblai est hétérogène et des lentilles de matériaux peu perméables créent des nappes perchées où l'eau d'infiltration est mise en contact avec la zone source des anciennes lagunes (selon nos travaux antérieurs). Cette eau présente des concentrations en contaminants organiques dissous plus élevées que celles retrouvées dans le panache d'eau contaminée de l'aquifère granulaire. Les nappes perchées étant des systèmes ouverts, l'eau contaminée s'échappe et rejoint la nappe d'eau souterraine dans l'aquifère granulaire. Pour contrer cet apport, le pompage de l'eau contenue dans les nappes perchées à l'aide de puits installés à cette fin est une option à envisager dans les stratégies de contrôle et de traitement des panaches d'eau contaminée de Ville-Mercier. Un tel pompage peut diminuer considérablement la masse de contaminants dissous présents dans une phase mobile (l'eau) et peut « stabiliser » les émissions provenant des anciennes lagunes. Toutefois, les LID et LIL contenus dans les anciennes lagunes seront mis en contact avec l'air du sol et une phase gazeuse de contaminants existera possiblement. Dans un tel cas, des mesures de captage des gaz contaminés dans les anciennes lagunes devront être également considérées.

2.4 Synthèse des contraintes

L'annexe A présente un résumé des contraintes pour la mise en œuvre d'un système de contrôle et traitement des panaches d'eau contaminée de Ville-Mercier. La compilation en annexe spécifie la durée de l'impact des contraintes ainsi que leur effet (avantage/désavantage) sur le contrôle et le traitement des panaches. Aussi, tel qu'indiqué dans la compilation, certaines de ces contraintes peuvent faire l'objet de caractérisations complémentaires.

L'aspect temporel de l'impact des contraintes, montré dans les tableaux de l'annexe A, est divisé en trois périodes de temps distinctes, soit les effets à court, moyen et long terme :

- Court terme (1 an et moins);
- Moyen terme (entre 1 à 5 ans environ), correspond au temps nécessaire à la résorption du panache d'eau contaminée dans l'aquifère granulaire entre les zones sources et l'UTES;
- Long terme (5 ans et plus).

Généralement, les contraintes du site présentent des effets à long terme qui sont considérés dans l'élaboration de stratégies d'application de technologies de contrôle, puisqu'elles font référence aux contextes physiques du site. Ces contextes ne sont pas susceptibles de changer à long terme.

Les contraintes qui présentent une durée d'impact variable sont surtout liées aux infrastructures de pompage et de traitement des eaux souterraines et leurs effets transitoires associés. Toutefois, la durée d'impact de certaines contraintes doit être spécifiée par des travaux de caractérisation complémentaire.



CHAPITRE 3

MODÈLE NUMÉRIQUE D'ÉCOULEMENT

Ce chapitre reprend les travaux M.Sc d'Olivier Pontlevoy (2004) qui ont été réalisés dans le cadre de cette étude. Le modèle conceptuel du site (Chapitre 2) a été intégré dans deux modèles numériques d'écoulement local et régional afin de permettre une meilleure compréhension de la dynamique des aquifères granulaire et de roc fracturé présents au site des anciennes lagunes de Ville-Mercier. Dans le processus de sélection, seul le modèle numérique d'écoulement local est considéré puisqu'il met une emphase particulière sur les liens qui relient les deux aquifères. Suite à la réalisation du modèle d'écoulement local, le traçage de particules a permis de simuler les conditions d'écoulement qui ont prévalu avant l'opération de l'UTES de même que l'impact des puits sur les conditions hydrauliques actuelles rencontrées sur le site. Ces simulations constituent des références pour les simulations réalisées au chapitre 6 qui déterminent les conditions efficaces d'opération des technologies sur le site. Ce chapitre présente uniquement les informations nécessaires à la compréhension du cheminement logique du processus de sélection. La figure 3.1 montre à quelle étape du processus correspond le modèle numérique d'écoulement local.

3.1 Modèle numérique d'écoulement local

Dans cette section, les aspects suivants du modèle numérique d'écoulement local sont discutés.

- Logiciel utilisé ;
- Limites du modèle ;
- Maillage ;
- Constitution du modèle en trois dimensions (3D) ;
- Calage du modèle.

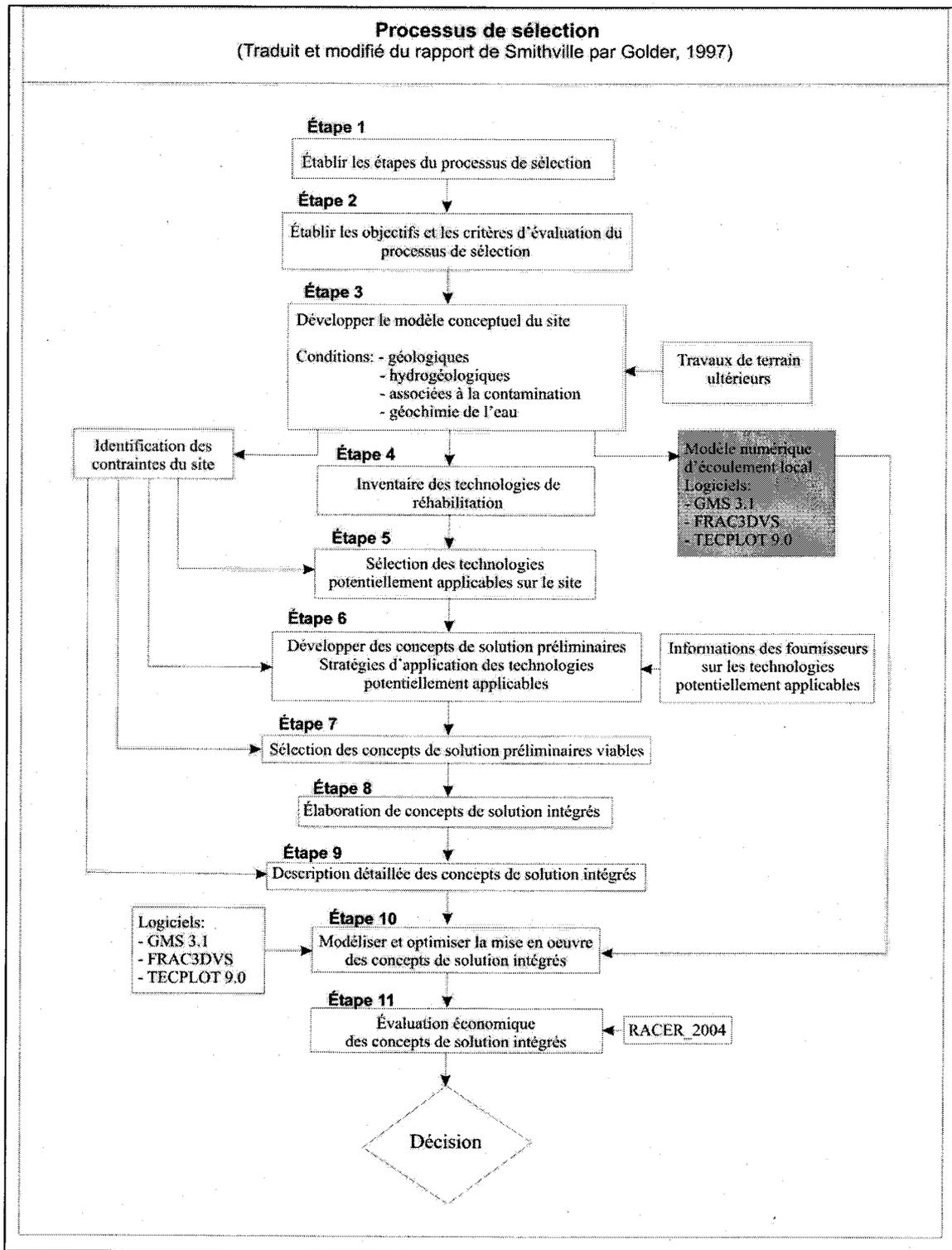


Figure 3.1 : Processus de sélection : Modèle numérique d'écoulement local

3.1.1 Logiciel utilisé

Le simulateur numérique FRAC3DVS (Therrien et Sudicky, 1996) permet de simuler l'écoulement en trois dimensions à saturation variable, en différences finies ou en éléments finis. Ce simulateur permet aussi la simulation du transport de masse en trois dimensions dans un milieu poreux à saturation variable en solutionnant l'équation d'advection dispersion.

3.1.2 Limites du modèle

La zone d'étude couvre approximativement 19 km². Dans ce modèle, les limites imposées au roc ont été établies à partir des résultats de la simulation de l'écoulement régional dans l'aquifère de roc fracturé (Pontlevoy et Lefebvre, 2002). Ainsi, les isopièzes 44 m et 34 m ont été choisis comme limites est et ouest du modèle (Figure 3.2). Les tracés de la limite sud et de la partie ouest de la limite nord ont été faits perpendiculairement aux courbes piézométriques du roc. Enfin, la partie est de la limite nord créant une saillie à la zone modélisée correspond à la ligne de partage des eaux dans l'aquifère granulaire. Ces limites ont été fixées suffisamment éloignées des puits de l'UTES et du puits de l'incinérateur afin de minimiser toute interaction entre les conditions établies à ces puits et celles imposées aux limites du modèle.

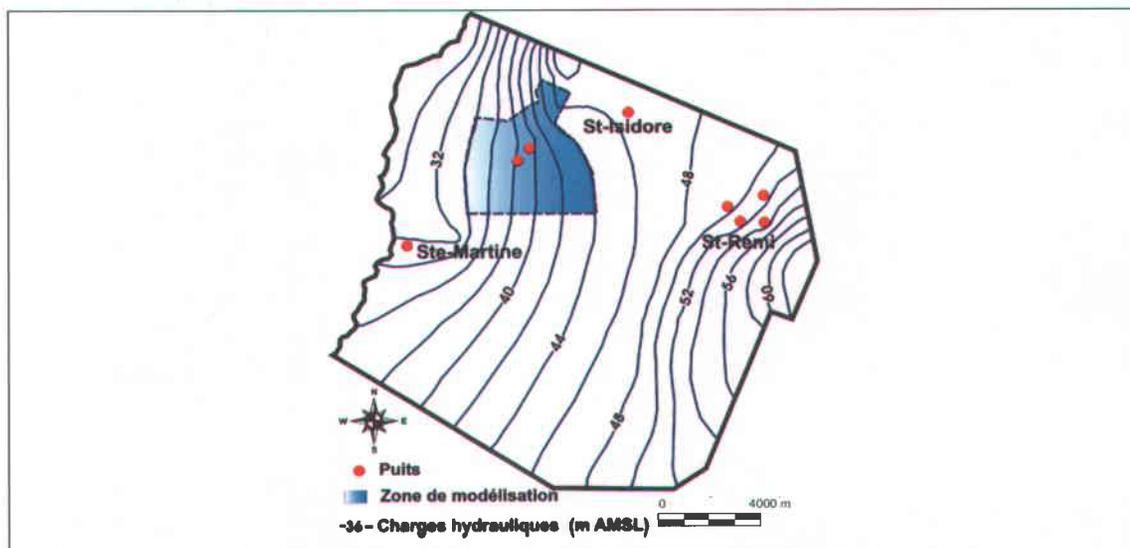


Figure 3.2: Carte de la piézométrie simulée dans le roc
(Pontlevoy et Lefebvre, 2002)

3.1.3 Maillage

Le maillage 2D de la zone à modéliser qui a été généré se compose de 4 688 nœuds et de 9 308 éléments (Figure 3.3). Il est grossier en bordure et va en s'affinant en direction du site des anciennes lagunes. La discrétisation est très fine au niveau des puits de l'UTES, du puits de l'incinérateur et des fenêtres présentes dans les tills. Le maillage 3D qui a été développé en ajoutant des couches représentant les différentes unités géologiques au maillage 2D se compose de 196 896 nœuds et 381 628 éléments.

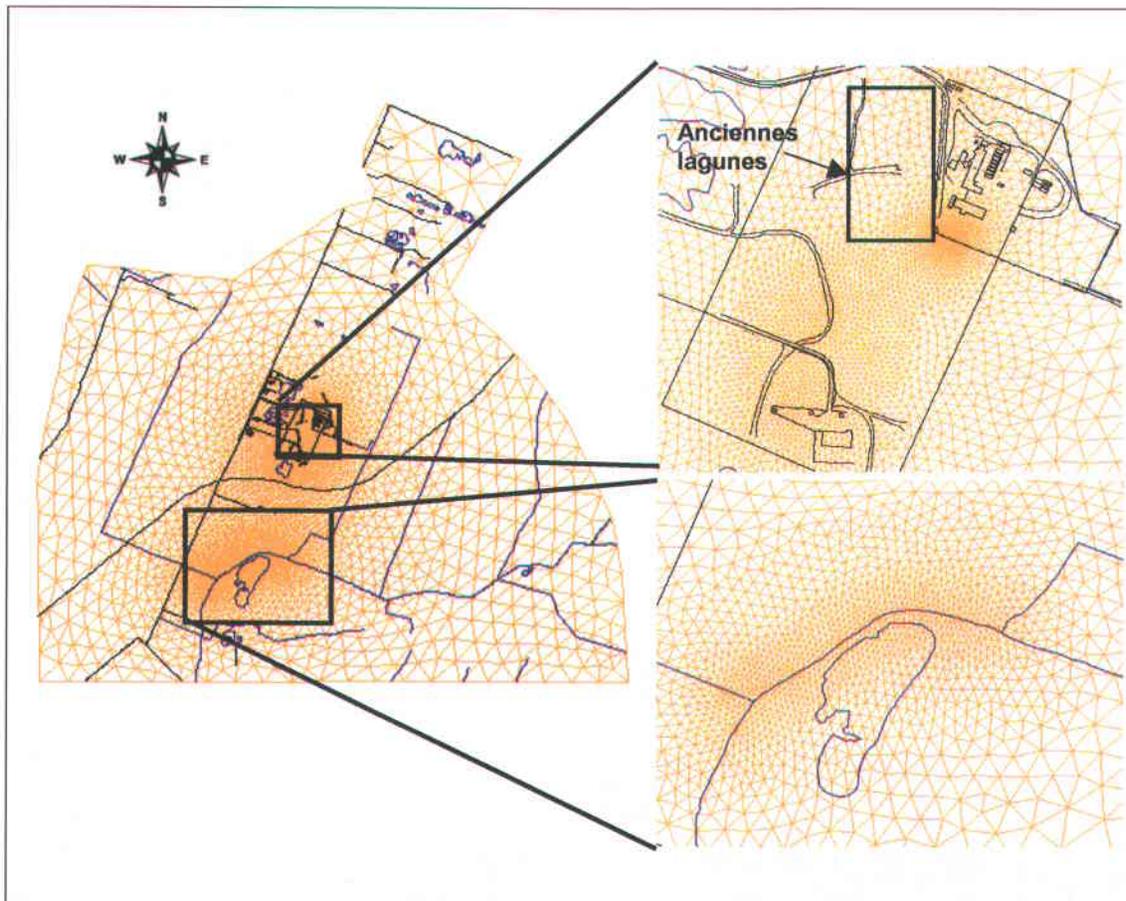


Figure 3.3 : Maillage 2D de la zone de modélisation (Pontlevoy, 2004)

3.1.4 Constitution du modèle en trois dimensions (3D)

Le modèle géologique 3D (Figure 3.4) a été généré à partir des données stratigraphiques détaillées provenant des puits d'observation présents sur la zone d'étude.

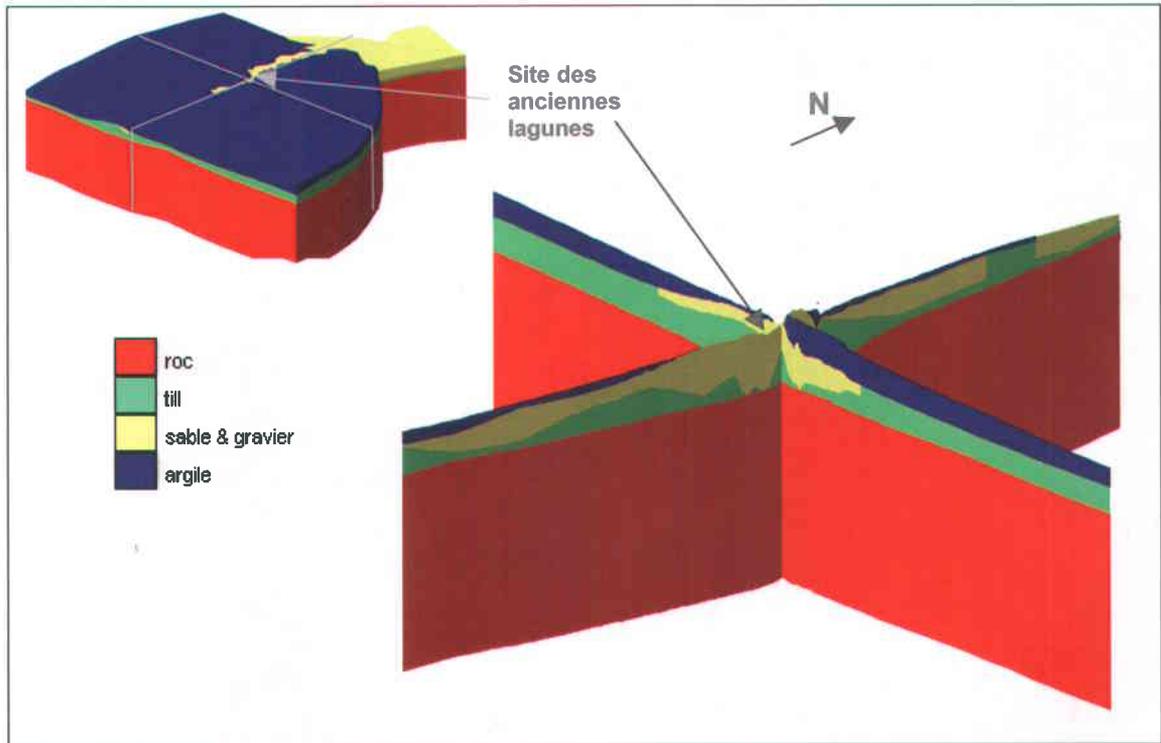


Figure 3.4 : Modèle géologique en trois dimensions (Pontlevoy, 2004)

Ce modèle est très bien caractérisé au niveau des anciennes lagunes mais beaucoup moins bien en périphérie en raison du peu de forages présents à l'extérieur de l'enceinte des anciennes lagunes. Le modèle 3D a été généré à l'aide du logiciel GMS 3.1 (BYU, 2000) qui permet de créer un maillage à partir duquel les élévations sur la zone d'étude sont interpolées par krigeage ordinaire. Quatre couches aux propriétés hydrogéologiques différentes ont été considérées (Figure 3.5), soit trois couches pour les dépôts meubles et une pour le roc. De la base au sommet du modèle, il y a respectivement le roc, le till, le sable et gravier et l'argile. Une épaisseur de 100 m est imposée au roc qui est subdivisé en 18 sous-couches. De la base au sommet du roc, il y a 5 couches de 10 m d'épaisseur, puis 8 couches de 5 m, et enfin 5 couches de 1 m. Par-dessus repose la couche de till qui

regroupe en une seule couche le till basal et le till remanié. Cette unité est subdivisée en 19 sous-couches sauf sous le complexe fluvio-glaciaire où elle ne se divise qu'en 4 sous-couches et comporte 3 fenêtres (contacts entre les deux aquifères). L'unité de sable et gravier est subdivisée en 15 sous-couches et n'est présente qu'au niveau du complexe fluvio-glaciaire. Elle repose sur la couche de till qui l'entoure complètement et est recouverte en partie par de l'argile. Celle-ci est subdivisée en 4 sous-couches. Les propriétés hydrogéologiques assignées à ces couches sont présentées à la section 3.1.5.

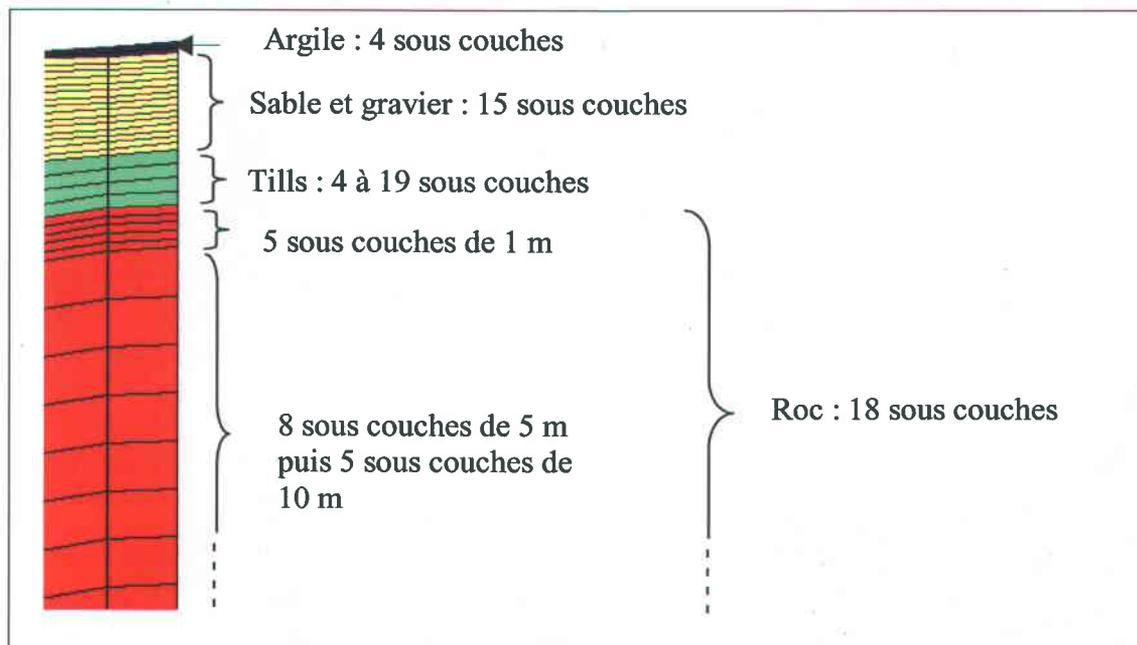


Figure 3.5 : Divisions en sous-couches des différentes unités dans le modèle géologique 3D (Pontlevoy, 2004)

3.1.5 Calage

Cette section présente uniquement les paramètres finaux du calage du modèle numérique d'écoulement local. La figure 3.6 présente les conditions imposées aux limites du modèle. Le calage du modèle d'écoulement local a été réalisé en conditions avec et sans pompage des puits de l'incinérateur et de l'UTES présents sur le site des anciennes lagunes de Ville-Mercier. Les valeurs des paramètres d'entrée qui ont permis de caler le modèle sont présentées aux tableaux 3.1, 3.2 et 3.3. Un seul coefficient d'emmagasinement (10^{-4}) a été imposé à toutes les unités. Il est à noter que les valeurs

finales des paramètres d'entrée constituent une solution qui paraît satisfaisante et conforme aux observations de ces paramètres.

3.1.5.1 Conditions finales imposées aux limites

Le tableau 3.1 montre les conditions aux limites après calage. Au niveau du roc, des charges constantes de 39 et 40 m ont été imposées respectivement à la limite est du modèle et à la limite nord de la saillie du modèle. Des charges constantes ont été appliquées également sur la partie ouest de la limite sud pour rendre compte de l'effet de drainage qui existe au niveau de la jonction de la rivière Esturgeon et de la rivière Châteauguay. Un flux nul a été imposé sur le reste des limites sud et nord du modèle. À la limite ouest du roc, un flux nul a été également appliqué. Au niveau de l'aquifère granulaire, les limites du complexe fluvio-glaciaire sont à flux nul car l'argile et le till ne rechargent pas l'unité de sable et gravier (Figure 3.6). Une charge constante de 36,5 m a été imposée à la rivière Esturgeon sur sa partie en contact avec l'unité de sable et gravier (Poulin, 1977).

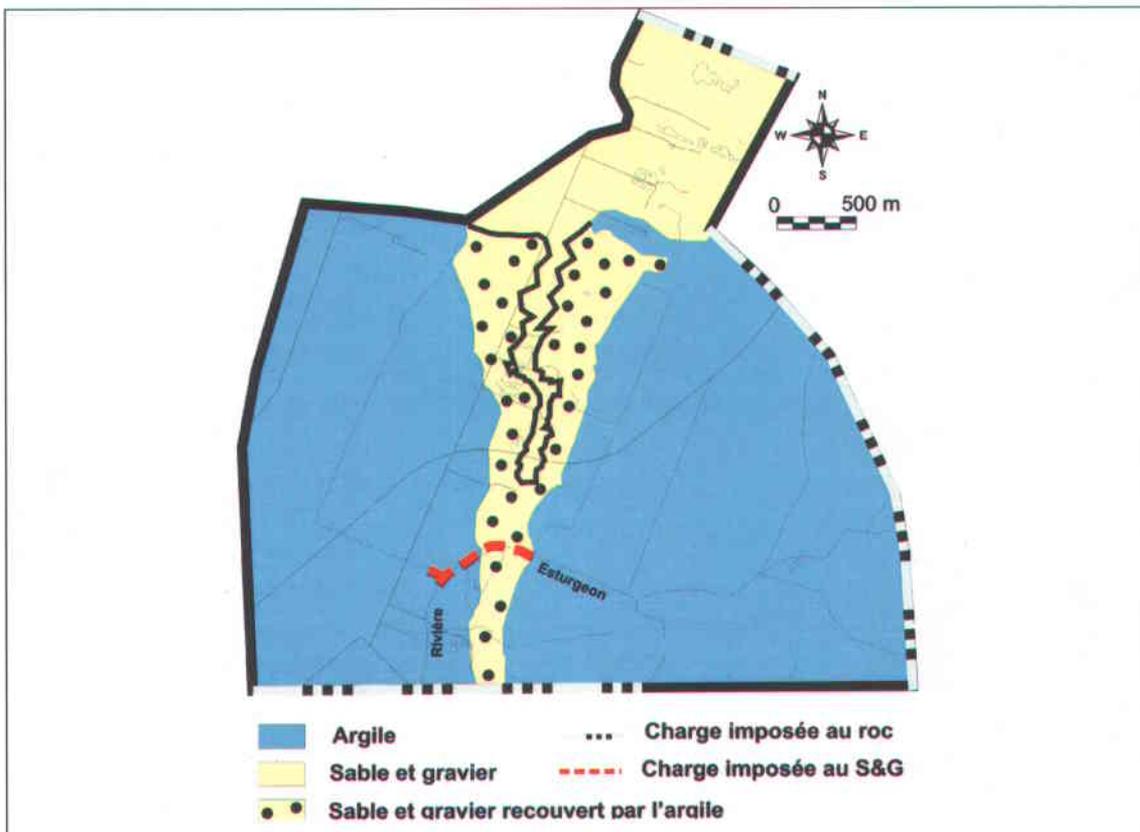


Tableau 3.1 : Conditions aux limites après calage (avec et sans pompage)
(Pontlevoy, 2004)

Limite	Charge (m)
Roc limite nord de la saillie du modèle	40
Roc est	39
Roc sud-ouest	De 37 à 34,5
Sable et gravier Esturgeon	36,5

3.1.5.2 Propriétés hydrauliques finales

Les propriétés hydrauliques finales qui ont été appliquées au roc (zone 1) dans le modèle d'écoulement local sont montrées au tableau 3.2. Une conductivité hydraulique de 4.8×10^{-6} m/s et une porosité de 0,05 ont été appliquées au roc. Celui-ci est assimilé à un milieu poreux équivalent et isotrope.

Tableau 3.2 : Paramètres hydrogéologiques appliqués à chaque unité après calage
(avec et sans pompage) (Pontlevoy, 2004)

Unité	Conductivité hydraulique (m/s)			n	Paramètres capillaires (van Genuchten)				
	K_x	K_y	K_z		S_{wr}	α (m ⁻¹)	β	γ	Pression d'entrée d'air (m)
1	$4,8 \times 10^{-6}$	$4,8 \times 10^{-6}$	$4,8 \times 10^{-6}$	0,05	0,012	14,5	2,68	0,63	-0,35
2	$1,7 \times 10^{-8}$	$1,7 \times 10^{-8}$	$1,7 \times 10^{-9}$	0,2	0,07	0,5	1,09	0,08	-0,35
3	$4,1 \times 10^{-4}$	$4,1 \times 10^{-4}$	$0,1 \times 10^{-5}$	0,3	0,061	10	2,08	0,52	-0,35
4	5×10^{-10}	5×10^{-10}	1×10^{-11}	0,5	0,07	0,5	1,09	0,08	-0,35

1 : roc
2 : till

3 : sable et gravier
4 : argile

Les propriétés hydrauliques appliquées aux dépôts meubles sont également présentées dans le tableau 3.2. La zone 2 représente la couche de till, la zone 3; l'unité de sable et gravier, et la zone 4; la couche d'argile. La conductivité hydraulique verticale des unités des dépôts meubles a été définie un ordre de grandeur inférieure à la conductivité hydraulique horizontale. Les paramètres capillaires, exprimés selon le modèle capillaire de van Genuchten, imposés au modèle sont tirés de Carsel et Parrish (1988). Ces paramètres sont résumés dans le tableau 3.2.

3.1.5.3 Recharge finale

La recharge finale totale qui a été appliquée au modèle est de 64,5 mm/an en lame d'eau équivalente (Tableau 3.3).

Tableau 3.3 : Recharge appliquée après calage (avec et sans pompage)
(Pontlevoy, 2004)

Unité	Superficie (km ²)	Infiltration (mm/an)
Complexe fluvio-glaciaire	2,36	520
Argile	16,64	0
Total	19	64,5

3.1.5.4 Résultats graphiques du calage

Les piézométries simulées lors du calage en conditions avec et sans pompage sont montrées aux figures 3.7, 3.8, 3.9a et 3.10b. La figure 3.7 présente une comparaison entre la piézométrie simulée et observée dans les dépôts meubles sans pompage. La figure 3.8 montre la piézométrie simulée au roc sans pompage. Les figures 3.9 et 3.10 comparent respectivement les piézométries simulées et observées dans le roc et les dépôts meubles avec pompage. Ces figures montrent que l'écoulement global des eaux souterraines dans les aquifères granulaire et de roc fracturé ainsi que l'impact des puits de l'UTES sont relativement bien reproduits par les simulations numériques.

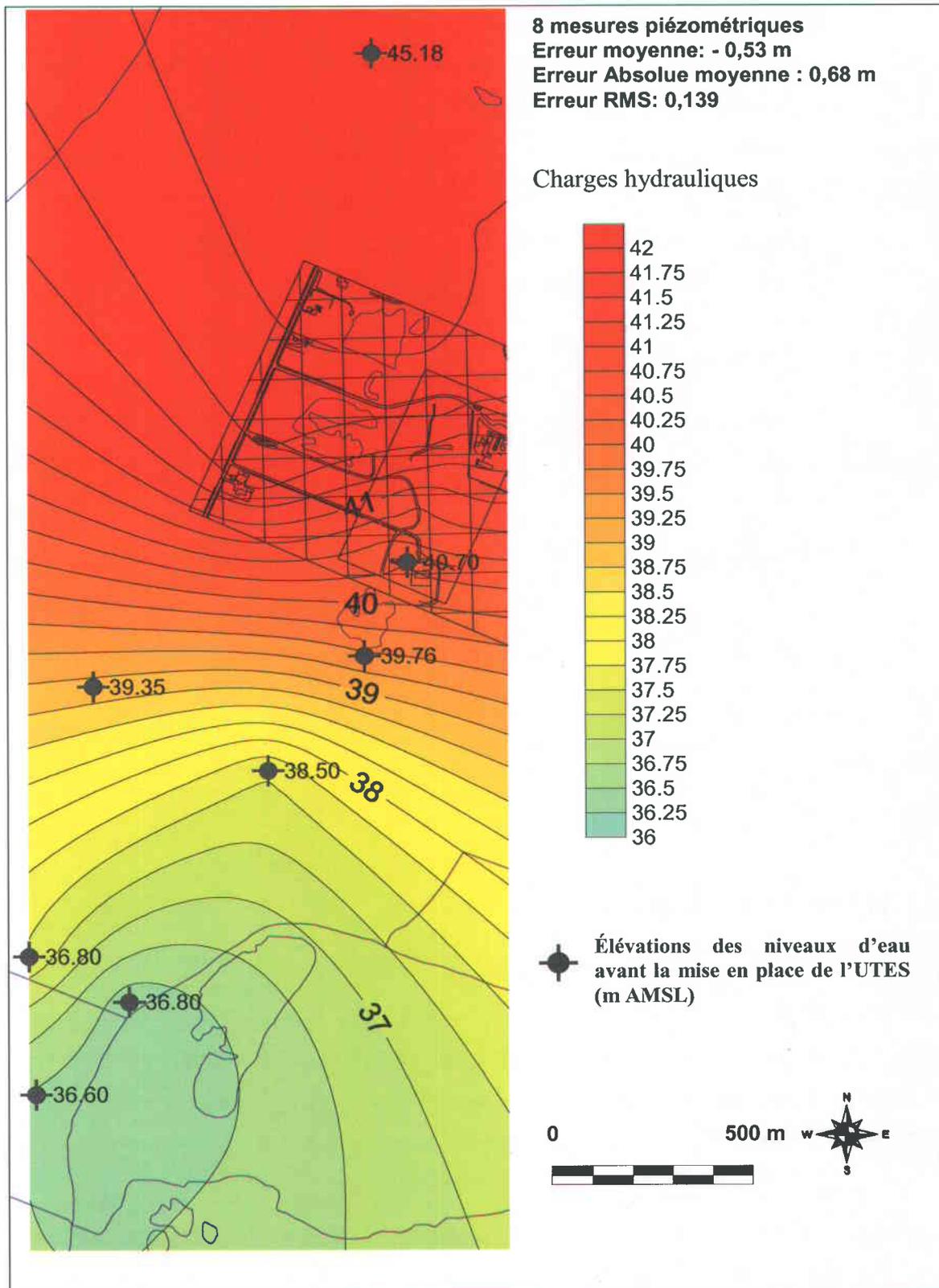


Figure 3.7 : Charges simulées comparées aux charges observées dans les dépôts meubles (sans pompage) (Pontlevoy, 2004)

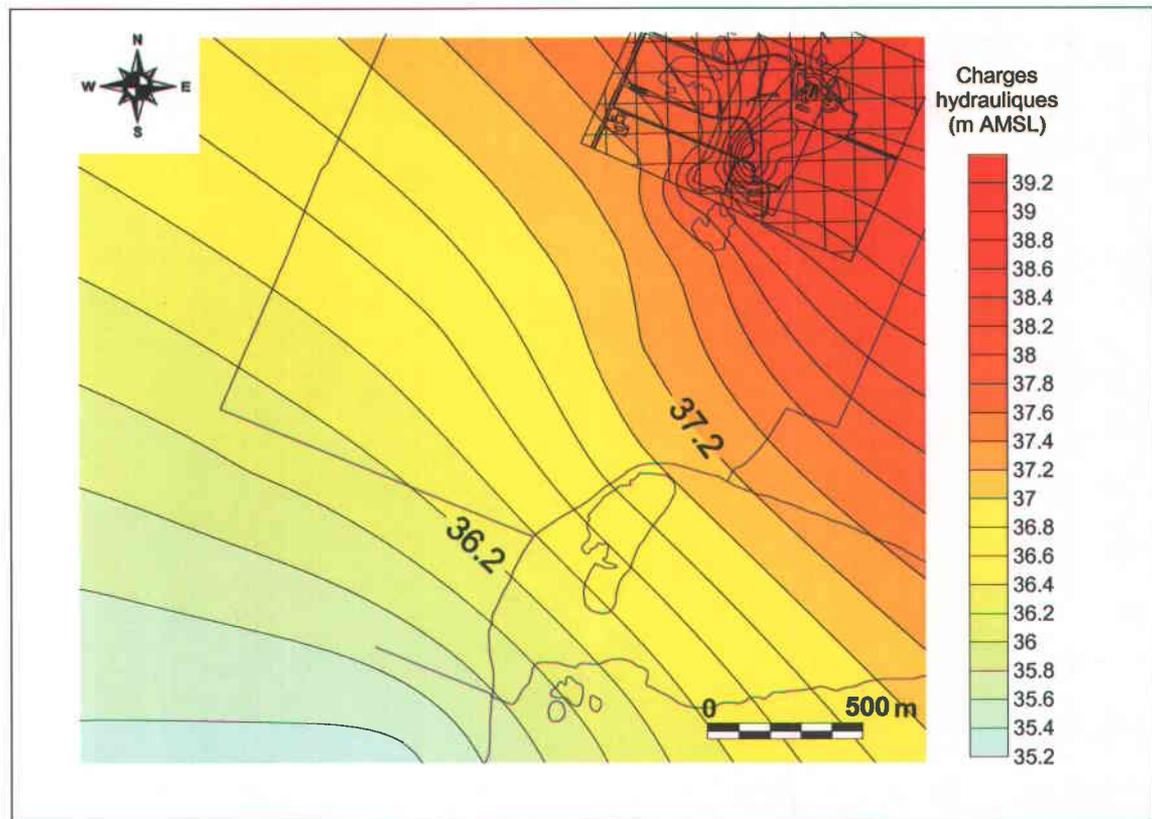


Figure 3.8: Piézométrie simulée dans le roc sans pompage (Pontlevoy, 2004)

Lors du calage, une attention particulière a été portée au niveau des puits de l'UTES et des fenêtres dans les tills situées au nord du site. Une erreur minimale aussi bien dans le roc que dans les dépôts meubles a été recherchée pour bien rendre compte des échanges entre les deux aquifères.

3.2 Résultats et application du modèle numérique d'écoulement local

3.2.1 Effet hydraulique des fenêtres dans les tills

Une attention particulière a été portée au niveau des différentes fenêtres dans les tills présentes dans le modèle. Il ressort que le pompage exercé par les puits de l'UTES crée des conditions hydrauliques particulières à ces emplacements. La figure 3.11 présente les contours de vitesse d'écoulement verticale calculée en chaque nœud du modèle selon un plan horizontal à différentes élévations, en conditions avec et sans pompage. Une valeur de vitesse négative indique un écoulement dirigé vers le bas tandis qu'une valeur positive indique un écoulement vers le haut.

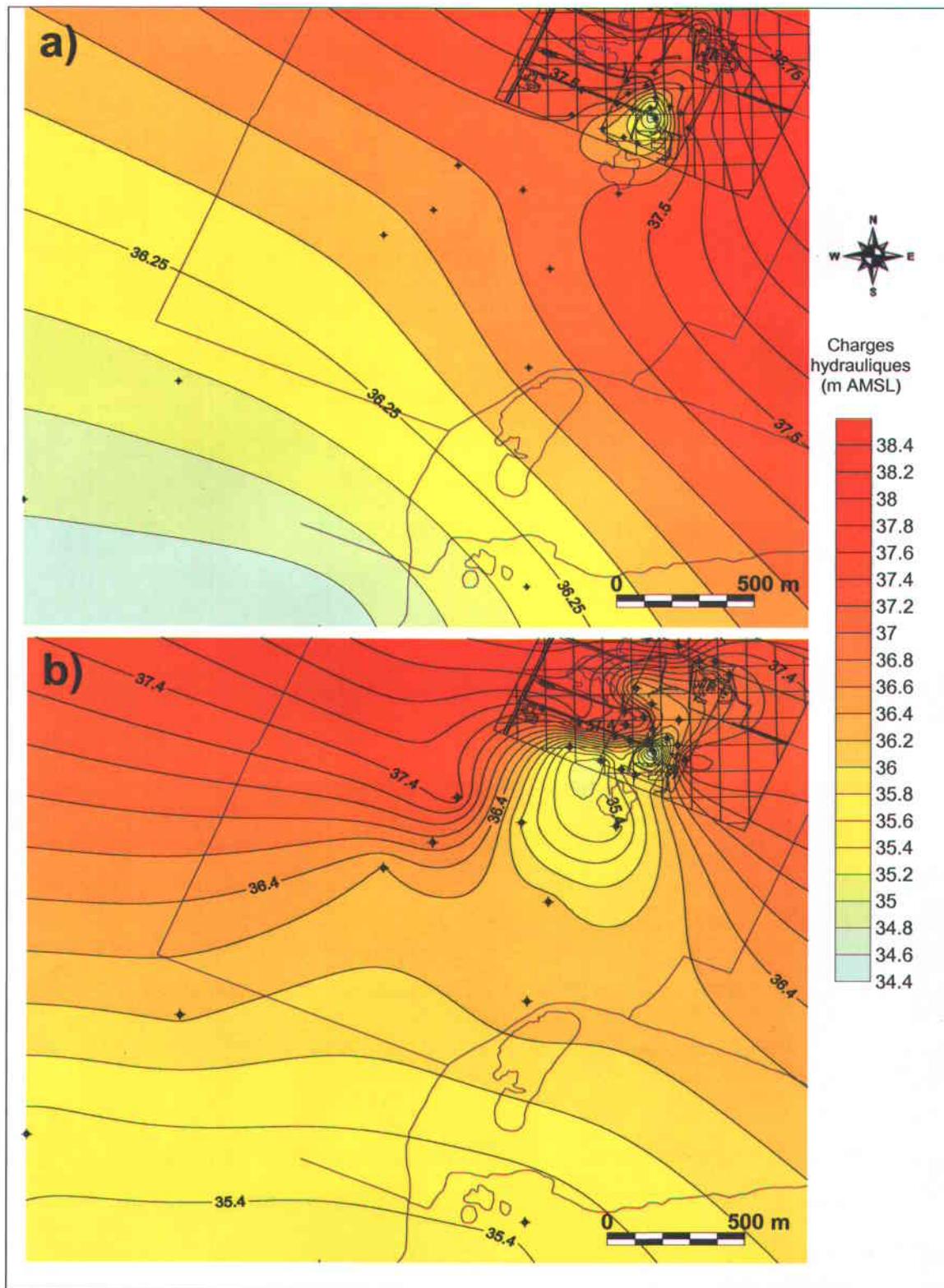


Figure 3.9 : Comparaison des piézométries simulées (a) et observées (b) dans le roc avec pompage (Pontlevoy, 2004)

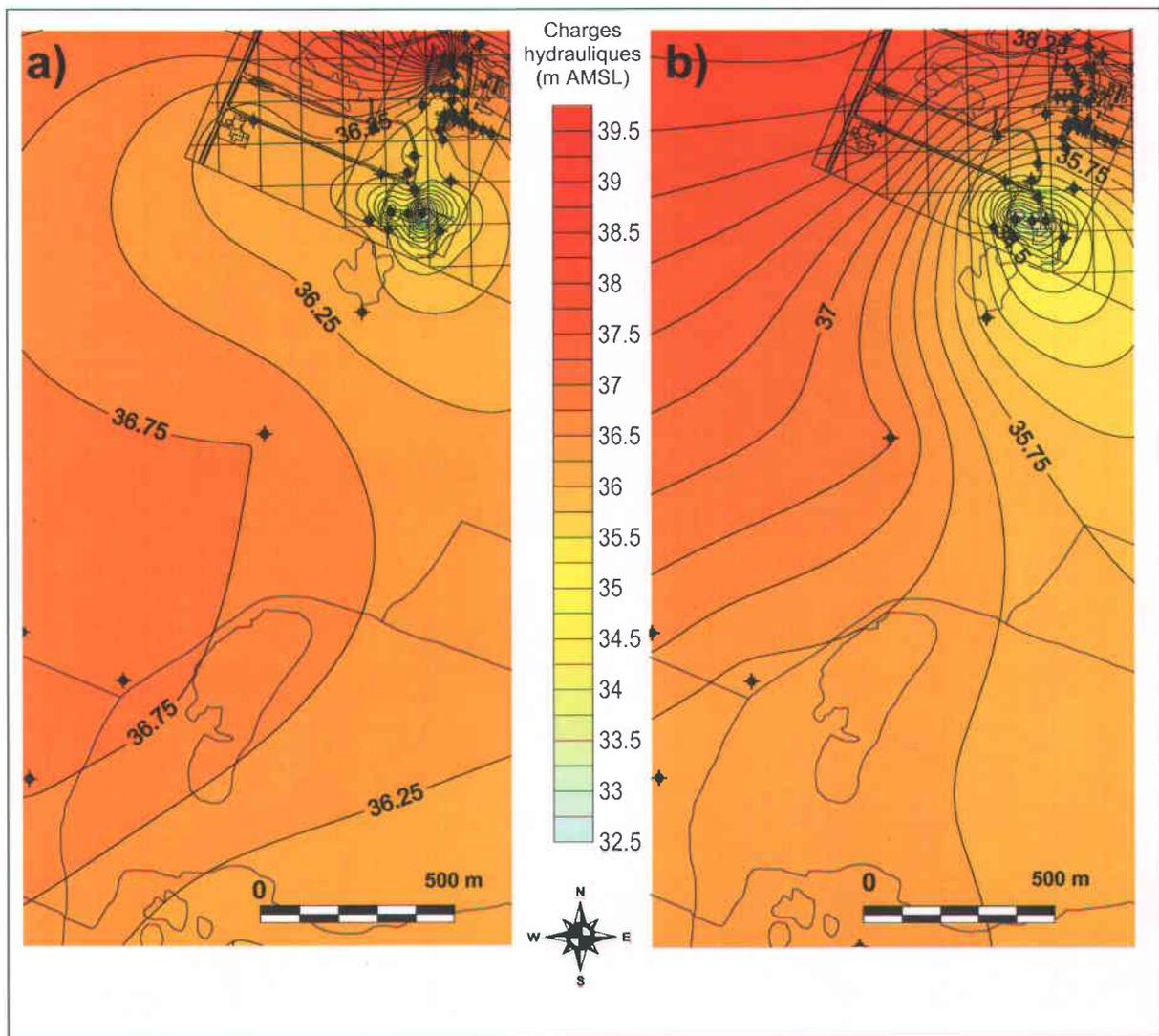


Figure 3.10 : Comparaison de la piézométrie observée (a) et de la piézométrie simulée (b) dans les sables et graviers (avec pompage) (Pontlevoy, 2004)

La première analyse des vitesses d'écoulement a été réalisée dans le modèle d'écoulement local à une élévation de 12,33 m, soit dans le roc juste sous l'élévation minimale des fenêtres. La deuxième analyse a été effectuée au niveau de l'élévation moyenne des fenêtres (12,63 m) et la dernière analyse a été réalisée dans l'unité de sable et gravier, bien au-dessus des fenêtres (14,33 m). Il apparaît qu'en conditions de pompage l'écoulement au niveau des fenêtres s'effectue préférentiellement du roc vers les dépôts meubles alors qu'en absence de pompage la situation est inversée, c'est-à-dire que l'écoulement se fait des sables et graviers vers le roc.

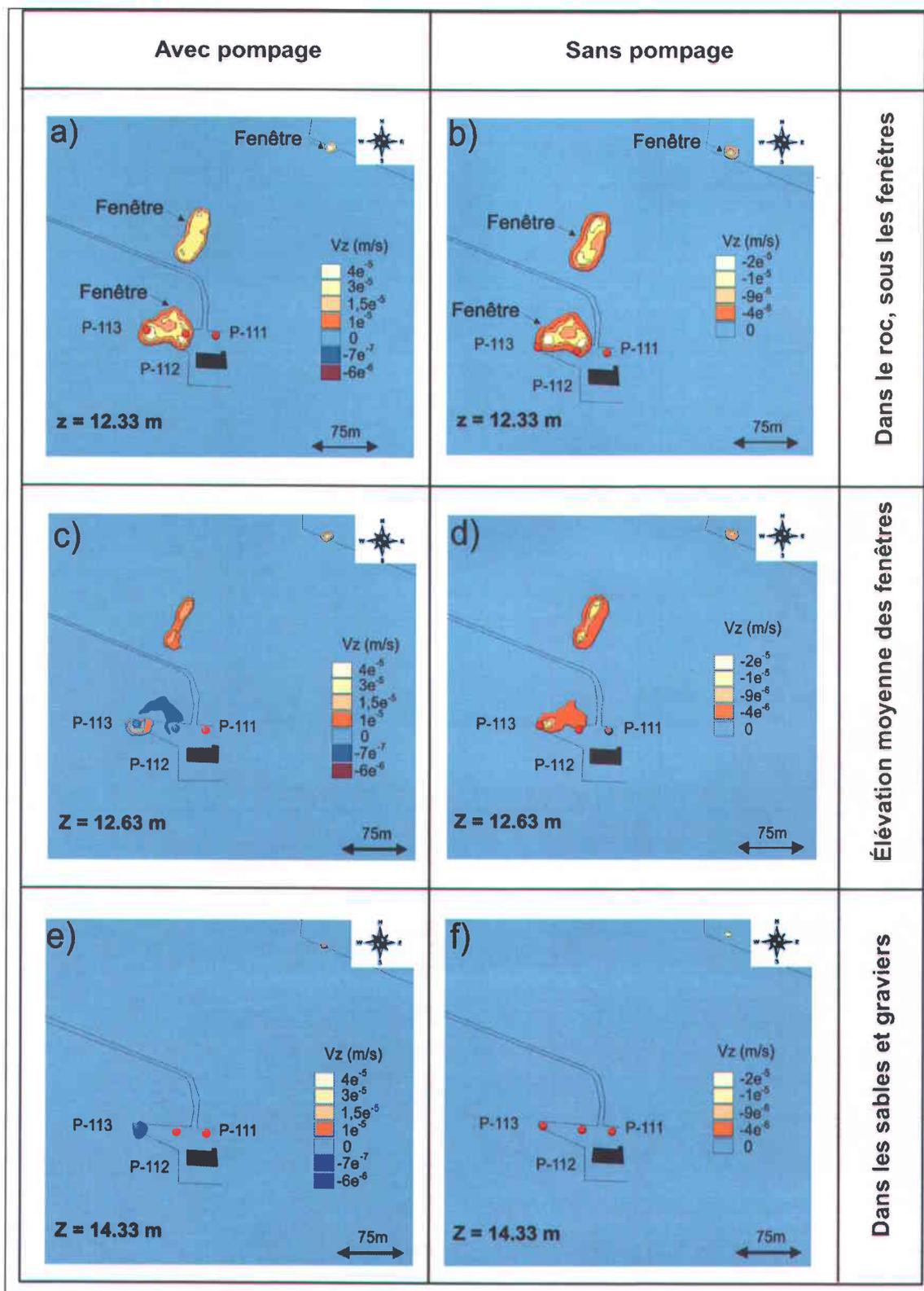


Figure 3.11: Directions et vitesses verticales d'écoulement résultant des simulations avec et sans pompage de l'UTES en 3 élévations différentes de haut en bas : 12,33 m, 12,63 m et 14,33 m (les vitesses négatives indiquent un écoulement vers le bas) (Pontlevoy, 2004)

3.2.2 Vitesses d'écoulement et aire d'alimentation des puits de l'UTES

Du traçage de particules a été réalisé dans le modèle d'écoulement local en conditions de pompage pour estimer les vitesses d'écoulement de l'eau souterraine dans les deux aquifères et l'aire d'alimentation des puits de l'incinérateur et de l'UTES. Les résultats montrent que l'eau souterraine s'écoule à une vitesse d'environ 300 m/an dans l'aquifère granulaire autour des puits et d'environ 10 m/an dans le roc. Ainsi, une particule dont le point de départ se situe au niveau des anciennes lagunes met environ 1 an pour atteindre les puits de l'UTES en circulant dans les dépôts meubles. La figure 3.12 montre la piézométrie et l'aire d'alimentation des puits de l'UTES dans l'aquifère granulaire. La figure 3.13 montre la piézométrie et l'aire d'alimentation des puits de l'incinérateur et de l'UTES dans l'aquifère de roc fracturé.

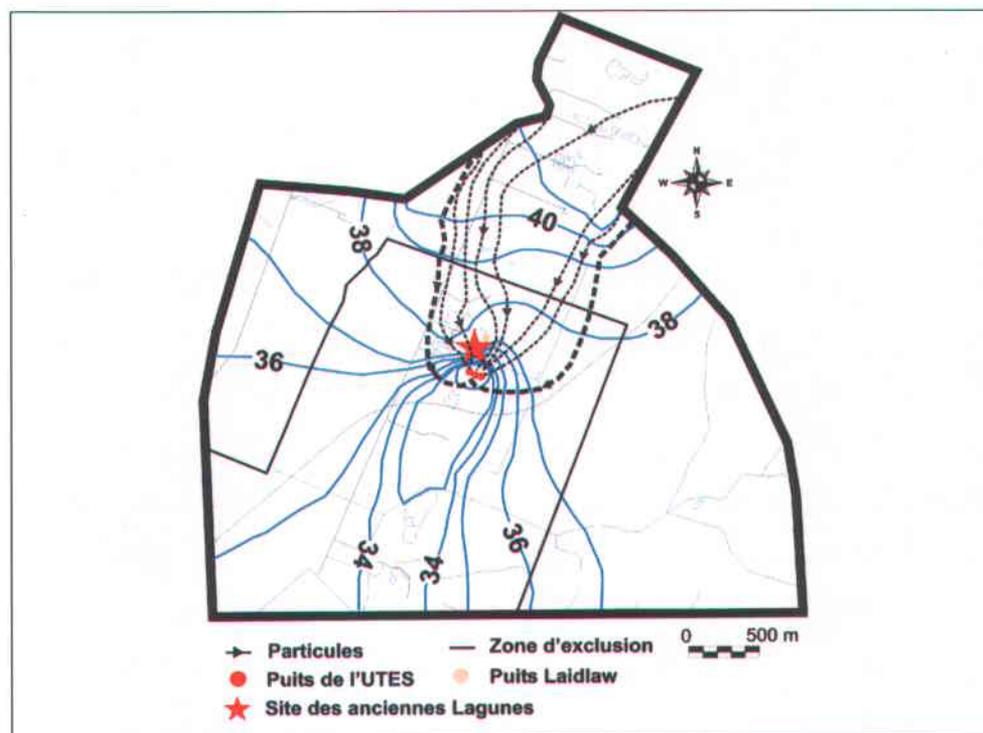


Figure 3.12: Aire d'alimentation des puits de l'UTES dans les dépôts meubles (Pontlevoy, 2004)

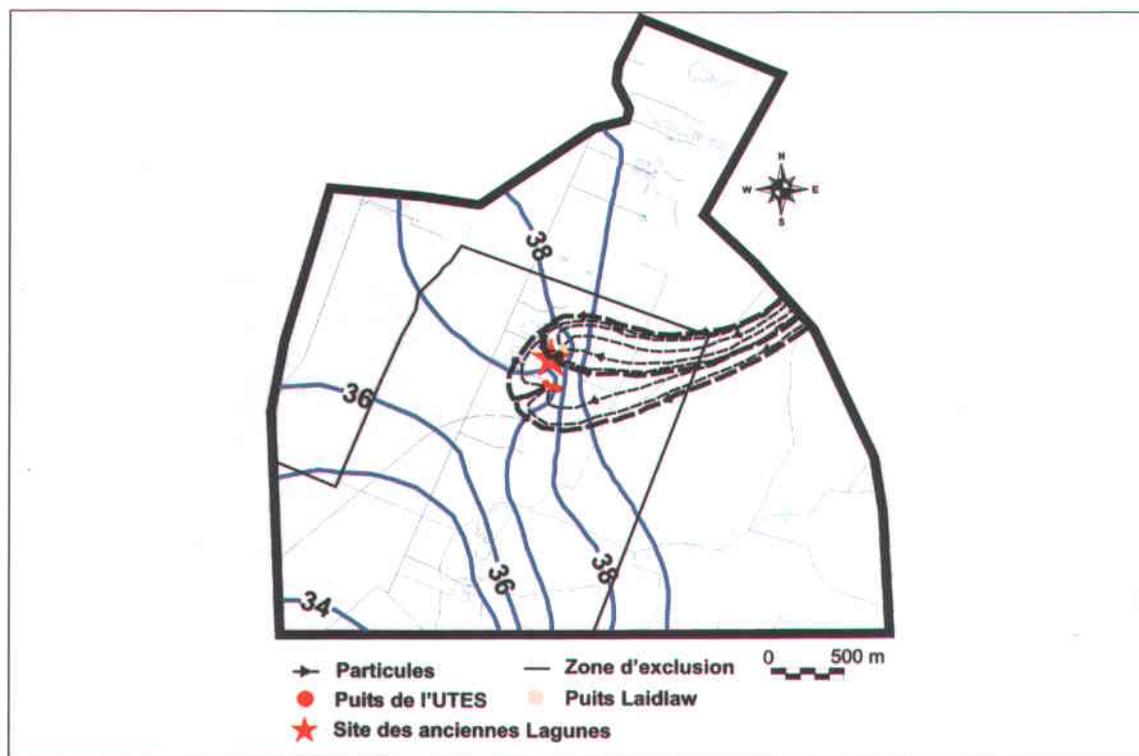


Figure 3.13 : Aire d'alimentation des puits de l'UTES dans le roc
(Pontlevoy, 2004)

Il ressort que l'aire d'alimentation des puits de l'UTES dans l'aquifère granulaire recouvre complètement la zone contaminée des anciennes lagunes, s'étend jusqu'à proximité de la rivière Esturgeon, au sud de l'UTES, et recouvre presque entièrement la partie nord de la zone d'exclusion définie par le ministère de l'Environnement (Annexe II du *Règlement du captage des eaux souterraines*, Décret 696-2002 du 12 juin 2002). Dans l'aquifère de roc fracturé, l'aire d'alimentation des puits est moins importante, mais elle recouvre complètement les zones où sont situées les fenêtres ainsi que le roc sous-jacent au site contaminé des anciennes lagunes. Le piège hydraulique actuellement en place semble donc être efficace pour capter les eaux souterraines contaminées issues des zones sources actives (sables et graviers et roc contaminés).

3.2.3 Impact de l'arrêt soudain des puits de l'UTES

Du traçage de particules a été réalisé pour estimer l'impact d'un arrêt soudain des puits de l'UTES. La figure 3.14 montre les résultats de ces simulations. Il ressort qu'au bout de 2 à 3 mois, l'écoulement au niveau des fenêtres est inversé. De plus, ces simulations ont démontré que les conditions hydrauliques existant avant la mise en place des puits de l'UTES sont de nouveau atteintes en 10 ans dans le roc et 15 ans dans les dépôts meubles.

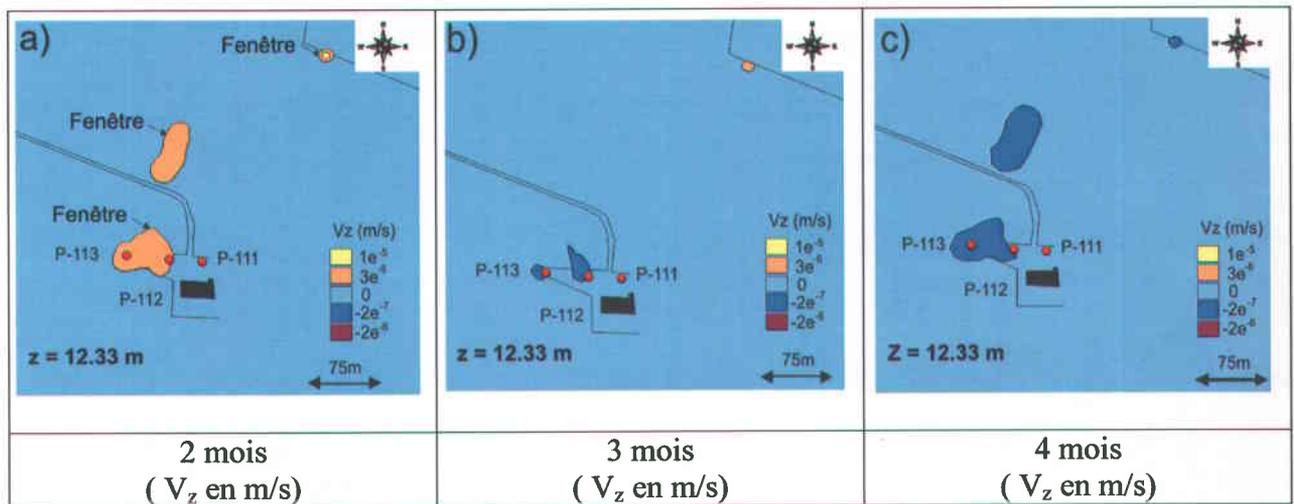
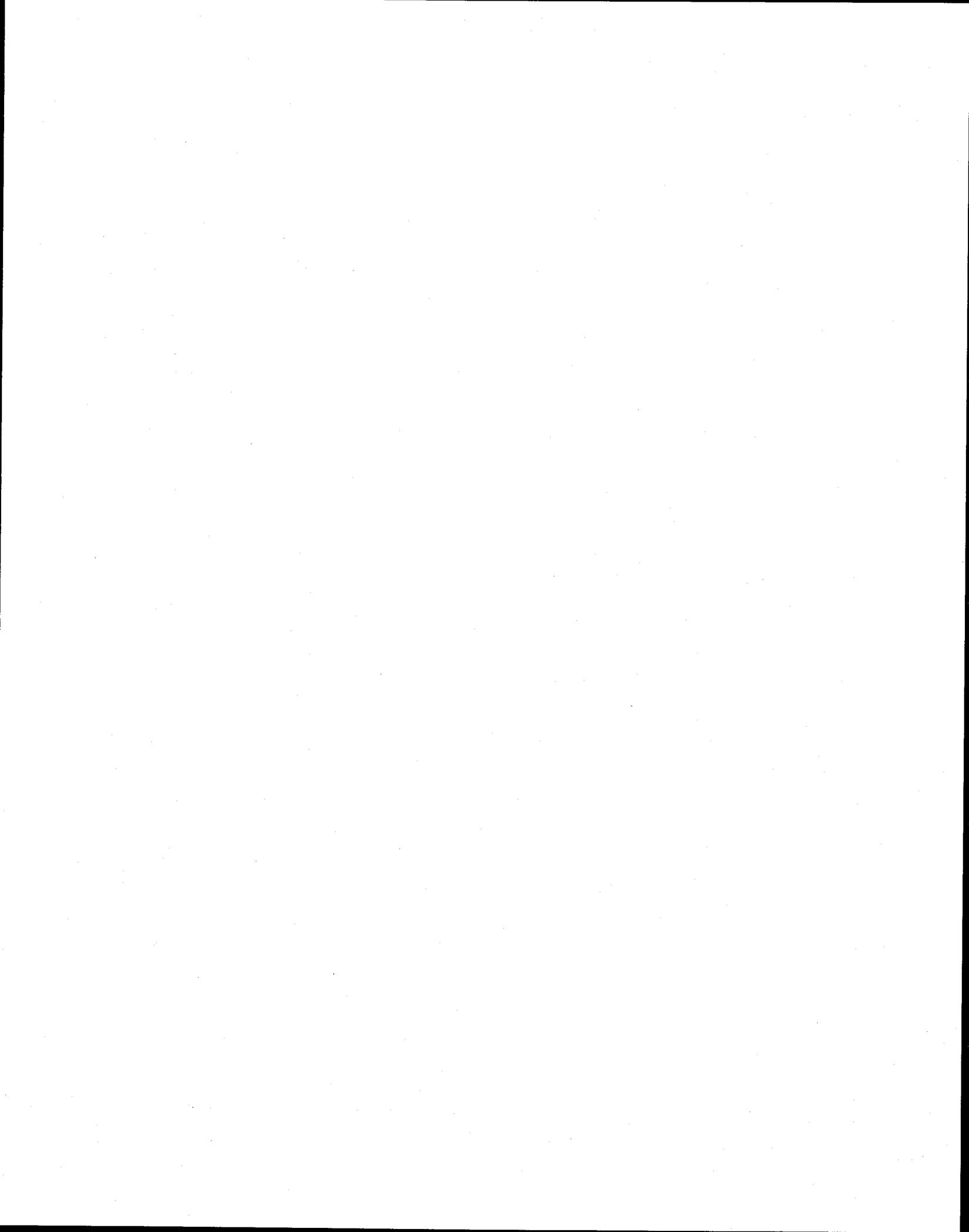


Figure 3.14 : Vitesses verticales au niveau des fenêtres suite à l'arrêt du pompage de l'UTES (Pontlevoy, 2004)



CHAPITRE 4

PHASE I

Technologies potentiellement applicables

Ce chapitre présente l'inventaire des technologies de réhabilitation des aquifères contaminés qui a été réalisé afin de recueillir les informations générales sur les technologies existantes. À la suite de cet inventaire, une première sélection a été réalisée pour déterminer les technologies potentiellement applicables au site des anciennes lagunes de Ville-Mercier. Les critères de la sélection et les résultats sont discutés dans ce chapitre. Les travaux de la Phase I correspondent aux étapes 4 et 5 du processus de sélection présentées à la figure 4.1.

4.1 Inventaire des technologies de réhabilitation

Plusieurs sources bibliographiques ont été consultées afin de dresser un inventaire des technologies de réhabilitation des aquifères contaminés. Les banques de données Internet du NFESC Naval Facilities Engineering Service Center (NFESC, 2003) et du FRTR Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR, 2003) ainsi que le rapport « Smithville Phase 4 Bedrock Remediation Program, Alternatives Report, July 1998 » (Golder, 1997) ont été utilisés à cette fin. Ces références ont permis de documenter les technologies de réhabilitation des aquifères contaminés de la façon suivante:

- Résumé de la technologie;
- Applicabilité et limitations de la technologie;
- Durabilité et coûts approximatifs d'implantation et d'opération.

Processus de sélection
(Traduit et modifié du rapport de Smithville par Golder, 1997)

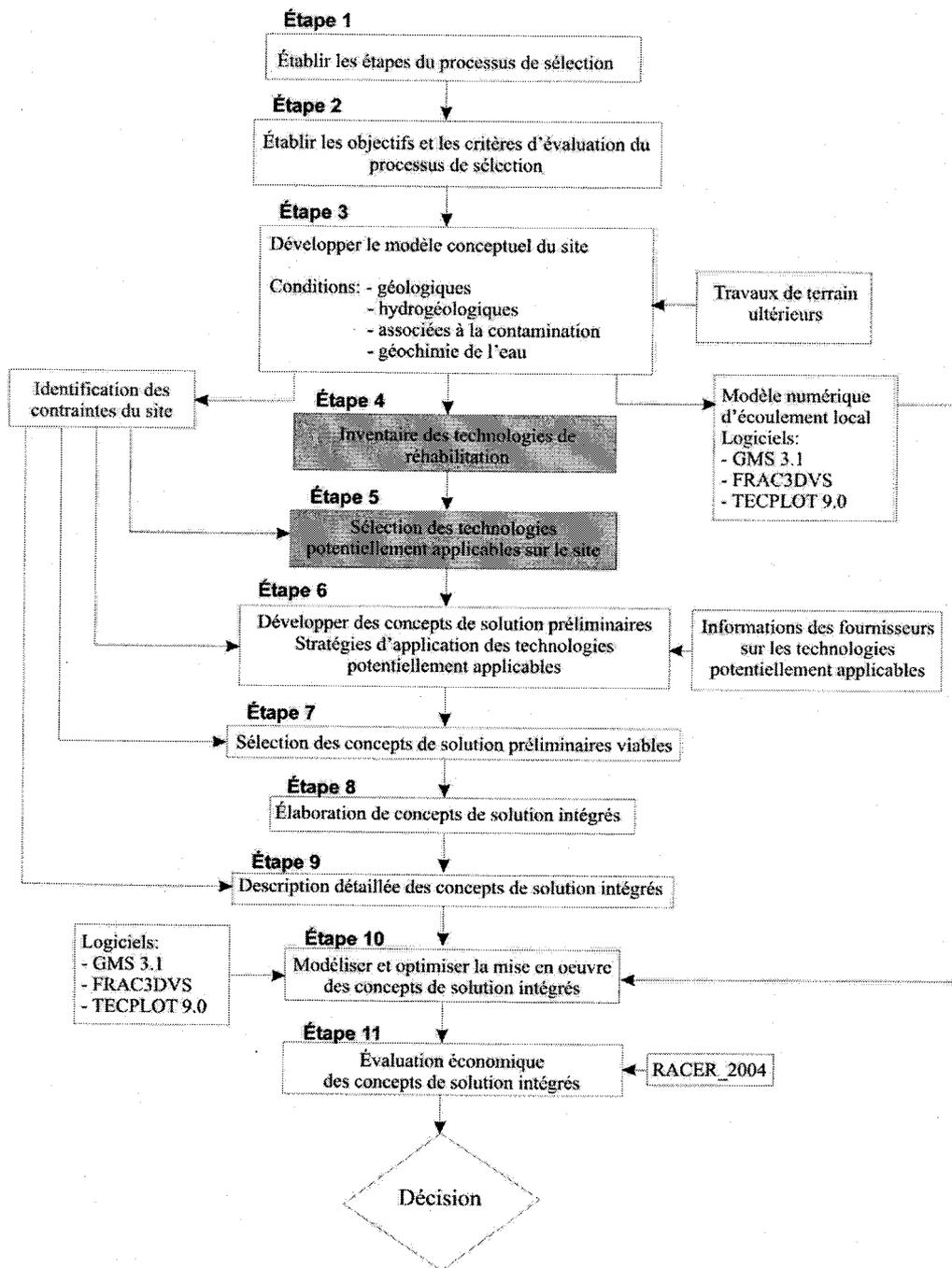


Figure 4.1 : Phase I du processus de sélection

Dans le cadre de cette étude, les technologies de réhabilitation des aquifères contaminés sont classées, selon leur mode d'application, dans les six (6) catégories suivantes:

- Atténuation naturelle;
- Enlèvement de masse, méthodes biologiques;
- Enlèvement de masse, méthodes physiques/chimiques;
- Enlèvement de masse, méthodes thermiques;
- Contrôle hydraulique;
- Contrôle physique.

Un relevé des technologies décrites dans les références a permis d'élaborer la liste des technologies de réhabilitation des aquifères contaminés, granulaire ou de roc fracturé, qui est présentée à l'annexe B. Les soixante-quatorze (74) technologies qui ont été répertoriées y sont montrées et classées selon leur mode d'application principal.

4.2 Sélection des technologies de réhabilitation potentiellement applicables

Une sélection initiale des technologies de réhabilitation a été réalisée pour déterminer celles qui présentent un potentiel d'application pour le contrôle et le traitement des panaches d'eau contaminée de Ville-Mercier. La sélection initiale est basée sur des critères définis subséquentement.

4.2.1 Critères de sélection

Les critères établis pour la sélection des technologies de réhabilitation potentiellement applicables à Ville-Mercier sont fonction des aspects suivants :

- Des conditions du mandat du MENV; et
- Des contextes locaux du site.

4.2.1.1 Critères associés aux conditions du mandat du MENV

Le site à l'étude est présentement le sujet d'actions juridiques toujours actives. Dans ce contexte, des mesures de réhabilitation des zones sources à l'origine des panaches d'eau contaminée dans les aquifères granulaire et de roc fracturé peuvent difficilement être

envisagées. Ceci limite les actions environnementales possibles à des mesures de contrôle des panaches d'eau contaminée. La faisabilité et la pertinence de la réhabilitation des zones sources des aquifères granulaire et de roc fracturé n'ont donc pas été évaluées. De ce fait, l'objectif principal de cette étude tel que décrit dans le mandat est la sélection de technologies de contrôle et de traitement des panaches d'eau contaminée de Ville-Mercier.

Les technologies de réhabilitation sélectionnées doivent rencontrer les conditions suivantes :

- S'applique à l'eau souterraine;
- Est une méthode *in situ* et ne nécessite pas l'excavation du sol;
- Permet d'intercepter ou de traiter un panache d'eau contaminée présent dans l'aquifère granulaire ou dans l'aquifère de roc fracturé.

À l'inverse, les technologies de réhabilitation qui présentent les caractéristiques suivantes sont rejetées lors de la sélection initiale:

- S'applique aux sédiments, sols et phases libres de contaminants;
- Est une méthode *ex situ*;
- Traite uniquement ou spécifiquement les zones sources.

Les technologies de réhabilitation applicables au traitement des effluents des technologies de contrôle sont également retenues, car elles sont généralement requises en complément.

4.2.1.2 Critères associés aux contextes locaux

Le contexte géologique et hydrogéologique, le contexte de la contamination et les paramètres physico-chimiques de l'eau rencontrés sur le site constituent trois critères d'évaluation dans la sélection des technologies de réhabilitation potentiellement applicables à Ville-Mercier. Ces contextes locaux ont été discutés au chapitre 2 et sont résumés sous forme de tableau à l'annexe C. Les technologies de réhabilitation qui possèdent des limitations connues en présence de certaines conditions spécifiques du site sont rejetées lors de la sélection initiale.

Les technologies de réhabilitation uniquement applicables à l'aquifère granulaire ou à l'aquifère de roc fracturé ne sont pas éliminées de la sélection, car l'utilisation de deux systèmes de contrôle et de traitement indépendants, pour les dépôts meubles et le roc fracturé, est envisagée dans le cadre de cette étude.

4.2.1.3 Résumé des critères de sélection

Le tableau 4.1 montre les critères et les choix de réponses associés définis pour la sélection des technologies potentiellement applicables pour le contrôle et le traitement des panaches d'eau contaminée de Ville-Mercier. Les conséquences des choix de réponses mentionnés dans le tableau, soit l'acceptation ou le refus d'une technologie de réhabilitation, sont indiquées.

Tableau 4.1 : Critères et choix de réponses associés

Critères de sélection	Choix de réponses	Conséquence
Type de technologies	<i>In Situ</i>	Acceptation
	<i>Ex Situ</i>	Acceptation*
		Refus
Application	Diminution de la source de contamination	Refus
	Diminution du panache d'eau contaminée	Acceptation
	Interception du panache d'eau contaminée	Acceptation
	Confinement de la contamination	Acceptation
Zone traitée	Vadose	Refus
	Saturée	Acceptation
Médium traité	Eau souterraine	Acceptation
	Sédiments	Refus
	Sols	Refus
	Phases libres	Acceptation*
		Refus
Gaz	Acceptation*	
Conditions géologiques/ hydrogéologiques	Oui	Acceptation
	Oui, mais avec des restrictions	Acceptation
	Non	Refus
Conditions de la contamination	Oui	Acceptation
	Oui, mais avec des restrictions	Acceptation
	Non	Refus
Paramètres physico-chimiques de l'eau	Oui	Acceptation
	Oui, mais avec des restrictions	Acceptation
	Non	Refus

* : Les systèmes de traitement des effluents *ex situ* peuvent être applicables en relation avec la mise en œuvre de certaines technologies de contrôle.

4.2.2 Matrice de décision

La matrice de décision, présentée à l'annexe D, documente les réponses aux critères de sélection pour chacune des technologies de réhabilitation considérées. Un exemple de la matrice de décision est présentée au tableau 4.2. La dernière colonne de ce tableau montre l'acceptation ou le refus de la technologie. Cette mention indique le potentiel d'application de cette technologie pour le contrôle et le traitement des panaches d'eau contaminée de Ville-Mercier, présents dans les aquifères granulaire et de roc fracturé.

À l'annexe D, les technologies de traitement des effluents sont identifiées par un astérisque. Également, les technologies applicables au contrôle et traitement du panache d'eau contaminée dans l'aquifère de roc fracturé se démarquent dans le tableau par la couleur grisâtre de la ligne. Il est à noter que ces technologies peuvent s'appliquer tout autant à l'aquifère granulaire.

4.3 Résultats de la sélection initiale

Les technologies de réhabilitation qui ont été retenues pour le contrôle et le traitement des panaches d'eau contaminée de Ville-Mercier sont présentées dans les sections suivantes. Au chapitre 5, la mise en application de ces technologies sur le site est étudiée et s'inscrit dans l'élaboration de concepts de solution préliminaires. L'annexe E présente, avec plus de détails, les technologies de réhabilitation des aquifères contaminés qui ont échoué la sélection initiale et les causes principales de leur rejet.

4.3.1 Technologies de réhabilitation retenues par la sélection initiale

Les technologies de réhabilitation potentiellement applicables pour le contrôle et le traitement *in situ* du panache d'eau contaminée de l'aquifère granulaire ou de l'aquifère de roc fracturé du site, retenues par la sélection initiale, sont présentées au tableau 4.3. Dans la matrice de décision (Annexe D), ces technologies sont identifiées par une décision « d'acceptation sans astérisque (Acceptation) ». Sur soixante-quatorze (74) technologies de réhabilitation, treize (13) de celles-ci présentent un potentiel d'application *in situ* à Ville-Mercier.

Tableau 4.2 : Exemple de la matrice de décision

ENLÈVEMENT DE MASSE : MÉTHODES CHIMIQUES ET PHYSIQUES							
Nom de la Technologie	Type	Application	Zone	Médium traité	Application selon les conditions du site		Décision Acceptation/Rejet
					géologique / hydrogéologique	physico-chimie de l'eau	
Barbotage	<i>In Situ</i>	1-2	Saturée	E	oui, mais	oui	Acceptation
Charbon granulaire activé	<i>Ex Situ</i>	1	na	E-G	na	oui	*Acceptation
Extraction avec solvants	<i>Ex Situ</i>	1	na	S	oui	oui	Rejet
Extraction des vapeurs du sol	<i>In Situ</i>	1	Vadose	S	oui	oui	Rejet

<p><u>Légende: Application</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Diminution de la source de contamination 2. Diminution du panache d'eau contaminée 3. Interception du panache d'eau contaminée 4. Confinement de la contamination 5. Traitement complémentaire 	<p><u>Légende: Médium traité</u></p> <p>(E) Eau souterraine (Sé) Sédiments (S) Sol (Pl) Phase libre (G) Air/Gaz</p>
--	---

<p>* Traitement secondaire des produits interceptés</p>

Peu de technologies d'enlèvement de masse ont été retenues pour le contrôle et le traitement du panache d'eau contaminée de l'aquifère de roc fracturé (lignes grisâtres). Les technologies de contrôle hydraulique ou physique de la migration du panache sont plus appropriées pour ce type d'aquifère. Pour l'aquifère granulaire, plusieurs technologies sont envisagées pour le contrôle et le traitement du panache d'eau contaminée.

Tableau 4.3 : Technologies de réhabilitation retenues par le processus de sélection

Mode d'application	Technologie
Contrôle physique de la migration du panache	Mur vertical imperméable
	Pieux sécants
	Recouvrement imperméable
Contrôle hydraulique de la migration du panache	Pompage
Enlèvement de masse : Méthodes biologiques	Barrière biologique
	Biodégradation améliorée
Enlèvement de masse : Méthodes physiques et chimiques	Barbotage
	Extraction à deux phases
	Mélange de sol en profondeur
	Mur réactif
	Oxydation/Réduction chimique <i>in situ</i>
	Puits de re-circulation
	Séparation des gaz dans le puits (Injection d'air)

Note : les technologies potentiellement applicables au roc fracturé sont indiquées en gris.

4.3.2 Technologies de traitement *ex situ* retenues par la sélection initiale

Dans le cadre du mandat, il est demandé à l'INRS-ETE d'évaluer les alternatives de contrôle et de traitement *in situ* des panaches d'eau contaminée des anciennes lagunes de Ville-Mercier. Lors de la sélection initiale des technologies potentiellement applicables au site, certaines technologies de contrôle *in situ* retenues produisent des effluents à traiter *ex situ*. Dans cette optique, des technologies de traitement *ex situ* pour les différents

effluents produits sont suggérées au tableau 4.4, à titre indicatif. Ces technologies de traitement ont été retenues lors de la sélection initiale présentée à l'annexe D et sont notées par un astérisque (*).

Tableau 4.4 : Technologies de traitement *ex situ* retenues par la sélection initiale

Mode d'application	Médium traité	Technologie
Enlèvement de masse : Méthodes biologiques	Eau	Biodégradation améliorée
	Gaz	Bio-filtration
	Phases Libres	Biodégradation améliorée
Enlèvement de masse : Méthodes chimiques et physiques	Eau	Charbon granulaire activé
		Fer monovalent
		Membrane de pervoration
		UV Oxydation
		Tour de ventilation
	Gaz	Adsorption- Résine synthétique
		Charbon granulaire activé
		Combustion interne
		Membrane séparation
Enlèvement de masse : Méthodes thermiques	Gaz	Oxydation catalytique
		Oxydation thermique
Contrôle physique	Eau	Disposition
	Gaz	Disposition
	Phases Libres	Disposition

Le traitement *ex situ* le plus commun de l'eau contaminée aux composés organiques volatils et semi-volatils est la tour de ventilation. Toutefois, à des concentrations très élevées, la disposition hors site peut s'avérer une alternative. D'autres technologies sont proposées pour le traitement *ex situ* de l'eau au tableau 4.3. Cependant, ces technologies sont soit plus dispendieuses, plus complexes ou peu prouvées. Pour le traitement des gaz, le charbon granulaire activé et l'oxydation catalytique ou thermique sont des technologies éprouvées et envisageables. Il est à noter que l'oxydation catalytique ou thermique sont des technologies recommandées pour le traitement des gaz de sortie de la tour de ventilation (RACER_2004). L'alternative de traitement *ex situ* proposée pour les phases libres, récupérées du contrôle *in situ*, est la disposition hors site. Il est à noter que la proximité de l'incinérateur de sols contaminés aux anciennes lagunes présente un intérêt pour la disposition de tous les types d'effluents produits par les technologies de contrôle

retenues par la sélection initiale. Au chapitre 5, la mise en application des technologies de traitement *ex situ* dans les concepts de solution préliminaires est discutée.

CHAPITRE 5

PHASE II

Concepts de solution préliminaires

Ce chapitre présente les concepts de solution préliminaires qui ont été développés suite à la sélection des technologies potentiellement applicables pour le contrôle et le traitement des panaches d'eau contaminée des aquifères granulaire et de roc fracturé de Ville-Mercier. Les concepts de solution préliminaires sont des mises en application possibles des technologies retenues par la sélection initiale du chapitre 4. Suite à l'élaboration des concepts de solution préliminaires, une seconde sélection a été réalisée afin de déterminer les concepts techniquement viables. Cette sélection est également discutée dans ce chapitre. Les éléments présentés dans la Partie II constituent les étapes 6 et 7 du processus de sélection montré à la figure 5.1.

5.1 Élaboration de concepts de solution préliminaires

L'objectif poursuivi dans l'élaboration de concepts de solution préliminaires est de préciser les approches concevables pour la mise en œuvre des technologies de contrôle et de traitement potentiellement applicables au site en tenant compte des contraintes existantes. Ces contraintes sont reliées aux contextes géologique et hydrogéologique, à la nature de la contamination et aux infrastructures en place décrites au chapitre 2. L'élaboration de concepts de solution préliminaires a pour but de vérifier si les technologies retenues par la sélection du chapitre 4 sont concrètement applicables au site et de déterminer leurs avantages et désavantages relatifs.

Les concepts de solution préliminaires qui ont été développés suite à la sélection du chapitre 4 sont résumés au tableau 5.1. Les concepts ont été conçus indépendamment pour les aquifères granulaire et de roc fracturé. Quatre (4) concepts ont été développés pour l'aquifère granulaire et un seul pour l'aquifère de roc fracturé.

Processus de sélection
(Traduit et modifié du rapport de Smithville par Golder, 1997)

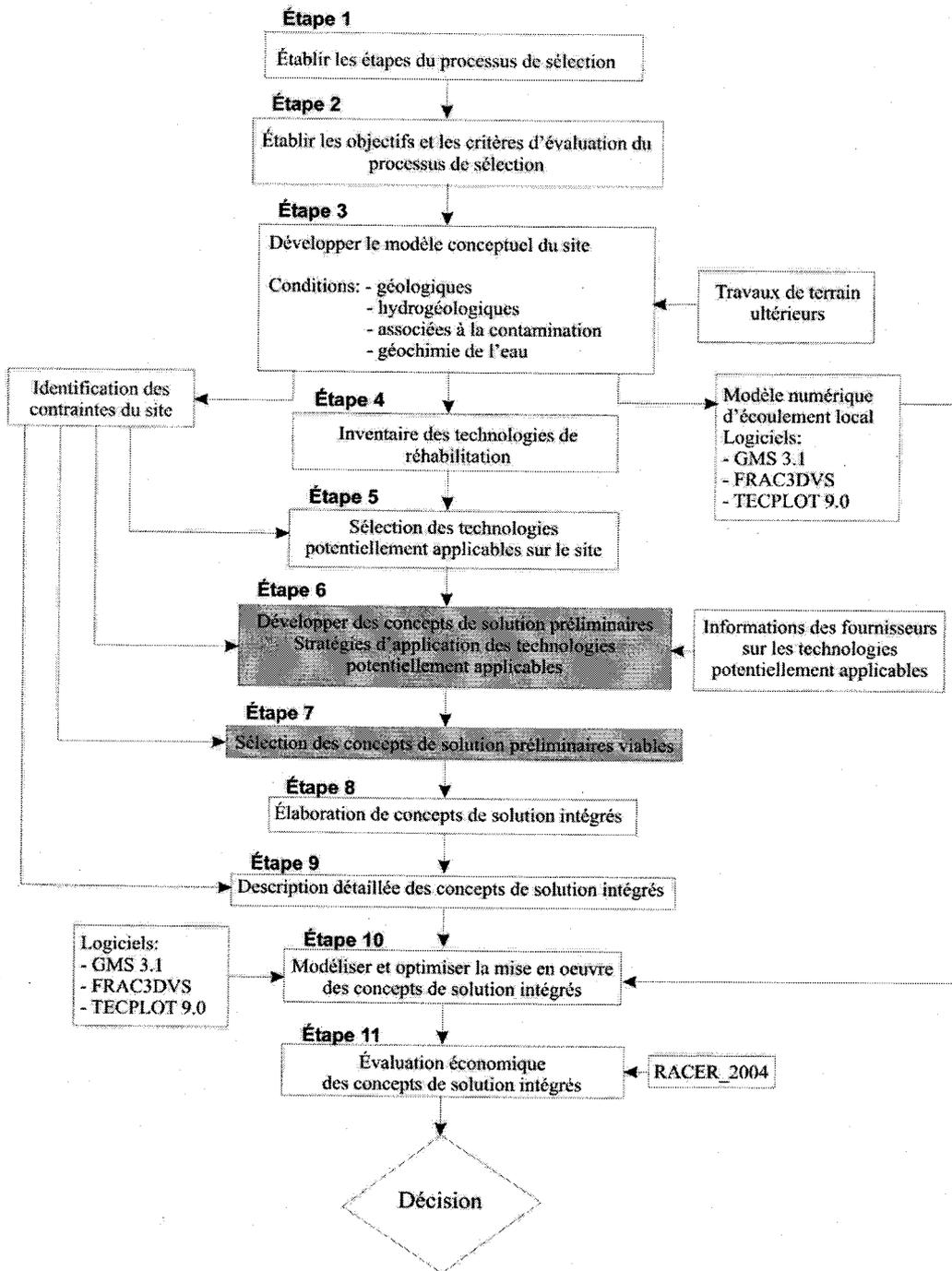


Figure 5.1 : Phase II du processus de sélection

Ce dernier concept pour le roc fracturé a été combiné dans le tableau 5.1 au concept 4, soit le contrôle hydraulique dans l'aquifère granulaire.

Le **premier concept** est le confinement des zones sources situées dans l'aquifère granulaire. Ce concept inclut le confinement vertical et le recouvrement imperméable. Ce concept a pour but de limiter les émissions de contaminants organiques dissous hors de l'enceinte confinée ainsi que l'infiltration d'eau à partir de la surface. Le **deuxième concept** est le contrôle passif et semi-passif *in situ* du panache d'eau contaminée situé dans l'aquifère granulaire. Les technologies dites passives et semi-passives permettent d'intercepter et de traiter *in situ* un panache d'eau contaminée, sans changer les conditions hydrauliques dans l'aquifère et sans nécessiter de traiter les effluents *ex situ*. Le **troisième concept** est la création de zones réactives *in situ* pour le contrôle du panache d'eau contaminée situé dans l'aquifère granulaire. Tout comme le deuxième concept, ces technologies interceptent et traitent le panache. Toutefois, elles sont dites actives et impliquent donc des échanges hydrauliques dans l'aquifère (pompage et injection de fluides). Le **quatrième concept** est le contrôle hydraulique du panache d'eau contaminée présent dans l'aquifère granulaire. Ce concept fait appel à une pratique courante, soit l'utilisation d'un système de pompage et de traitement afin de capter et de traiter un panache d'eau contaminée. Ces systèmes nécessitent généralement un traitement *ex situ* de l'eau pompée. Le **cinquième concept** de solution est similaire au quatrième, toutefois il est appliqué au panache d'eau contaminée situé dans l'aquifère de roc fracturé.

Dans les sections subséquentes, les aspects suivants sont discutés.

- Comment les contraintes du site peuvent affecter les concepts de solutions préliminaires;
- La localisation possible des concepts de solution préliminaires;
- Pour chacun des concepts de solution préliminaires;
 - Objectifs et description du concept;
 - Technologies potentiellement applicables au concept;
 - Options d'application (variantes possibles dans un concept donné);

- Les mesures complémentaires aux concepts de solution préliminaires;
- Le traitement des effluents associés aux concepts de solution préliminaires.

Tableau 5.1 : Résumé des concepts de solution préliminaires envisagés

Technologies de contrôle	Combinaisons technologiques	Mesures complémentaires
<i>Concept 1 : Confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire</i>		
<ul style="list-style-type: none"> • Recouvrement imperméable • Confinement vertical <ul style="list-style-type: none"> ○ Palplanche ○ Support et mélange de bentonite ○ Mélange de sol en profondeur ○ Pieux sécants 	<ul style="list-style-type: none"> • Confinement seul • + Pompage interne + Traitement <i>ex situ</i> • + Pompage interne + Traitement semi-passif 	<ul style="list-style-type: none"> • Pompage préalable de l'eau contaminée dans les nappes perchées des anciennes lagunes
<i>Concept 2 : Contrôle passif et semi-passif dans l'aquifère granulaire</i>		
<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle passif <ul style="list-style-type: none"> ○ Mur réactif • Contrôle semi-passif <ul style="list-style-type: none"> ○ Barrière biologique ○ Mélange de sol en profondeur 	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle passif ou semi-passif seul • + Murs latéraux verticaux confinant l'écoulement local (aquifère granulaire) • + Pompage latéral interceptant l'eau non contaminée 	<ul style="list-style-type: none"> • Pompage de l'eau contaminée dans les nappes perchées des anciennes lagunes et autres mesures pour stabiliser les émissions des zones sources
<i>Concept 3 : Création de zones réactives dans l'aquifère granulaire</i>		
<p>Traitement</p> <ul style="list-style-type: none"> • Oxydation ou réduction chimique <i>in situ</i> • Séparation des gaz dans le puits (Injection d'air) • Biodégradation améliorée • Barbotage <p>Hydraulique</p> <ul style="list-style-type: none"> • Puits de pompage • Puits de re-circulation 	<ul style="list-style-type: none"> • Zone réactive ponctuelle • Zones réactives en série • Zones réactives combinées • Confinement physique ou hydraulique de l'écoulement local 	<ul style="list-style-type: none"> • Pompage préalable de l'eau contaminée dans les nappes perchées des anciennes lagunes • Colmatage des fenêtres pour limiter l'interaction entre les deux aquifères
<i>Concepts 4 et 5 : Contrôle hydraulique du panache dans l'aquifère granulaire et de roc fracturé</i>		
<ul style="list-style-type: none"> • Pompage • Extraction à deux phases 	<ul style="list-style-type: none"> • Pompage seul • + Murs latéraux verticaux confinant l'écoulement local (aquifère granulaire) • + Pompage latéral interceptant l'eau non contaminée 	<ul style="list-style-type: none"> • Pompage préalable de l'eau contaminée dans les nappes perchées des anciennes lagunes • Colmatage des fenêtres pour limiter l'interaction entre les deux aquifères

5.1.1 Contraintes affectant les concepts de solution préliminaires

Les différentes contraintes du site ont été présentées au chapitre 2. Ces contraintes agissent à différents degrés sur les divers concepts de solution préliminaires qui ont été développés. L'annexe F présente les différents concepts de solution et les contraintes associées. Certaines de ces contraintes peuvent restreindre plus d'un concept à la fois.

Dans les contraintes anthropiques, la présence d'installations et de bâtiments sur le site constitue une limitation physique à la réalisation de tous les concepts de solution. Les concepts nécessitant la mise en place de murs sont les plus susceptibles d'être contraints. Toutefois, certains concepts utilisant les installations existantes sur le site telles l'UTES peuvent être avantagés.

Dans les contraintes géologiques, la variabilité de l'épaisseur de till compact sur le site à l'étude est une contrainte qui est considérée pour tous les concepts qui nécessitent une assise imperméable, tels les murs imperméables ou réactifs. Cependant, l'épaisseur de 6 m et plus sous les anciennes lagunes présente un avantage pour le confinement des zones sources. Également à titre de contrainte, la présence de fenêtres dans le till compact au nord, centre et sud du site peuvent permettre des fuites de phases libres de contaminants ou de phases dissoutes dans l'aquifère de roc fracturé, si elles sont situées dans une zone confinée ou en amont d'un futur système passif. Pour ce qui du contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé, il est limité par le manque de connaissance au niveau de la fracturation verticale du socle rocheux. Ces incertitudes nécessitent de concevoir un système de contrôle hydraulique sécuritaire.

Dans les contraintes hydrogéologiques, la section d'écoulement dans l'aquifère granulaire à l'est des anciennes lagunes est chenalisée. Ceci limite la largeur du panache d'eau contaminée à contrôler à cet endroit. Tandis qu'au sud, la section d'écoulement est peu restreinte et constitue alors une limitation pour le contrôle du panache d'eau contaminée. En fait, la convergence des eaux, au sud du site, augmente les dimensions physiques du panache d'eau contaminée et dilue les concentrations en contaminants organiques

dissous. Ceci nécessite, pour un contrôle optimal, un confinement partiel de la section d'écoulement dans l'aquifère granulaire combiné aux technologies de contrôle.

De même, les fenêtres dans les tills constituent des limitations à l'efficacité des concepts qui utilisent des systèmes hydrauliques, puisque ceux-ci peuvent amplifier les échanges hydrauliques entre les deux aquifères. Également à titre de contrainte, les conditions hydrauliques variables dans l'aquifère granulaire peuvent possiblement limiter l'efficacité de tous les concepts de solution. Par exemple, une diminution du rabattement de la nappe libre, suite à l'arrêt de l'UTES, va mettre en contact un plus grand volume d'eau avec les sols contaminés à la base des lagunes, ce qui va augmenter le volume d'eau contaminée, ainsi que possiblement les dimensions et les concentrations du panache. Les technologies passives et semi-passives pour le contrôle du panache ne sont pas robustes par rapport à ces variations et peuvent avoir des difficultés à s'adapter à des conditions changeantes. D'autre part, les concepts utilisant des systèmes hydrauliques peuvent contrer ces variations avec de simples ajustements de débits. Les conditions hydrauliques variables affectent également le concept de confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire. En effet, des charges hydrauliques plus importantes à l'intérieur de la zone confinée qu'à l'extérieur peuvent engendrer des surpressions favorisant les fuites si l'eau à l'intérieur de l'enceinte s'accumule en l'absence de pompage interne.

Dans les contraintes associées à la contamination, les extensions des panaches d'eau contaminée dans les aquifères granulaire et de roc fracturé sont mal connues. Toutefois, les dimensions du panache dans l'aquifère granulaire peuvent être supposées semblables à la section d'écoulement. Également à titre de contrainte, la variété des contaminants constituant les panaches ainsi que les fortes concentrations limitent l'efficacité des concepts utilisant des technologies chimiques et physiques, telles les murs réactifs et les zones réactives, dont les produits utilisés sont sélectifs dans les types et les concentrations de contaminants traités.

Les changements d'émission des zones sources en fonction des conditions d'écoulement dans l'aquifère granulaire nécessitent des concepts robustes aux variations de

concentrations et des types de contaminants dans le temps. Le flux de masse de contaminants important en aval des anciennes lagunes et la faible largeur du panache d'eau contaminée favorisent l'interception du panache d'eau contaminée de l'aquifère granulaire à cet emplacement.

La présence d'une accumulation de LID en aval des anciennes lagunes et l'existence de nappes perchées contaminées dans les anciennes lagunes constituent des contraintes pour l'ensemble des concepts de solution. Des mesures complémentaires externes aux concepts peuvent être mises en œuvre pour minimiser l'impact de ces conditions.

Les contraintes du site affectent la mise en application des concepts de solution préliminaires. Également, ces contraintes sont considérées dans le choix des futurs emplacements de ces concepts.

5.1.2 Localisation des concepts de solution préliminaires

Les localisations qui sont envisagées pour la mise en place des différents concepts de solution sont montrées à la figure 5.2. Chacun de ces emplacements présente un nombre varié d'avantages et de désavantages pour l'implantation de ces concepts (Annexe G).

L'emplacement 1, correspondant aux pourtours des anciennes lagunes, présente un intérêt pour le concept de confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire. En effet, la présence d'une épaisseur de till compact, supérieure à 6 m, à cet emplacement, permet d'offrir une assise imperméable aux murs de confinement latéraux.

L'aval immédiat des anciennes lagunes correspond à *l'emplacement 2*. Cette localisation présente le plus d'intérêt pour la mise en place de tous les concepts d'interception du panache d'eau contaminée dans l'aquifère granulaire. D'une part, le confinement naturel offert à l'ouest par l'unité de till compact restreint l'écoulement de l'eau souterraine, ce qui limite la largeur du panache à contrôler. D'autre part, la présence de quelques mètres de till compact à l'est des anciennes lagunes diminue la profondeur du panache à contrôler. De plus, les concentrations en contaminants organiques dissous sont les plus

élevées à cet emplacement, puisqu'il est le plus près du point d'émission et que les apports en eau non contaminée sont les moins importants du site. D'ailleurs, la vitesse d'écoulement est plus faible au point d'émission du panache que dans le centre de la section d'écoulement due à la plus faible épaisseur saturée à cet endroit.

Le choix de l'emplacement 2 pour le contrôle du panache dans l'aquifère granulaire présente plusieurs avantages qui diffèrent selon le concept. Dans le cas d'un contrôle hydraulique, le débit nécessaire au captage va être moindre que celui des puits de l'UTES, puisqu'à cet emplacement la largeur du panache est plus faible et les vitesses d'écoulement naturelles sont moindres. De ce fait, moins de dilution au niveau du système de pompage va se produire et les échanges hydrauliques entre les aquifères vont être minimisés. Dans le cas d'une zone réactive, les points de traitement nécessaires au contrôle du panache vont être moindres que si le contrôle est effectué au sud du site. Pour les technologies passives et semi-passives, leurs dimensions vont être plus faibles que celles nécessaires au contrôle plus au sud. Enfin, à l'emplacement 2, les fortes concentrations en contaminants organiques dissous et les faibles apports en eau contaminée diminuent le risque de dilution et de sur-traitement au niveau du système de contrôle et de traitement.

Certains désavantages existent toutefois à la localisation 2. Entre autres, les vitesses d'écoulement élevées dans le centre de la section d'écoulement peuvent influencer les conditions de contrôle au point d'émission du panache. Afin d'éviter ces vitesses d'écoulement élevées, des mesures de contournement de l'eau souterraine chenalisée à l'est des anciennes lagunes peuvent être envisagées. Ensuite, une fenêtre dans le till existe en amont de l'emplacement 2. L'implantation de technologies hydrauliques peut créer des échanges entre les deux aquifères ou des fuites peuvent survenir dans le cas de l'implantation d'une technologie passive ou semi-passive en aval de cette fenêtre. Également comme désavantage, une plus grande distance sépare cet emplacement des installations de l'UTES qui pourraient peut-être servir au traitement des effluents.

L'emplacement 3, situé à mi-chemin entre les anciennes lagunes et l'UTES, présente peu d'avantages en comparaison à l'emplacement 2 pour le contrôle du panache d'eau contaminée dans l'aquifère granulaire. L'élargissement de la section d'écoulement, créé par l'absence du till compact à l'ouest, augmente la largeur du panache d'eau contaminée qui doit être contrôlée. La profondeur du panache à contrôler est également supérieure à celle de l'emplacement 2, puisque moins de 1 m de till compact recouvre le socle rocheux. À l'emplacement 3, les apports d'eau latéraux sont plus importants qu'au nord du site, ce qui dilue le panache et augmente ses dimensions. De ce fait, le débit nécessaire au contrôle à l'emplacement 3 va être plus important qu'en aval des anciennes lagunes, soit à l'emplacement 2.

Des fenêtres dans le till compact existent dans la trajectoire des anciennes lagunes vers l'UTES. L'implantation de technologies de contrôle hydraulique près de ces fenêtres pourrait créer possiblement des interférences hydrauliques entre les deux aquifères. De plus, l'implantation d'une technologie passive ou semi-passive en aval de ces fenêtres peut engendrer des fuites. Les avantages de l'emplacement 3 est sa proximité de l'UTES et les vitesses d'écoulement qui sont équivalente à l'emplacement 2 (d'après nos travaux antérieurs).

L'emplacement 4 en amont de l'UTES, présente essentiellement les mêmes avantages et désavantages rencontrés par l'emplacement 3. Toutefois, à un degré supérieur.

L'emplacement 5, situé à l'ouest de l'UTES, présente un intérêt certain pour la mise en place du contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé. Un contrôle en cet emplacement va mieux cibler la zone source située dans l'aquifère de roc fracturé.

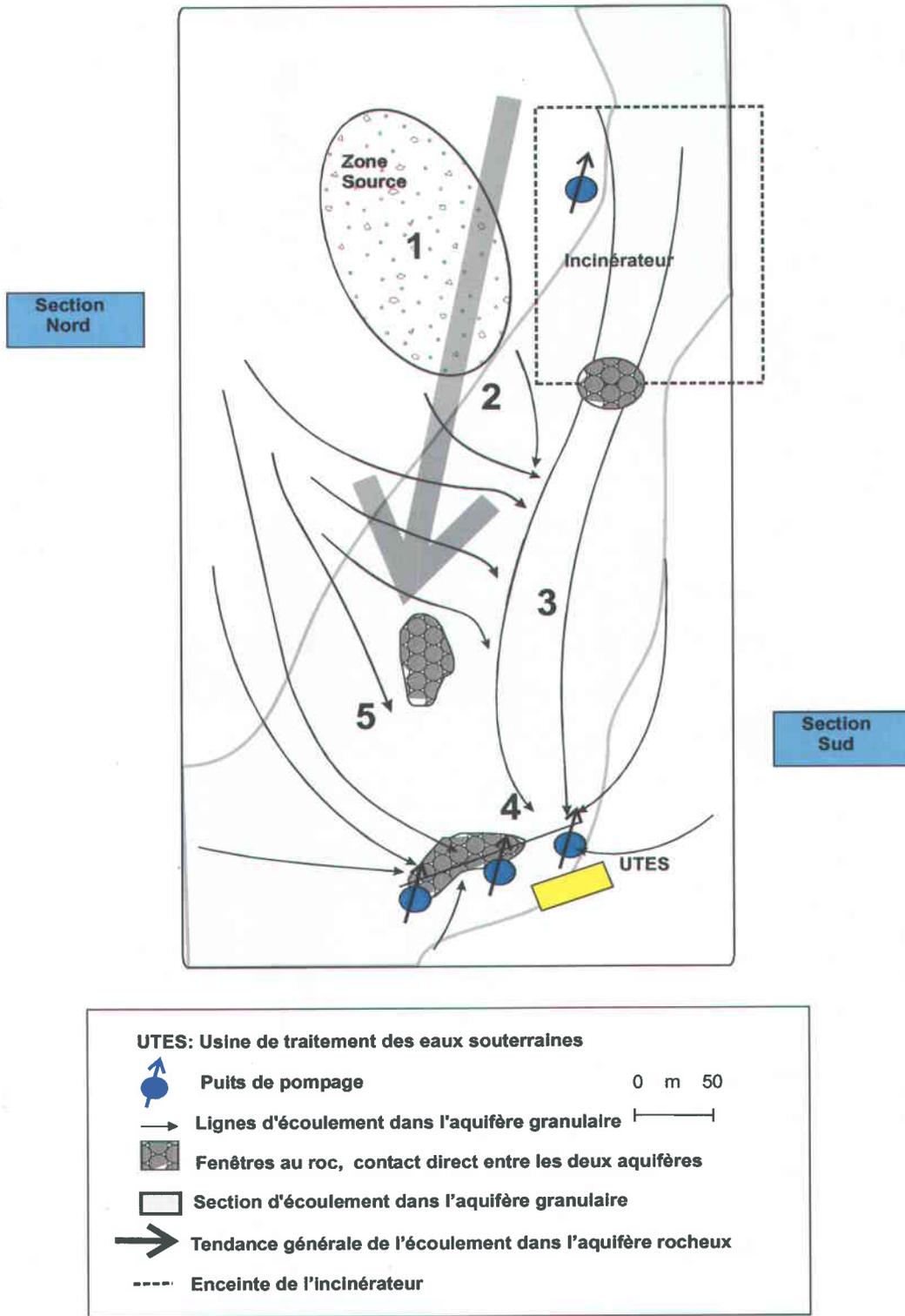


Figure 5.2 : Localisations considérées pour la mise en place des concepts de solution

Le tableau 5.2 résume les emplacements favorisés pour les concepts de solution préliminaires. L'emplacement 1 s'avère le plus favorable au confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire. L'emplacement 2 est le plus adéquat pour tous les autres concepts de solution applicables à l'aquifère granulaire. Enfin, l'emplacement 5 est le mieux adapté au contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé. Ces emplacements sont considérés dans la conception préliminaire des solutions de contrôle et traitement des panaches d'eau contaminée de Ville-Mercier présentées dans les sections 5.1.3 à 5.1.7.

Tableau 5.2 : Emplacements favorisés pour les concepts de solution préliminaires

Aquifère	Concept de solution préliminaire	Emplacement favorisé
Granulaire	Confinement des zones sources	1
	Contrôle passif et semi-passif	2
	Contrôle par zones réactives	2
	Contrôle hydraulique	2
Roc fracturé	Contrôle hydraulique	5

5.1.3 Confinement des zones sources de l'aquifère granulaire

5.1.3.1 Objectifs et description du concept de confinement

Des zones sources émettent encore activement des contaminants organiques dissous dans l'aquifère granulaire du site des anciennes lagunes de Ville-Mercier. Ces zones sources actives sont constituées de l'enceinte et des sols adjacents aux anciennes lagunes qui contiennent des LID et LIL ainsi que d'une accumulation connue de LID reposant sur le till en aval des anciennes lagunes. Ces zones sources sont susceptibles d'émettre des contaminants dissous dans l'aquifère granulaire à très long terme, ce qui requiert le maintien de mesures de contrôle et de traitement du panache à très long terme.

Le concept de confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire a pour objectifs principaux de minimiser les émissions de contaminants dissous dans l'aquifère granulaire et de limiter l'infiltration à partir de la surface. Ce concept exige la mise en place à la fois de technologies permettant le confinement vertical des sols contaminés et d'un système

de recouvrement imperméable. À court terme, les puits de l'UTES devront être en fonction afin de résorber le panache qui existera entre l'enceinte confinée et l'UTES. À moyen terme, le confinement pourra constituer la seule option de contrôle dans l'aquifère granulaire.

Plusieurs modes d'application du concept de confinement sont étudiés. D'abord, le confinement vertical et horizontal des zones sources est envisagé comme unique mesure, sans autre action. Ensuite le confinement est considéré combiné à un pompage interne, ce qui aurait comme effet de minimiser les fuites d'eau contaminée en dehors de l'enceinte des zones sources confinées. Cette option permettrait également de compenser l'effet de l'infiltration d'eau qui peut survenir même si une membrane présumée étanche recouvre les zones sources. Toutefois, cette option a comme désavantage de produire des effluents à traiter. Dans ce concept, les traitements envisagés pour les effluents sont de type conventionnel, *ex situ*, ou semi-passif, *in situ*.

L'avantage de l'approche par confinement est de permettre l'arrêt des émissions de contaminants dissous dans l'aquifère granulaire et de ne pas nécessiter de mesures autres que la surveillance en dehors de l'enceinte des zones sources confinées. Le désavantage de cette approche réside dans le coût en capital initial qui peut être très élevé pour la mise en place des infrastructures de confinement, de pompage et de traitement. Si le traitement des effluents pompés peut se faire passivement, les coûts d'opération d'une telle infrastructure peuvent être relativement limités. Un des grands avantages de ce concept est sa robustesse, c'est-à-dire sa capacité d'assurer la même efficacité de contrôle en dépit des modifications possibles des conditions hydrauliques dans le secteur suite à l'arrêt éventuel du pompage à l'UTES.

5.1.3.2 Technologies potentiellement applicables au confinement

Dans cette section, les technologies principales applicables au confinement vertical et horizontal sont présentées.

Technologies applicables au confinement vertical

Des approches éprouvées sont disponibles pour permettre un confinement vertical efficace. Les principales technologies de confinement vertical existantes sont les suivantes :

- Tranché combinée d'un remplissage de matériaux de faible perméabilité, tel que la bentonite « slurry wall » (Ciment Bentonite (CB), Sol Bentonite (SB), Sol Ciment Bentonite (SCB));
- Mur imperméable de métal « sheet pile cutoff wall »;
- Mur imperméable composé;
- Injection de produit expansif imperméable « jet grouting »;
- Mélange de sol en profondeur de matériaux de faible perméabilité « deep soil mixing »;
- Pieux sécants.

Les définitions des technologies de confinement vertical sont présentées à l'annexe H.

Résumé des technologies pour le confinement vertical

Le tableau 5.3 présente les différents avantages, désavantages et coûts associés aux technologies utilisées pour le confinement vertical. Les avantages principaux recherchés pour le concept de confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire sont la résistance et l'efficacité du mur ainsi que de faibles coûts en capital. Dans l'ensemble des technologies de confinement, le mur imperméable composé présente le plus d'avantages. Entre autres, il est moyennement coûteux, soit entre 138-332\$ le m², il possède une grande résistance aux concentrations élevées en contaminants et présente une très faible perméabilité, soit 10⁻¹³ m/s. Les autres technologies sont soit peu résistantes aux fortes concentrations, soit trop coûteuses, soit plus perméables que le mur imperméable composé ou que ces types de mur peuvent se dégrader et fragmenter dans des conditions variables d'humidité et de températures.

Technologies applicables au confinement horizontal

Le confinement horizontal peut être réalisé par des géomembranes et autres matériaux imperméabilisants. Le confinement horizontal est pratiqué couramment dans un grand nombre d'applications et ne sera donc pas discuté en détail.

5.1.3.3 Options d'application du confinement

Plusieurs options d'application sont envisagées pour le confinement vertical et horizontal des zones sources. La figure 5.3 présente l'emplacement du concept de confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire ainsi que les différentes options suivantes:

1. Confinement total (vertical et horizontal);
2. Confinement total combiné d'un pompage interne avec traitement conventionnel;
3. Confinement total combiné d'un pompage interne avec traitement semi-passif.

Confinement total

L'objectif du confinement total des zones sources est de limiter les émissions de contaminants organiques dissous dans l'aquifère granulaire et l'apport vertical et latéral d'eau souterraine mis en contact avec les zones sources. L'avantage particulier de cette option est que les coûts d'opération sont inexistants. Toutefois, les coûts en capitaux sont très élevés ($\approx >5$ M\$). Un autre désavantage du confinement seul est qu'il est plus susceptible de permettre des fuites.

Tableau 5.3 : Avantages et désavantages des technologies de confinement vertical

Technologies	Avantages	Désavantages	Coûts
« Slurry Wall »	<ul style="list-style-type: none"> • Conductivité hydraulique de moyenne à faible • Installation rapide • Technique pratiquée couramment • Coûts peu élevés • Peut atteindre de grandes profondeurs d'excavation, soit plus de 60 m • Faiblement compressible 	<ul style="list-style-type: none"> • La dégradation du mur peut être accélérée par la présence de contaminants en fortes concentrations • Des discontinuités dans le mur peuvent survenir • Des fractures peuvent être engendrées par des grands écarts de températures et d'humidité • Requiert de l'excavation et un site pour effectuer les mélanges utilisant du sol • Limité à la verticale 	<p>CB</p> <p>Entre 156 - 313\$ le m²</p> <p>SB</p> <p>Entre 78 - 109\$ le m²</p> <p>Entre 230 - 612\$ le m²</p>
« Sheet Pile »	<ul style="list-style-type: none"> • Matériel de grande force pour retenir le sol et l'eau • Résistant chimiquement aux contaminants • Ne requiert pas d'excavation • Technique pratiquée couramment • Peut créer des formes irrégulières de confinement • Résistant • Faible conductivité hydraulique 	<ul style="list-style-type: none"> • Les joints peuvent fuir • Les murs peuvent être attaqués par la corrosion • Technologie dispendieuse • La profondeur d'implantation est limitée à 45 m 	
Mur imperméable composé	<ul style="list-style-type: none"> • La géomembrane est résistante et flexible aux stress appliqués • Perméabilité très faible 10⁻¹³ • Durable et résistant aux fortes concentrations en contaminants • Barrière imperméable contre les phases liquides et gazeuses • Longue durée de vie • Installation rapide et peut coûteuse • Faible épaisseur • Ne requiert pas d'excavation pour l'insertion par vibration 	<ul style="list-style-type: none"> • La profondeur d'insertion de la géomembrane dépend de la technique utilisée • La durée de vie de la géomembrane est peu connue • Requiert de l'excavation pour l'insertion en tranchée 	<p>Méthode</p> <p>Tranchée</p> <p>Entre 138 - 230\$ le m²</p> <p>Méthode</p> <p>Vibration</p> <p>Entre 184 - 332\$ le m²</p>
« Jet Grouting »	<ul style="list-style-type: none"> • Peut stabiliser différents types de sol • Peut créer de larges murs à partir de puits d'observation • Peut atteindre des profondeurs de plus de 60 m • Les puits peuvent être orientés, et donc former des murs inclinés 	<ul style="list-style-type: none"> • Des discontinuités dans le mur peuvent survenir • Possibilité de désalignement • L'efficacité de cette technique est influencée par l'obstruction du jet • La présence de vides peut induire de la fissuration • Pression et volume d'injection doivent être bien observés 	<p>Entre 230 - 460\$ le m²</p>
« Deep soil mixing »	<ul style="list-style-type: none"> • Peut être installé dans un aquifère confiné • Duré de vie du mur = Duré de vie des agents imperméables • Moins de risques d'effondrement, car le mur est fabriqué en petites sections 	<ul style="list-style-type: none"> • Il est difficile de vérifier la continuité du mur • Le sol contaminé intégré dans le mur diminue sa durée de vie • La présence de galets peut diminuer l'efficacité du mur • Profondeur limitée à 30 m 	<p>Entre 153 - 306\$ le m²</p>
Pieux sécants	<ul style="list-style-type: none"> • Technique utilisée couramment • Mêmes avantages que le « Slurry Wall » • Technique peu limitée dans l'orientation 	<ul style="list-style-type: none"> • Coûts dispendieux • Mêmes désavantages que le « Slurry Wall » 	<p>Entre 1042 - 2084\$ le m²</p>

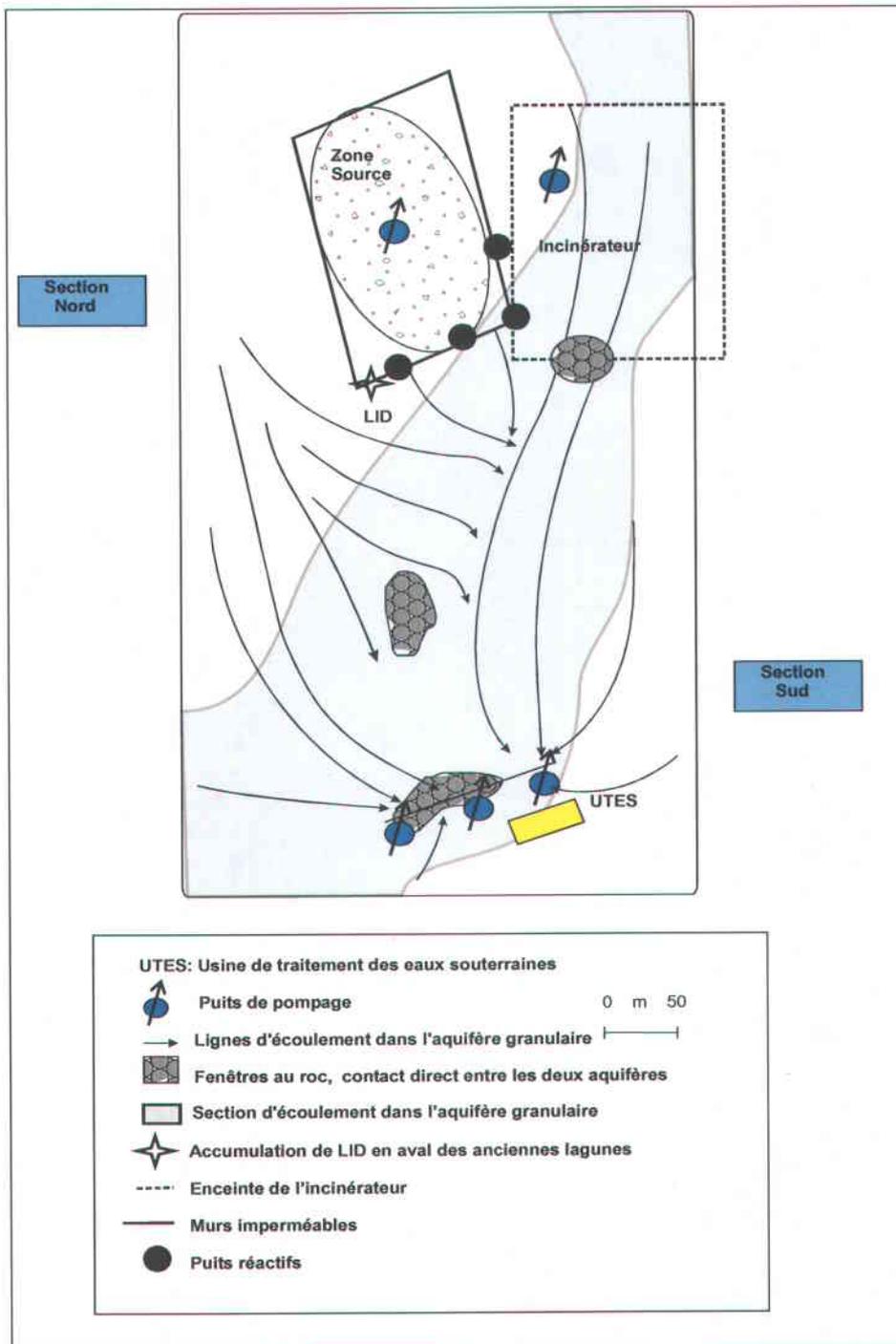


Figure 5.3 : Concept de confinement des zones sources situées dans l'aquifère granulaire

Confinement total combiné d'un pompage interne avec traitement conventionnel

L'objectif d'un pompage interne dans l'enceinte confinée est de contrôler les conditions hydrauliques, de sorte que les charges dans l'enceinte soient inférieures aux charges à l'extérieur. Ce contrôle permet que toutes infiltrations latérales se produisent plutôt vers l'intérieur de l'enceinte confinée que vers l'aquifère granulaire. Ce pompage interne va permettre également d'évacuer l'eau contenue dans les nappes perchées existantes au niveau des anciennes lagunes qui constituent des sources potentielles de contamination. L'avantage particulier de cette option est que le potentiel d'efficacité est beaucoup plus élevé que le confinement sans pompage, et cela même si le confinement est imparfait. Toutefois, les coûts d'opération sont supérieurs, car le pompage produit des effluents à traiter. Par défaut, des traitements conventionnels *ex situ* sont envisagés dans cette option.

Confinement total combiné d'un pompage interne avec traitement semi-passif

Combiner le pompage interne à un traitement semi-passif, tels des puits réactifs, a comme principal objectif de traiter *in situ* les effluents du pompage interne. Dans cette option, le point de rejet des effluents traités est prévu dans l'aquifère granulaire. L'avantage principal de cette option est que les coûts d'opération liés au traitement des effluents seraient possiblement diminués par rapport à un traitement conventionnel *ex situ*. Toutefois, l'efficacité et la robustesse d'un traitement semi-passif face aux variations de concentrations et de types de contaminants sont peu prouvées.

5.1.4 Contrôle passif et semi-passif de l'aquifère granulaire

5.1.4.1 Objectifs et description du concept de contrôle passif et semi-passif

Suite à la sélection des technologies potentiellement applicables pour le contrôle et le traitement des panaches d'eau contaminée de Ville Mercier, des technologies de contrôle passif et semi-passif sont envisagées. L'avantage principal de telles technologies réside dans le fait qu'elles interceptent et traitent l'eau contaminée dans l'aquifère et ne produisent pas de rejet gazeux, liquide ou solide à traiter dans des systèmes externes aux aquifères. Bien que ces technologies présentent généralement un fort coût en capital lors

de leur implantation, leurs coûts d'opération et d'entretien sont inférieurs à ceux des systèmes de contrôle hydraulique, tels le pompage et traitement conventionnel. Les technologies dites passives demandent peu d'apport de produits chimiques ou biologiques pour effectuer la dégradation des contaminants. Toutefois, ces apports sont constamment nécessaires pour les technologies dites semi-passives.

Au site à l'étude, l'objectif d'un système de contrôle passif ou semi-passif est d'intercepter et de traiter *in situ* le panache d'eau contaminée existant dans l'aquifère granulaire. À court terme, ce système peut fonctionner en concomitance avec l'UTES pour résorber le panache de contaminants dissous qui existera entre le système de contrôle passif et l'UTES. À moyen terme, ce système pourra devenir l'unique mesure de contrôle du panache d'eau contaminée.

Les technologies de contrôle passif ou semi-passif sont sélectives au niveau des contaminants traités. Dans certains cas, ces technologies doivent être combinées à d'autres technologies qui peuvent traiter les contaminants dissous non interceptés par un premier type de technologie. De ce fait, l'implantation d'un système de surveillance des concentrations de contaminants est nécessaire en aval de tels systèmes de contrôle.

Les coûts en capitaux des technologies de contrôle passif ou semi-passif sont associés aux éléments de conception, soit les dimensions de la zone de traitement, le volume de produits réactifs nécessaire et le choix intrinsèque des produits réactifs. Dans le cadre de ce projet, la solution optimale pour le contrôle passif ou semi-passif du panache d'eau contaminée vise à minimiser les coûts en capitaux et en opération tout en maximisant l'interception et le traitement.

5.1.4.2 Technologies potentiellement applicables au contrôle passif et semi-passif

Au chapitre 4, les technologies de contrôle passif et semi-passif potentiellement applicables au site, identifiées par la sélection initiale, ont été les suivantes:

Technologies passives

- Murs réactifs.

Technologies semi-passives

- Barrière biologique; et
- Mélange de sol en profondeur.

Ces technologies peuvent être appliquées en mode de contrôle total du panache afin de réduire les concentrations de contaminants pour qu'elles rencontrent les normes ou en mode réduction de masse, avant l'application d'une technologie complémentaire. Il faut mentionner que le mur réactif de fer monovalent ne peut traiter qu'une partie des contaminants présents au site. Des informations complémentaires fournies par Envirometal sur la technologie de mur réactif et de puits réactifs utilisant du fer monovalent sont présentées à l'annexe I. Envirometal a fait une étude de traitabilité d'échantillons d'eau obtenus du site de Ville-Mercier et a ainsi démontré le potentiel réel d'application des technologies utilisant du fer monovalent pour ce site.

Les définitions des technologies de contrôle passif et semi-passif sont présentées à l'annexe H.

Résumé des technologies pour le contrôle passif et semi-passif

Le tableau 5.4 présente les avantages et les désavantages des différentes technologies applicables au contrôle passif et semi-passif dans l'aquifère granulaire. Dans l'ensemble des technologies de contrôle passif et semi-passif, le mélange de sol en profondeur présente le plus d'intérêt. Son efficacité pour traiter tous les types de contaminants présents dans le panache d'eau contaminée et sa robustesse aux conditions hydrauliques, de concentrations et de types de contaminants variables, surpassent l'efficacité et la robustesse des autres technologies envisagées. En fait, les dimensions et la réactivité du « mélange de sol en profondeur » peuvent être ajustées si nécessaire. Toutefois, cette technologie est peu éprouvée. Il est à noter que le mur réactif et la barrière biologique ne peuvent s'adapter à des conditions hydrauliques variables, ce qui limite l'efficacité de ces technologies sur le site des anciennes lagunes de Ville-Mercier.

Tableau 5.4 : Avantages et désavantages des technologies de contrôle passif et semi-passif

Technologies	Avantages	Désavantages
Mur réactif	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie de contrôle passif prouvée • Durable, plus de 25 ans 	<ul style="list-style-type: none"> • Peu robuste aux conditions changeantes (hydrauliques, de concentrations et de types de contaminants) • Peu efficace pour les types de contaminants présents
Barrière biologique	<ul style="list-style-type: none"> • Efficace pour tous les types de contaminants • Robuste aux conditions changeantes de concentrations en contaminants et de types de contaminants • Durable, plus de 25 ans 	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie de contrôle semi-passif peu prouvée • Peu robuste aux conditions hydrauliques variables • Peut être inefficace à des concentrations élevées en contaminants
Mélange de sol en profondeur	<ul style="list-style-type: none"> • Robuste aux conditions changeantes (hydrauliques, concentrations, types de contaminants) • Durable, plus de 25 ans • Efficace pour tous les types de contaminants 	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie de contrôle semi-passif peu prouvée

5.1.4.3 Options d'application du contrôle passif et semi-passif

Plusieurs options d'application sont envisagées pour le contrôle passif et semi-passif du panache d'eau contaminée situé dans l'aquifère granulaire. Elles sont illustrées à la figure 5.4 :

- 1- Contrôle passif ou semi-passif seul;
- 2- Contrôle passif ou semi-passif et murs confinant l'écoulement local;
- 3- Contrôle passif ou semi-passif et déviation hydraulique de l'écoulement local.

Contrôle passif et semi-passif seul

L'objectif principal du contrôle passif et semi-passif seul est d'intercepter et traiter *in situ* le panache d'eau contaminée existant dans l'aquifère granulaire sans nécessiter d'autres installations. Considérant que les technologies de contrôle passif et semi-passif

employées seules doivent posséder au minimum les dimensions physiques du panache d'eau contaminée, le coût de telles technologies peut être parfois très élevé. Dans cette optique, le choix de l'emplacement d'un système de contrôle passif et semi-passif seul doit tenter de minimiser la largeur du panache d'eau contaminée à contrôler et traiter.

L'avantage de cette option est sa simplicité d'installation, d'opération et d'entretien. Toutefois, en ne confinant pas l'écoulement du panache, il pourrait possiblement avoir une partie de celui-ci qui ne soit pas interceptée par le contrôle passif ou semi-passif. De plus, de l'eau non contaminée pourrait être mise en contact avec le panache et augmenter ainsi ses dimensions par dilution.

Contrôle passif et semi-passif et murs confinant l'écoulement local

L'utilisation de murs imperméables combinés au système de contrôle passif et semi-passif a pour objectif principal de confiner l'écoulement du panache et de restreindre ainsi ses dimensions. Conséquemment, les dimensions physiques et les coûts de la technologie de contrôle passif ou semi-passif seraient diminués. Toutefois, les coûts associés aux murs imperméables sont à considérer. Un autre avantage de l'utilisation de murs imperméables est que ceux-ci dévierait l'écoulement local du panache d'eau contaminée et réduirait possiblement la contamination de l'eau souterraine, donc limiterait la croissance du panache. Cette option permettrait d'envisager plusieurs emplacements pour l'installation d'un système de contrôle passif ou semi-passif. Le principal désavantage de cette option est le fait que pour obtenir un confinement efficace de l'écoulement du panache, la géométrie du confinement doit s'approcher de celle du concept de confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire.

Contrôle passif et semi-passif et déviation hydraulique de l'écoulement local

L'objectif de la déviation hydraulique de l'écoulement local combinée à un système de contrôle passif ou semi-passif est de restreindre la largeur du panache et de limiter le contact de celui-ci avec l'eau non contaminée de l'aquifère granulaire. Cette option présente essentiellement les mêmes avantages que l'option utilisant les murs imperméables.

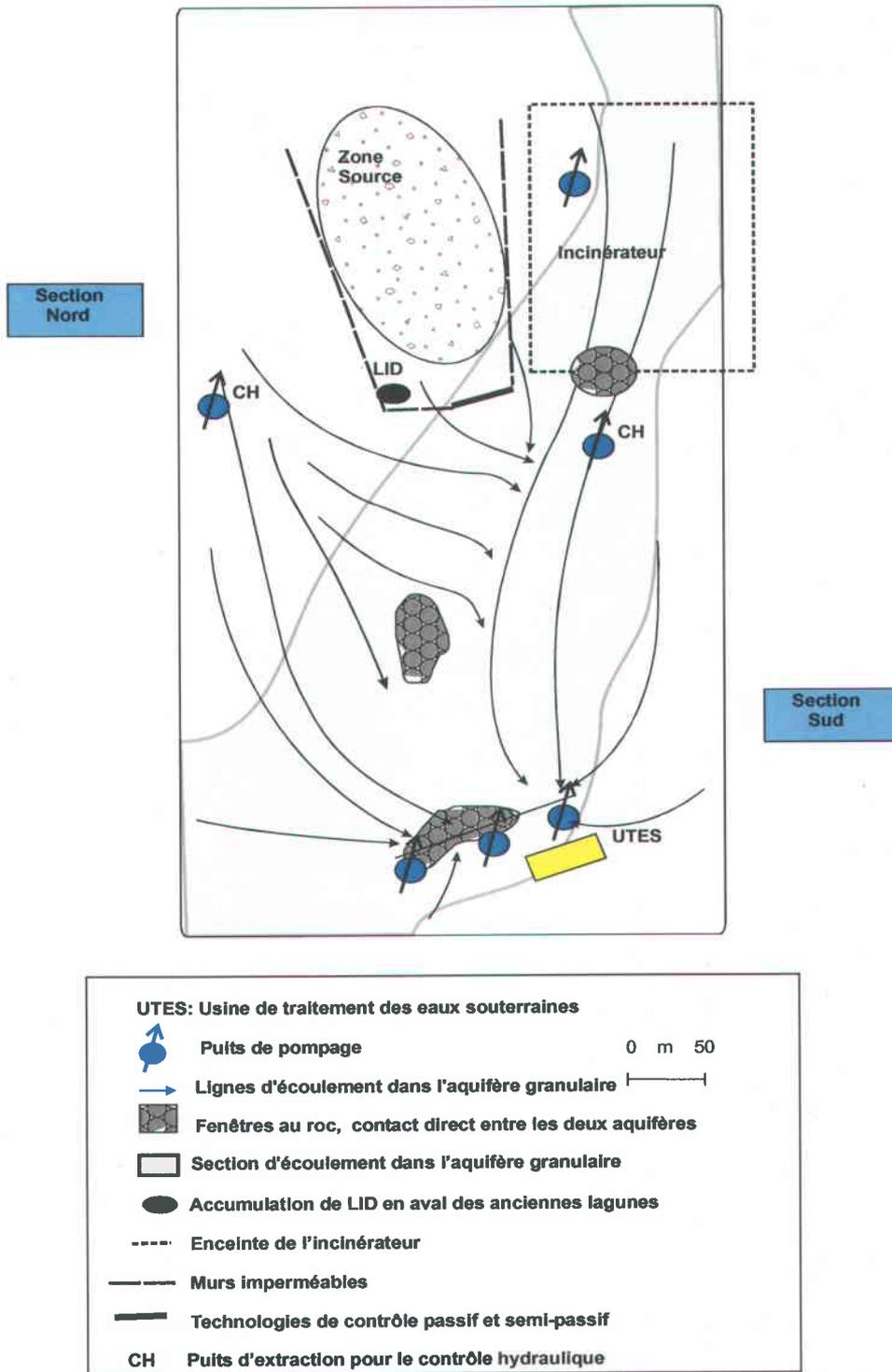


Figure 5.4 : Concept de contrôle passif et semi-passif de l'aquifère granulaire

Un avantage supplémentaire à l'utilisation de technologies de contrôle hydraulique pour dévier l'écoulement local est que ces technologies peuvent s'adapter à différentes conditions hydrauliques du panache d'eau contaminée et de l'eau souterraine. Considérant que les émissions de contaminants dissous provenant des zones sources sont variables dans le temps et qu'elles pourraient croître dû à l'ennoiment possible des zones sources suite à l'arrêt de l'UTES, il est intéressant d'utiliser des technologies qui peuvent s'adapter à de telles conditions. Toutefois, certains désavantages existent à cette option. Entre autres, la déviation hydraulique pourrait amplifier les échanges hydrauliques entre les deux aquifères. De plus, la complexité et les coûts d'opération seraient plus importants que dans les deux options précédentes.

5.1.5 Contrôle par zone réactive dans l'aquifère granulaire

5.1.5.1 Objectifs et description du concept de contrôle par zone réactive

Suite à la sélection de technologies de réhabilitation pour le contrôle et le traitement des panaches d'eau contaminée de Ville-Mercier, des technologies d'enlèvement de masse de types chimique et physique ont été retenues. Certaines de ces technologies, combinées ou en série, permettent de créer des conditions chimiques et physiques requises pour la dégradation des contaminants organiques dissous, d'où le concept de zone réactive. Toutefois, à la différence des technologies de contrôle passif et semi-passif, les technologies créant des zones réactives produisent parfois des rejets gazeux qui doivent être traités dans des systèmes *ex situ*. De plus, ces systèmes demandent des apports constants en produits réactifs, ce qui augmente les coûts d'opération. L'intérêt de ces technologies réside dans le fait qu'elles peuvent s'adapter et des conditions hydrauliques et chimiques variables d'un panache d'eau contaminée, en changeant les conditions hydrauliques d'interception ainsi que le contenu chimique des zones réactives. Afin de réaliser des zones réactives efficaces, le choix des produits réactifs, le nombre et le type de technologies utilisées ainsi que leurs dispositions sur le site doivent être optimaux.

L'objectif d'une zone réactive, au site à l'étude, serait d'intercepter et de traiter le panache d'eau contaminée existant dans l'aquifère granulaire. À court terme, la zone réactive pourrait être en fonction simultanément avec l'UTES afin d'éliminer le panache

d'eau contaminée qui existera entre la zone réactive et l'UTES. À moyen terme, lorsqu'il aura été prouvé que la zone réactive est efficace et que le panache entre celle-ci et l'UTES est résorbé, la zone réactive pourrait devenir la seule mesure de contrôle et de traitement du panache d'eau contaminée.

Une zone réactive est généralement sélective sur les types de contaminants dissous qu'elle peut intercepter et traiter. Dans cette optique, une combinaison de plusieurs produits réactifs et de traitement d'enlèvement de masse physique peut s'avérer plus efficace pour l'interception et le traitement d'un panache d'eau contaminée complexe comme ceux de Ville-Mercier.

Dans le cadre de ce projet, la solution optimale d'une zone réactive vise à minimiser les coûts en capitaux et d'opération tout en maximisant l'interception et le contrôle du panache d'eau contaminée dans l'aquifère granulaire.

5.1.5.2 Technologies potentiellement applicables au contrôle par zone réactive

Au chapitre 4, les technologies suivantes ont été identifiées lors de la sélection initiale pour l'enlèvement de masse de types physiques et chimiques applicables pour la création de zones réactives.

Technologies associées à l'hydraulique de la zone réactive

- Puits conventionnel;
- Puits de re-circulation.

Technologies associées au traitement de la zone réactive

- Biodégradation améliorée;
- Barbotage;
- Séparation des gaz dans le puits (injection d'air);
- Oxydation ou réduction chimique *in situ*.

Les définitions des technologies de contrôle par zone réactive sont présentées à l'annexe H.

Résumé des technologies pour le contrôle par zone réactive

Le tableau 5.5 présente les avantages et les désavantages des différentes technologies applicables au concept de zone réactive dans l'aquifère granulaire. Dans l'ensemble des technologies pouvant s'appliquer au concept de zone réactive, la technologie d'oxydation et de réduction *in situ* présente le plus d'intérêt. En fait, cette technologie combinée à un puits de re-circulation peut créer une zone réactive indépendante qui peut traiter tous les types de contaminants présents dans le panache d'eau contaminée. Lors de conditions variables, tant hydrauliques qu'en terme de concentrations ou de types de contaminants, le débit du puits de re-circulation ou les produits réactifs injectés peuvent être ajustés. Toutefois, cette technologie présente moins d'intérêt si elle est combinée à un système de puits conventionnels. Les désavantages les plus importants des technologies de barbotage et de « séparation des gaz dans le puits (Injection d'air) » sont que ces technologies sont seulement efficaces pour le traitement des contaminants organiques volatils et non les semi-volatils. Pour ce qui est de la biodégradation, elle est augmentée naturellement par l'apport de produits oxydants ou réducteurs. Toutefois, elle ne peut être la seule mesure employée pour le contrôle du panache d'eau contaminée en raison des fortes concentrations en contaminants présentes dans le panache de l'aquifère granulaire à Ville-Mercier.

5.1.5.3 Options d'application du contrôle par zone réactive

Plusieurs options d'application sont envisagées pour la création de zones réactives dans l'aquifère granulaire et elles sont illustrées à la figure 5.5 :

- 1- Zone réactive ponctuelle;
- 2- Zone réactive en série;
- 3- Zone réactive combinée; et
- 4- Confinement physique ou hydraulique de l'eau souterraine non contaminée, s'écoulant à l'est des zones sources, appliqué aux trois options précédentes.

Tableau 5.5 : Avantages et désavantages des technologies de contrôle par zone réactive

Technologies	Avantages	Désavantages
Biodégradation améliorée	<ul style="list-style-type: none"> • Efficace pour tous les types de contaminants • Robuste aux conditions changeantes de concentrations et de types de contaminants • Durable, plus de 25 ans • Technologie prouvée 	<ul style="list-style-type: none"> • Peut être inefficace à des concentrations très élevées en contaminants
Barbotage	<ul style="list-style-type: none"> • Efficace pour les contaminants volatils • Robuste pour les changements de concentrations en contaminants volatils seulement • Durable, plus de 25 ans 	<ul style="list-style-type: none"> • Peut être inefficace pour des contaminants semi-volatils • Traitement <i>ex situ</i> des gaz nécessaire • La zone de traitement ne peut adéquatement être définie • Peu robuste pour les changements de types de contaminants • Techn. partiellement prouvée
Séparation des gaz dans le puits (Injection d'air)	<ul style="list-style-type: none"> • Efficace pour les contaminants volatils • Robuste pour les changements de concentrations en contaminants volatils seulement • Durable, plus de 25 ans 	<ul style="list-style-type: none"> • Peut être inefficace pour des contaminants semi-volatils • Traitement <i>ex situ</i> des gaz nécessaire • Peu robuste pour les changements de types de contaminants • Techn. partiellement prouvée
Oxydation et réduction <i>in situ</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Efficace pour tous les types de contaminants • Robuste aux conditions changeantes de concentrations et de types de contaminants • Durable, plus de 25 ans 	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie partiellement prouvée
Puits conventionnel	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie prouvée • Peut s'adapter à des conditions hydrauliques variables • Durable, plus de 25 ans 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite un puits d'injection et d'extraction pour créer une zone réactive • Le pompage de l'eau contaminée peut nécessiter des permis si réinjectée dans l'aquifère
Puits de re-circulation	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie prouvée • Peut s'adapter à des conditions hydrauliques variables • Chaque puits de re-circulation correspond à une zone réactive • Durable, plus de 25 ans 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite plus d'instrumentation que le puits conventionnel

Zone réactive ponctuelle

L'objectif d'une zone réactive ponctuelle est d'intercepter et de traiter en un seul point et un seul réactif le panache d'eau contaminée situé dans l'aquifère granulaire.

L'interception du panache doit être réalisée en tentant de minimiser le débit de contrôle, afin de limiter les échanges hydrauliques entre les deux aquifères qui peuvent survenir au niveau des fenêtres dans les tills.

L'avantage principal de cette option est que le traitement de l'eau du panache intercepté s'effectue *in situ*. La possibilité de faire varier la quantité de produits injectés dans la zone réactive ponctuelle rend le concept robuste aux conditions changeantes de concentrations de contaminants qui pourraient survenir dans le temps. Également, l'option est robuste aux conditions hydrauliques variables, puisque le débit de ces technologies est ajustable. Toutefois, ces ajustements rendent complexe la mise en opération du système, et donc augmentent les coûts d'opération.

Un autre désavantage de cette option est que l'utilisation d'une simple zone réactive limite l'efficacité de traiter tous les types de contaminants. De plus, le débit de contrôle de cette option doit être plus important que les autres options de zone réactive envisagées, puisqu'il n'y a qu'une zone de traitement pour contrôler la largeur du panache. Ceci peut amplifier les échanges hydrauliques entre les deux aquifères.

Zones réactives en série

L'objectif des zones réactives en série est d'intercepter et de traiter en plusieurs points de traitement d'un même réactif le panache d'eau contaminée situé dans l'aquifère granulaire. En général, le débit total nécessaire à l'interception du panache d'eau contaminée dans des zones réactives en série est inférieur au débit impliqué dans une zone réactive ponctuelle. De ce fait, les concentrations en contaminants traitées peuvent être supérieures à celles d'une zone réactive ponctuelle, tout en impliquant un débit total inférieur. Cependant, les coûts en capitaux et d'opération associés sont plus importants.

L'avantage principal de cette option est que l'eau contaminée interceptée par les zones réactives en série présente des concentrations plus élevées en contaminants organiques. De plus, le volume d'eau traité est moindre, puisque le débit total impliqué est inférieur à celui d'une zone réactive ponctuelle. Ceci diminue les impacts au niveau des fenêtres. Le

principal désavantage de cette option est qu'elle n'est pas efficace pour traiter l'ensemble des contaminants présents. De plus, la complexité d'opération et de surveillance ainsi que l'ensemble des coûts sont plus importants que pour une zone réactive ponctuelle.

Zones réactives combinées

L'objectif principal des zones réactives combinées est d'intercepter et de traiter en plusieurs points de traitement et avec plusieurs réactifs le panache d'eau contaminée situé dans l'aquifère granulaire. Le principe de cette option est de combiner différents produits réactifs à des systèmes hydrauliques impliqués dans la création de zones réactives. Les avantages de cette option sont qu'elle permet de traiter une plus grande gamme de contaminants organiques dissous présents dans le panache, tout en impliquant un débit total d'interception moindre que celui induit par une zone réactive ponctuelle. Toutefois, au niveau des désavantages, la complexité d'opération de cette option est supérieure aux deux autres options de zone réactive. Il en est de même pour l'ensemble des coûts qui sont supérieurs pour cette option.

Confinement physique ou hydraulique de l'eau souterraine non contaminée, s'écoulant à l'est des zones sources, appliqué aux trois concepts précédents

Le confinement physique ou hydraulique de l'eau non contaminée qui s'écoule à l'est des zones sources dans l'aquifère granulaire peut être une option applicable à celles précédentes. Le confinement de l'écoulement local a pour objectif de réduire la dilution du panache et d'éviter les vitesses d'écoulement élevées au centre de la section d'écoulement. En tant qu'avantages, cette option offre une plus grande flexibilité de contrôle et permet de diminuer les débits et les volumes de produits réactifs impliqués dans le contrôle, puisque le volume d'eau contaminée est moindre. Au niveau des désavantages, cette option possède un plus fort coût en capital et dans le cas d'une déviation hydraulique, l'eau captée pourrait avoir à être traitée. De plus, la déviation hydraulique peut amplifier les échanges hydrauliques entre les aquifères.

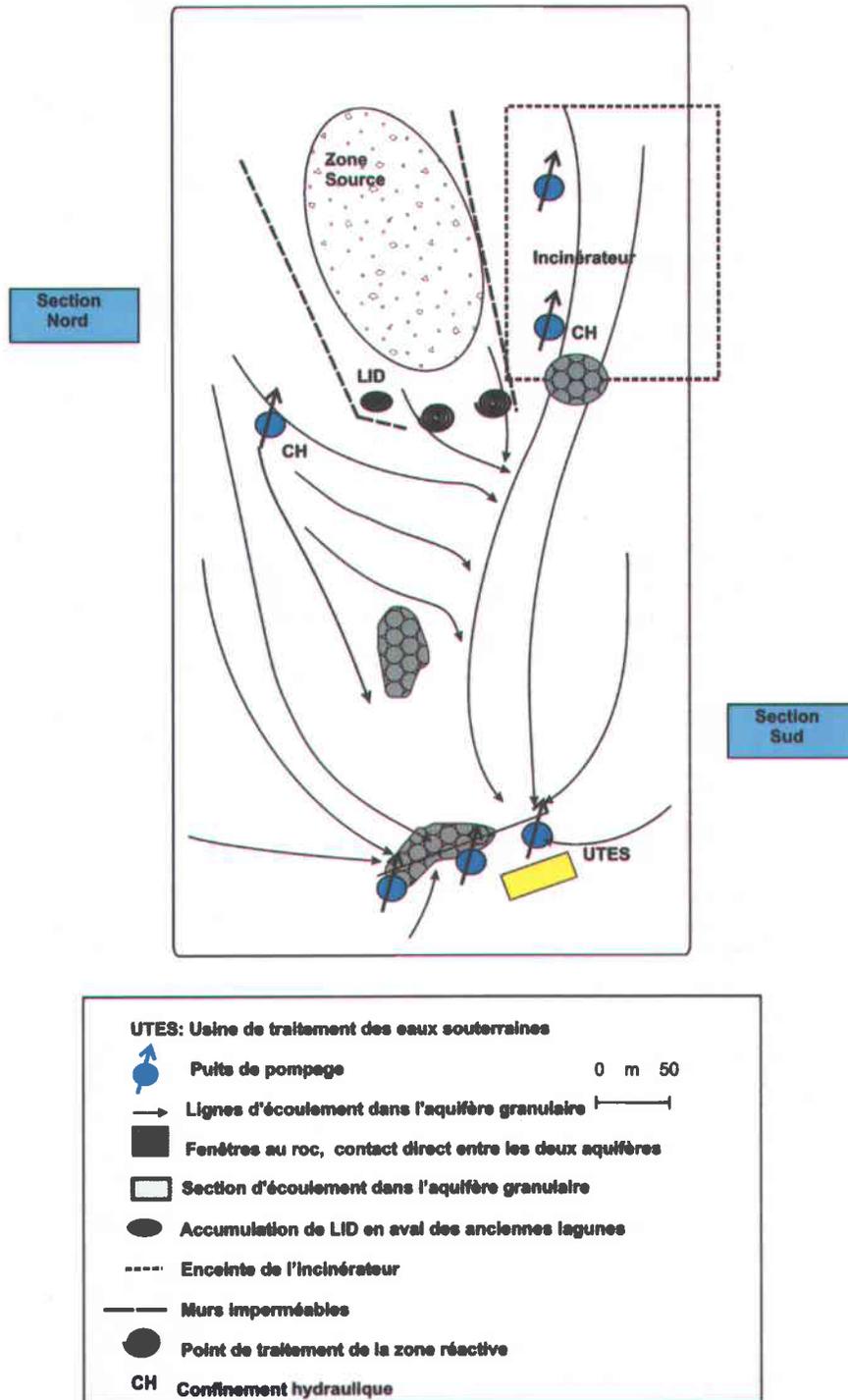


Figure 5.5 : Concept de contrôle par zone réactive dans l'aquifère granulaire

5.1.6 Contrôle hydraulique de l'aquifère granulaire

5.1.6.1 Objectifs et description du concept de contrôle hydraulique de l'aquifère granulaire

Le panache de contaminants dissous dans l'aquifère granulaire émis par les anciennes lagunes de Ville-Mercier est présentement contrôlé par un système de pompage et traitement conventionnel. Ce système pompe en même temps l'eau de l'aquifère granulaire et celle de l'aquifère de roc fracturé. Plusieurs études ont montré que le piège hydraulique créé par ce système intercepte efficacement le panache. Malgré une certaine désuétude et une conception initiale non optimale (selon les données présentement disponibles), la technologie du contrôle hydraulique est simple, efficace et éprouvée.

L'efficacité du contrôle hydraulique réalisé par le système de pompage et traitement mis en place à Ville-Mercier démontre ainsi la nécessité de considérer les technologies de contrôle hydraulique dans le cadre de ce projet. Toutefois, il a été montré que les volumes d'eau extraits et traités à l'UTES sont beaucoup plus importants que le flux d'eau contaminée formant le panache intercepté par ce système (étude confidentielle de l'INRS-ETE). Le phénomène de dilution au niveau de l'UTES est dû principalement au design et au choix de l'emplacement des puits de pompage existants. En effet, le pompage se fait à la fois dans l'aquifère granulaire et de roc fracturé sans permettre de contrôler le débit pompé dans chacun des aquifères indépendamment. Les puits de pompage de l'UTES sont aussi partiellement localisés dans une fenêtre dans les tills où les aquifères granulaire et de roc fracturé sont en contact. De plus, les puits de pompage sont à une grande distance des zones sources, environ 275 m, et doivent donc pomper à un grand débit pour contenir le panache d'eau contaminée situé dans l'aquifère granulaire. Ce débit provoque une importante dilution, environ 1 dans 100, des panaches contaminés avec de l'eau non contaminée, en plus de provoquer un rabattement important dans l'aquifère granulaire par rapport au niveau statique avant pompage. Ce pompage a même provoqué l'inversion de la direction d'écoulement entre les aquifères granulaire et de roc fracturé. Avant le pompage, l'écoulement se faisait du haut vers le bas alors que présentement l'écoulement s'effectue de l'aquifère de roc fracturé vers l'aquifère granulaire à travers les fenêtres dans les tills (voir chapitre 3). Afin de contrer le phénomène de dilution, le choix de la

technologie, ses options de conception ainsi que son emplacement sur le site à l'étude, sont stratégiques pour un contrôle hydraulique efficace du panache d'eau contaminée dans l'aquifère granulaire. Les technologies applicables au contrôle hydraulique du panache sont celles qui permettent l'interception par pompage du panache d'eau contaminée.

5.1.6.2 Technologies potentiellement applicables au contrôle hydraulique de l'aquifère granulaire

Au chapitre 4, les technologies potentiellement applicables au site identifiées par la sélection initiale pour le contrôle hydraulique ont été les suivantes:

- Le système de pompage; et
- L'extraction à deux phases.

Les définitions des technologies de contrôle hydraulique sont présentées à l'annexe H.

Résumé des technologies pour le contrôle hydraulique

Le tableau 5.6 présente les avantages et les désavantages des différentes technologies applicables au concept de contrôle hydraulique dans l'aquifère granulaire. Bien que le système d'extraction à deux phases permette le captage des gaz dans la zone vadose, l'instrumentation plus importante et les coûts associés à cette technologie résultent en peu d'intérêt d'utilisation de cette technologie. Le puits de pompage conventionnel demeure donc un choix efficace et peu coûteux.

5.1.6.3 Options d'application du contrôle hydraulique de l'aquifère granulaire

Plusieurs options d'application sont envisagées pour le contrôle hydraulique du panache d'eau contaminée situé dans l'aquifère granulaire. Elles sont illustrées à la figure 5.6 :

- 1- Contrôle hydraulique seul;
- 2- Contrôle hydraulique et murs confinant l'écoulement local;
- 3- Contrôle hydraulique et déviation hydraulique de l'écoulement local.

Tableau 5.6 : Avantages et désavantages des technologies de contrôle hydraulique

Technologies	Avantages	Désavantages
Puits de pompage conventionnel	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie prouvée • Durable, plus de 25 ans • Peut s'adapter à des conditions hydrauliques variables 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas à l'abri des pannes de courant
Extraction à deux phases	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie prouvée • Durable, plus de 25 ans • Peut s'adapter à des conditions hydrauliques variables • Permet de capter les gaz contaminés dans la zone vadose 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite plus d'instrumentation que le puits de pompage conventionnel • Pas à l'abri des pannes de courant

Contrôle hydraulique seul

Le système de pompage actuel démontre que le contrôle hydraulique du panache d'eau contaminée peut être réalisé à l'aide d'un tel système. Toutefois, le contrôle hydraulique seul est affecté grandement par la variation du débit de pompage. Par exemple, l'augmentation du débit de pompage accroît le rayon d'influence. Ceci peut créer un effet de dilution des contaminants présents dans le panache avec de l'eau non contaminée.

Les avantages particuliers de cette option sont que cette technologie est simple et éprouvée, d'une grande flexibilité dans la conception du système (localisation, nombre de puits, débits, etc.), et ayant des conditions de pompage adaptables en fonction de son effet sur l'écoulement. Les désavantages particuliers de cette option sont que cette technologie est moyennement coûteuse (débits élevés, concentrations importantes, traitement conventionnel) et qu'elle est sensible aux modifications des conditions d'écoulement et au débit de pompage. De plus, elle demande une surveillance initiale serrée et des interventions fréquentes durant la période transitoire pour s'assurer de son efficacité. Également comme désavantage, cette option peut être affectée par l'interaction entre les écoulements dans le roc et dans l'aquifère granulaire.

Contrôle hydraulique et murs confinant l'écoulement local

L'utilisation de murs imperméables combinés au système de contrôle hydraulique a pour objectif principal de confiner l'écoulement du panache et de restreindre ainsi ses dimensions. Cette option a pour but de contrer la dilution au niveau du système de pompage. Ces murs installés du côté ouest du panache pourraient intercepter l'eau transitant à travers les zones sources de manière à la canaliser vers le système d'interception. Un tel mur installé du côté est aurait pour but uniquement de limiter l'apport latéral d'eau non contaminée au système de captage.

Le contrôle hydraulique dans l'aquifère granulaire combiné à des murs confinant l'écoulement local offre comme principal avantage de restreindre la largeur du panache et de limiter la dilution au niveau du système de pompage. Cette option permet un contrôle en partie passif avec des coûts d'opération moindres que l'option de contrôle hydraulique seul, puisque la largeur du panache à contrôler est restreinte et que le débit de contrôle et de traitement est moindre. Il permet aussi un meilleur contrôle hydraulique et une probabilité accrue d'intercepter tout le panache contaminé (si les murs sont bien positionnés). Enfin, cette option est moins sensible aux variations des conditions d'écoulement, car la présence de murs limite l'interaction entre les zones sources et le milieu environnant. À titre de désavantages, l'ajout d'infrastructures tels les murs imperméables augmente les coûts en capital du concept. Également comme désavantage, la dilution moins importante au niveau du système de pompage induit des concentrations plus élevées et plus variables. De plus, cette option offre un contrôle moins flexible, car si les murs de confinement ne sont pas bien positionnés et que le panache passe en dehors des murs, il est alors impossible d'intercepter l'eau contaminée par les systèmes de captage. Un tel problème exigerait la mise en place de nouvelles infrastructures.

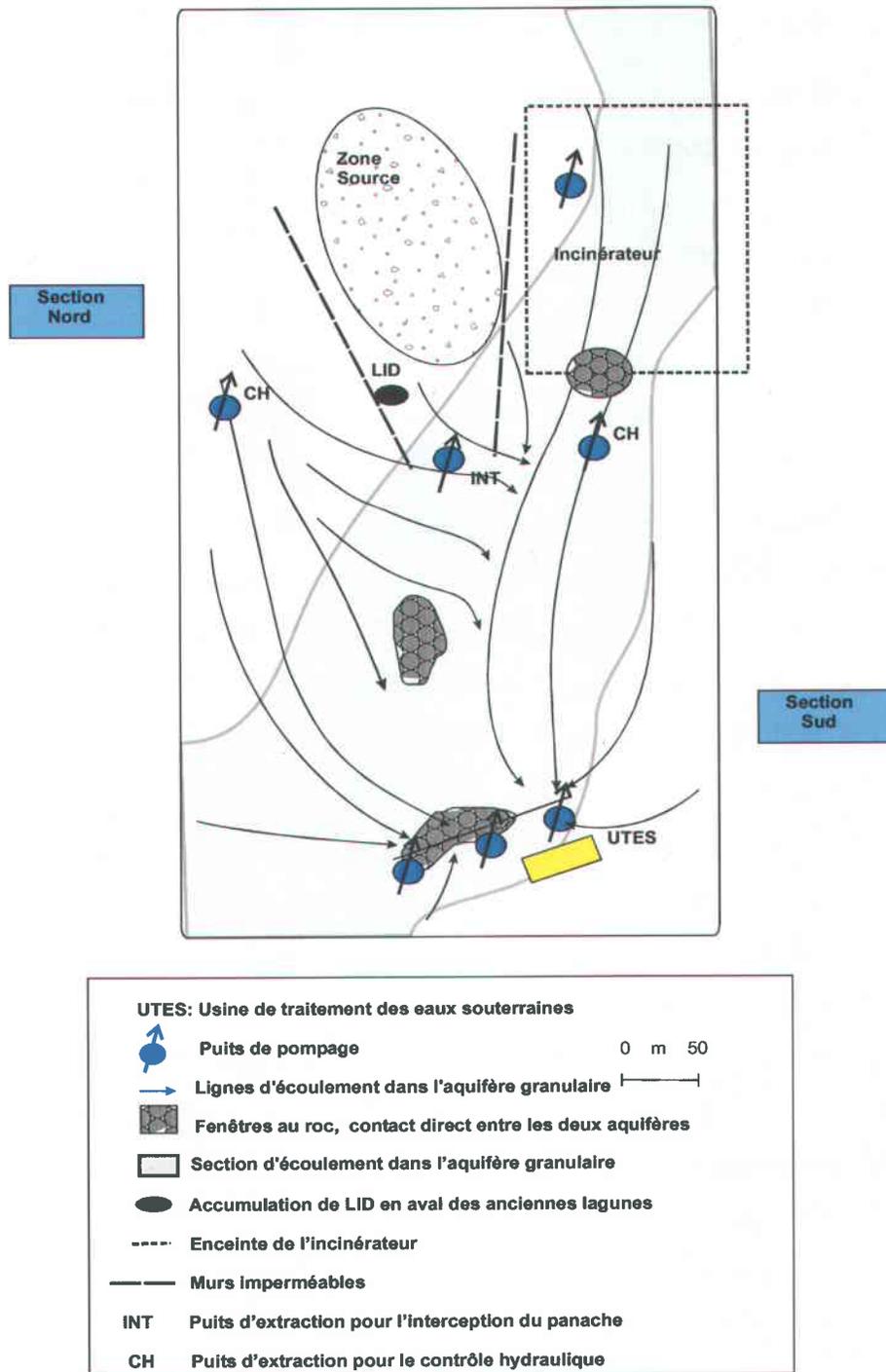


Figure 5.6 : Concept de contrôle hydraulique dans l'aquifère granulaire

Contrôle hydraulique et déviation hydraulique de l'écoulement local

Dans la même optique que l'option précédente, l'utilisation de puits d'extraction pour la déviation hydraulique de l'écoulement local combinée au contrôle hydraulique du panache d'eau contaminée diminuerait significativement l'effet de dilution au niveau du système de pompage.

La déviation hydraulique par rapport au confinement physique (mur imperméable) présente les mêmes avantages, mais en plus cette option offre une plus grande flexibilité d'interception. Les désavantages particuliers sont que la déviation hydraulique est plus complexe à opérer que l'option de mur et exige une surveillance serrée de la composition de l'eau pompée. Cette option pourrait aussi exiger le traitement de l'eau extraite, ce qui augmenterait les coûts d'opération. Également la déviation hydraulique peut induire plus d'échanges entre les deux aquifères à travers les fenêtres dans les tills.

5.1.7 Contrôle hydraulique de l'aquifère de roc fracturé

5.1.7.1 Objectifs et description du concept de contrôle hydraulique au roc

Tel que mentionné plus tôt, le contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé réalisé présentement par le système de pompage et traitement du MENV démontre qu'un tel système est efficace pour le contrôle du panache d'eau contaminée existant dans l'aquifère de roc fracturé. L'efficacité de ce système justifie de considérer le contrôle hydraulique comme une solution viable dans le cadre de ce projet.

Suite à la sélection initiale des technologies potentiellement applicables au contrôle et traitement des panaches d'eau contaminée de Ville-Mercier, seul le concept de contrôle hydraulique présente un intérêt pour l'aquifère de roc fracturé. La profondeur de l'aquifère et les connaissances limitées sur la fracturation du roc restreignent l'applicabilité des technologies de confinement, de contrôle passif tel les murs réactifs ainsi que les technologies créant des zones réactives.

L'élaboration d'un système de contrôle hydraulique dans un aquifère de roc fracturé peut s'avérer ardue, puisque l'aire d'influence d'un puits d'extraction n'est pas circulaire et que celle-ci dépend grandement des conditions de fracturation du roc. L'aquifère régional de roc fracturé à Mercier se situe généralement à une profondeur de 30 m, ce qui restreint les investigations qui pourraient permettre une meilleure connaissance des conditions de fracturation du roc. Denis (1991) (dans GREGI, 1993) donne cependant un aperçu des conditions de fracturation du roc. L'absence d'informations détaillées sur ces conditions de fracturation avant la mise en place du système de pompage actuel n'a pas permis d'élaborer des conditions d'interception optimales du panache d'eau contaminée dans l'aquifère de roc fracturé. De ce fait, un phénomène de dilution du panache d'eau contaminée avec de l'eau non contaminée se produit au niveau du système de pompage. Les travaux de caractérisation du MENV en 1995 ont permis de mieux préciser la zone source contaminée par des liquides immiscibles denses dans le roc. Il semble que les puits de l'UTES ne sont pas positionnés de façon optimale par rapport à cette zone. Toutefois, des travaux postérieurs (Denis, 1991) à l'implantation du système de pompage actuel et des travaux récents ont permis d'apporter des informations sur la condition de fracturation du roc qui sont considérées dans l'élaboration du concept de contrôle hydraulique du présent projet.

L'objectif de l'implantation d'un système de contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé est l'interception du panache d'eau contaminée dans l'aquifère, sans toutefois que ce système ne limite l'efficacité du contrôle et traitement réalisé simultanément dans l'aquifère granulaire.

5.1.7.2 Technologies potentiellement applicables au contrôle hydraulique au roc

Au chapitre 4, les technologies de contrôle hydraulique potentiellement applicables, identifiées par la sélection initiale, ont été les suivantes (décrites à la section 5.1.6.2):

- Le système de pompage; et
- L'extraction à deux phases.

5.1.7.3 Options d'application du contrôle hydraulique au roc

Plusieurs options d'application sont envisagées pour le contrôle hydraulique du panache d'eau contaminée situé dans l'aquifère de roc fracturé. Celles-ci sont illustrées à la figure 5.7 :

- 1- Contrôle hydraulique ponctuel en aval de la zone source;
- 2- Contrôle hydraulique linéaire en aval de la zone source;
- 3- Contrôle hydraulique distribué à l'intérieur de la zone source;
- 4- Déviation hydraulique de l'eau souterraine non contaminée s'écoulant vers la zone source appliquée aux trois concepts précédents;
- 5- Ré-injection de l'eau pompée pour le contrôle hydraulique en amont d'un système de contrôle et de traitement *in situ* dans l'aquifère granulaire.

Contrôle hydraulique ponctuel en aval de la zone source

Dans cette option, le contrôle hydraulique du panache est assuré par un puits de pompage localisé à un endroit restreint en aval de la zone source contaminée dans le roc. L'efficacité du contrôle hydraulique est entièrement dépendante du débit de pompage, du rayon du puits et des propriétés hydrauliques du roc reliées aux conditions de fracturation. De ce fait, l'utilisation d'un puits ponctuel pour contenir l'ensemble du panache d'eau contaminée sans créer de la dilution par fort pompage nécessite une bonne connaissance de la géométrie des fractures dans le roc, de l'étendue du panache d'eau contaminée ainsi que des conditions d'écoulement au roc.

Le contrôle hydraulique par pompage à un endroit ponctuel a l'avantage d'impliquer une conception et un contrôle simples : le débit de pompage est augmenté ou diminué pour permettre d'intercepter tout le panache dans le roc en fonction des résultats de la surveillance des conditions d'écoulement et des concentrations autour du système hydraulique. Cette option a pour désavantage d'être peu flexible et d'exiger que la localisation du puits d'interception soit optimale par rapport à l'écoulement dans le roc afin d'éviter de surpomper pour compenser une position inadéquate. Un tel système implique aussi une dilution importante du panache par de l'eau non contaminée surtout si

un facteur de sécurité est utilisé pour s'assurer de bien intercepter le panache, ce qui augmenterait les coûts de traitement. Enfin, un tel système est sensible aux changements des conditions d'écoulement car le pompage est ponctuel.

Contrôle hydraulique linéaire en aval de la zone source

Cette option de contrôle hydraulique linéaire implique l'installation de puits localisés sur une ligne perpendiculaire à la direction d'écoulement du panache d'eau contaminée en aval de la zone source dans le roc. Cette option pourrait aussi prendre avantage de la présence d'une zone de fracturation linéaire pour l'installation des puits si une telle zone est positionnée adéquatement pour intercepter la migration du panache. Dans un tel cas, une bonne connaissance de la géométrie de la fracturation serait alors nécessaire. Cette option a comme avantage de diminuer le rayon d'influence de chacun des puits et de réduire la dilution au niveau du système de contrôle, tout en ciblant le captage du panache d'eau contaminée. Les puits périphériques de la ligne de contrôle présentant une récupération nulle à faible des contaminants dissous, soit en dessous des normes canadiennes, pourraient être alors utilisés pour dévier l'écoulement local du panache d'eau contaminée.

Cette option est aussi relativement simple tout comme le pompage ponctuel. Elle offre cependant l'avantage d'exiger un débit de pompage global moindre et d'engendrer moins de dilution au niveau du système de captage, donc des coûts de traitement réduits. Cette option offre aussi plus de flexibilité d'opération et une sensibilité réduite aux changements des conditions d'écoulement. Les désavantages particuliers de cette option sont qu'elle exige tout de même que les conditions d'écoulement soient bien connues pour positionner adéquatement la ligne de puits de contrôle. Ce concept implique aussi un coût en capital initial supérieur à l'installation d'un système ponctuel de pompage dû au plus grand nombre de puits de pompage impliqués. Enfin, le coût d'opération d'un tel système pourrait être aussi important que le pompage ponctuel dû à la maintenance de plusieurs puits de pompage.

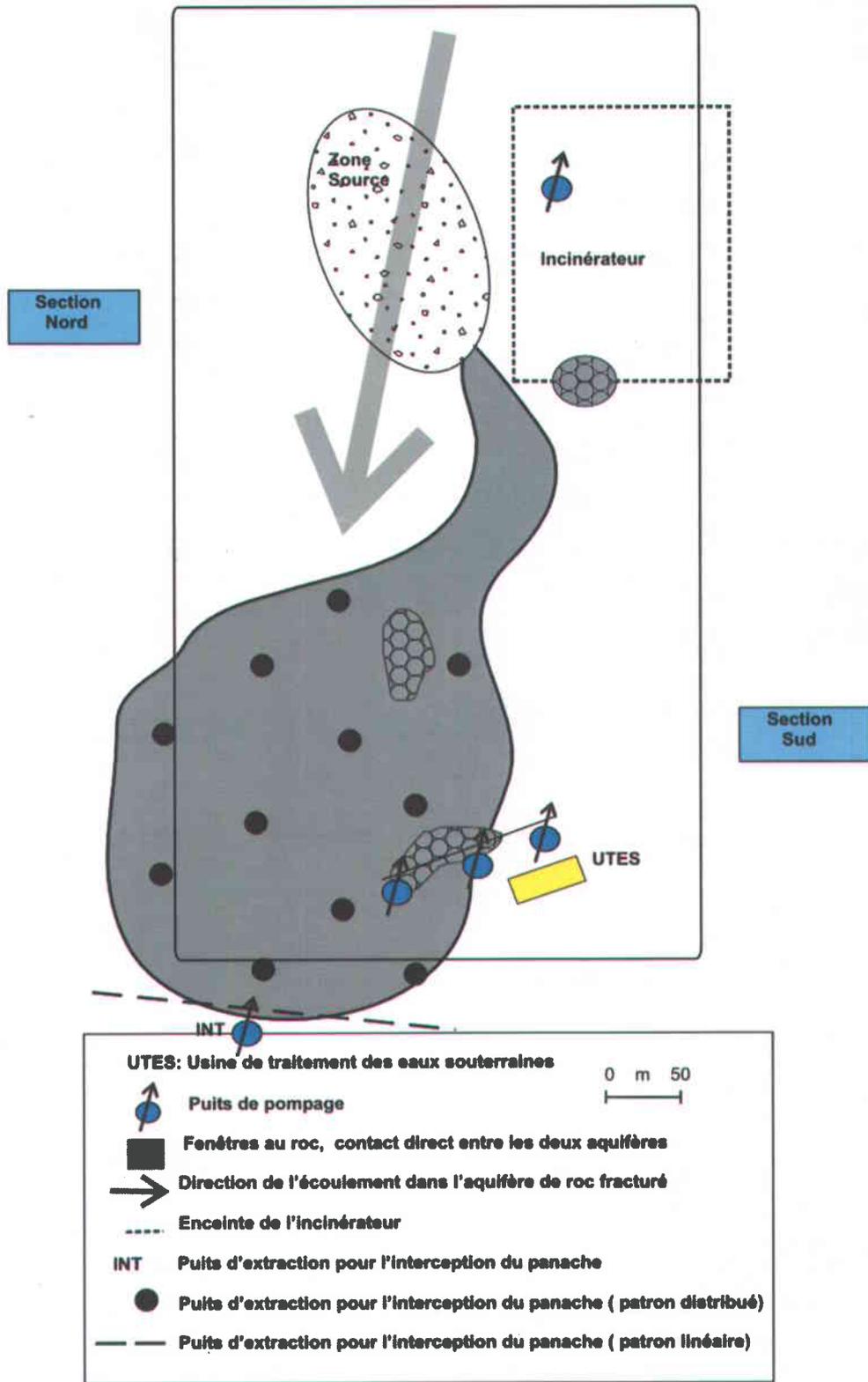


Figure 5.7 : Concept de contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracture

Contrôle hydraulique distribué à l'intérieur de la zone source

Cette option a comme objectif principal de maintenir l'eau contaminée à l'intérieur de la zone source. Pour cette option, il y a avantage à la combiner avec des puits de déviation hydraulique implantés en amont de la zone source pour minimiser le débit de pompage requis pour maintenir l'eau contaminée dans la zone source. Si l'eau pompée en amont de la zone source peut être rejetée en aval sans traitement, les coûts d'opération de ce concept seraient encore plus réduits. Dans un cas où la géométrie de la fracturation de l'aquifère de roc est mal connue, le contrôle hydraulique distribué présente un intérêt parmi les options de conception. Cette option permettrait d'optimiser le contrôle du panache d'eau contaminée dont la forme ou les cheminements préférentiels varieraient dans le temps, tout en réduisant l'effet de dilution au niveau du système de captage. Tout comme le contrôle hydraulique linéaire, les puits présentant une récupération nulle à faible des contaminants dissous pourraient être utilisés pour dévier l'écoulement local du panache d'eau contaminée.

Les avantages particuliers de cette option sont qu'elle permettrait de contrôler la migration de la contamination avec un débit global minimal, donc avec des coûts de traitement réduits. Elle offre aussi une grande flexibilité d'opération pour garder le piège effectif. Au niveau des désavantages, cette option est plus complexe à opérer et exige une surveillance serrée pour s'assurer de l'efficacité du piège tout en minimisant le débit de pompage. Si les puits localisés dans la zone source pompent une portion de liquide immiscible, le traitement des effluents pourrait aussi être plus compliqué et plus complexe.

Déviation hydraulique de l'eau souterraine non contaminée s'écoulant vers la zone source appliquée aux trois concepts précédents

La déviation hydraulique latérale ou en amont de la zone source peut être combinée aux options précédentes pour réduire le volume d'eau contaminée à contrôler et de limiter la dilution au niveau des systèmes de captage. En tant qu'avantages, cette option offre une plus grande flexibilité en cas de problème à contrôler le panache, grâce à la présence de puits de pompage additionnels. De plus, l'eau pompée en amont pourrait être réinjectée

sans traitement en aval de la zone source pour réduire les coûts de traitement. Au niveau des désavantages, cette option est plus complexe à opérer et à surveiller et pourrait avoir à traiter tout de même l'eau pompée latéralement ou en amont, ce qui réduirait ses avantages.

Ré-injection de l'eau pompée pour le contrôle hydraulique en amont d'un système de contrôle et de traitement in situ dans l'aquifère granulaire

Dans les concepts de solution applicables à l'aquifère granulaire, des systèmes de contrôle et traitement *in situ* ont été considérés. Si un de ces systèmes est mis en place dans l'aquifère granulaire, il pourrait être avantageux de l'utiliser également pour le traitement *in situ* de l'eau contaminée pompée au roc. Les avantages de cette option sont qu'elle offre une alternative de traitement pour l'eau contaminée de l'aquifère de roc fracturé tout en réduisant possiblement les coûts de traitement de l'eau pompée. Au niveau des désavantages, en utilisant le système de contrôle et traitement *in situ* de l'aquifère granulaire, cela pourrait réduire sa durée de vie ou augmenter la fréquence de sa maintenance. De plus, la géochimie de l'eau différente de l'aquifère rocheux (voir Annexe C) pourrait affecter l'efficacité du système de contrôle et traitement *in situ* dans l'aquifère granulaire.

5.1.7.4 Autres technologies considérées pour l'aquifère de roc fracturé

Comme mentionné au chapitre 4 lors de la sélection initiale des technologies potentiellement applicables au contrôle des panaches d'eau contaminée de Ville-Mercier, les technologies de confinement et de biodégradation améliorée ont été retenues. Bien que ces technologies peuvent s'appliquer en général au contrôle et traitement d'un panache d'eau contaminée dans le roc fracturé, elles ne semblent pas ou peu applicable au site à l'étude. Dans cette optique, elles n'ont pas été considérées dans l'élaboration de concepts de solution préliminaires pour l'aquifère de roc fracturé.

En premier lieu, le confinement de la zone source n'est pratiquement pas envisageable, puisque l'extension latérale et verticale du panache d'eau contaminée et de la zone source dans l'aquifère de roc fracturé est peu connue. En deuxième lieu, l'amélioration des

conditions de biodégradation dans l'aquifère de roc fracturé est tout aussi impraticable, puisqu'une connaissance de la distribution de la zone source est nécessaire. De plus, une bonne connaissance des conditions géochimiques et bactériennes du milieu est un atout essentiel pour concevoir une biodégradation efficace. Également, le manque de connaissances au niveau de la fracturation du socle rocheux limite la compréhension de l'écoulement de l'eau souterraine et des contaminants. De ce fait, une grande incertitude existerait au niveau de l'injection et la répartition des produits nécessaires à la biodégradation.

5.1.8 Mesures complémentaires aux concepts de solution préliminaires

Lors du développement des différents concepts de solution préliminaires, certaines mesures jugées complémentaires aux concepts ont été notées. Ces mesures complémentaires sont présentées subséquemment :

- Le pompage préalable de l'eau contaminée dans les nappes perchées des anciennes lagunes;
- Le colmatage des fenêtres dans les tills; et
- L'excavation des sols contaminés en surface dans les anciennes lagunes.

Dans un premier temps, le pompage de l'eau contaminée dans les nappes perchées des anciennes lagunes est recommandé pour tous les concepts de solution applicables à l'aquifère granulaire. Dans le cas du confinement des zones sources, le pompage de l'eau contenue dans les nappes perchées permettrait de réduire significativement les surpressions engendrées par l'eau sur les installations de confinement latéral. Pour ce qui est des concepts qui interceptent le panache d'eau contaminée, la présence des nappes perchées dans les anciennes lagunes constitue une source additionnelle qui peut émettre en tout temps. De ce fait, le contrôle et le traitement considérés dans ces concepts doivent être aptes à supporter des variations de concentrations à la hausse et possiblement des changements dans les types de contaminants émis.

Dans un deuxième temps, s'il est réalisable, le colmatage des fenêtres dans les tills serait un atout pour l'application de tous les concepts de solution afin que les deux aquifères

soient traités comme des systèmes indépendants. En fait, les fenêtres dans les tills permettent des échanges hydrauliques entre l'aquifère granulaire et de roc fracturé. Ces échanges peuvent être amplifiés par l'utilisation de technologies de contrôle hydraulique. De plus, dans le cas du confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire, il pourrait se produire des fuites s'il existait des fenêtres dans l'enceinte confinée. Également, des fuites pourraient survenir si des technologies de contrôle passif et semi-passif étaient implantées en aval de ces fenêtres. Toutefois, la difficulté de cette mesure complémentaire réside dans le fait qu'il existe possiblement d'autres fenêtres dans les tills qui n'ont pas été identifiées jusqu'à maintenant. Une caractérisation complémentaire est nécessaire pour évaluer cette possibilité et de définir plus amplement les extensions latérales des fenêtres existantes.

Finalement, l'excavation des sols contaminés en surface à l'ouest des anciennes lagunes permettrait au concept de confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire de réduire les dimensions de l'enceinte confinée et les coûts associés.

5.1.9 Traitements des effluents

Tous les concepts de solution préliminaires présentés dans cette section nécessitent le traitement *in situ* ou *ex situ* des effluents. Ces effluents ont été identifiés dans chacun des concepts et sont discutés subséquentement. Certaines technologies envisagées pour le traitement sont aussi présentées. Il est à noter qu'une étude de performance a été réalisée sur le traitement *in situ* de l'eau contaminée de l'enceinte confinée proposé à la section 5.1.9.1 (voir Annexe I). Toutefois, conformément au mandat, les traitements *ex situ* envisagés pour les différents effluents issus des concepts de solution préliminaires sont mentionnés à titre indicatif. Ceux-ci constituent des solutions faisables, mais il y a d'autres possibilités qui pourraient être envisagées.

5.1.9.1 Traitement des effluents des concepts de solution préliminaires applicables à l'aquifère granulaire

Tous les concepts de solution préliminaires applicables à l'aquifère granulaire, à l'exception du contrôle passif et semi-passif, produisent des effluents à traiter. Pour

chacun de ces concepts, les tableaux 5.7, 5.8 et 5.9 résument les effluents produits et les technologies de traitement envisagées.

Concept de confinement des zones sources : Effluents de la cellule de confinement

Les effluents produits par les systèmes de contrôle du confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire sont résumés au tableau 5.7. Les effluents proviennent essentiellement de trois sources qui sont le pompage dans les nappes perchées des anciennes lagunes, le pompage interne et le captage des gaz par les puits d'observation dans l'enceinte confinée.

Pompage dans les nappes perchées

L'effluent extrait par pompage dans les nappes perchées est un mélange de LID, LIL et d'eau fortement contaminée aux composés organiques. Un séparateur de phases est requis dans le système de pompage pour partager les phases libres de l'eau contaminée dans le but de les traiter indépendamment. Dans le cas du traitement des phases libres, la disposition hors site ou à l'incinérateur est envisageable. Pour ce qui est de l'eau contaminée, elle peut être traitée *in situ* par des puits réactifs intégrés au confinement vertical ou *ex situ* par un système tel une tour de ventilation combinée à un traitement d'oxydation pour les gaz de sortie. La combinaison des gaz de sortie avec ceux de l'incinérateur peut aussi être une alternative envisagée. L'eau contaminée dans les nappes perchées peut également être disposée hors site ou à l'incinérateur.

Pompage interne

Le pompage interne permet le contrôle des charges hydrauliques dans l'enceinte confinée. L'eau contaminée aux composés organiques qui en est extraite présente des concentrations d'un ordre de grandeur inférieur à celles retrouvées dans les nappes perchées des anciennes lagunes. Les traitements de l'eau provenant du pompage interne sont essentiellement les mêmes que ceux proposés pour le traitement de l'eau contenue dans les nappes perchées. Toutefois, dû aux faibles concentrations, la disposition hors site n'est pas une solution envisagée.

Puits d'observation

Dans l'enceinte confinée, la phase gazeuse dans la zone non saturée contiendra des contaminants qui se seront volatilisés au contact du gaz avec les sols contaminés. Cette phase gazeuse contaminée doit être contrôlée pour éviter sa migration hors de l'enceinte confinée. Des puits d'observation seront dédiés à la surveillance de la zone non saturée. Les gaz contaminés vont tendre à migrer à travers ces puits suite aux variations de la pression atmosphérique. Plusieurs traitements peuvent être envisagés pour cet effluent. Le plus simple des traitements proposés est la mise en place de filtres à charbon granulaire activé dans les puits d'observation. Des traitements *ex situ* tels l'oxydation catalytique et l'oxydation thermique peuvent être également envisagés. La disposition des gaz à l'incinérateur peut aussi être une solution viable.

Concept de contrôle par zone réactive

Dans ce concept, deux technologies de contrôle par zone réactive peuvent engendrer des effluents à traiter, soit l'injection d'air dans un puits de re-circulation (séparation des gaz dans le puits) et le barbotage. Les deux technologies produisent des gaz qui peuvent être récupérés dans les puits où le contrôle s'effectue ou dans des puits situés dans la zone vadose. Les traitements envisagés pour les gaz sont semblables pour les deux technologies et sont résumés au tableau 5.8. Le plus simple des traitements proposés est la mise en place de filtres à charbon granulaire activé dans les puits d'extraction des gaz. Les traitements *ex situ* d'oxydation et la disposition à l'incinérateur peuvent être également envisagés.

Tableau 5.7 : Effluents du confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire et traitements envisagés

Provenance des effluents	Technologies de pré-traitement	Effluents	Traitement principal	Traitement secondaire
Pompage dans les nappes perchées	Séparateur de phases	Phases libres : LID et LIL	Disposition à l'incinérateur	.....
			Disposition hors site	.....
		Eau contaminée	Traitement <i>in situ</i> par puits réactif	.....
			Traitement <i>ex situ</i> Tour de ventilation	Oxydation catalytique (gaz)
				Oxydation thermique (gaz)
				Disposition à l'incinérateur (gaz)
			Disposition hors site	.....
Disposition à l'incinérateur	.....		
Pompage interne	.....	Eau contaminée	Traitement <i>ex situ</i> Tour de ventilation	Oxydation catalytique (gaz)
				Oxydation thermique (gaz)
				Disposition à l'incinérateur (gaz)
			Disposition à l'incinérateur	.....
Puits d'observation	.....	Gaz	Charbon granulaire activé	.....
			Disposition à l'incinérateur	.....
			Oxydation catalytique	.....
			Oxydation thermique	.....

Tableau 5.8 : Effluents du contrôle par zone réactive dans l'aquifère granulaire et traitements envisagés

Provenance des effluents	Effluents	Traitement principal
Séparation des gaz dans le puits	Gaz	Charbon granulaire activé
Barbotage		Disposition à l'incinérateur
		Oxydation catalytique
		Oxydation thermique

Concept de contrôle hydraulique

Le contrôle hydraulique par pompage extrait de l'eau contaminée qui doit être traitée *ex situ*. Un traitement simple et éprouvé est la tour de ventilation combinée à l'oxydation des gaz de sortie. La disposition des gaz à l'incinérateur peut aussi être une alternative envisagée. Également, la disposition à l'incinérateur de l'eau contaminée extraite par pompage peut être une solution viable. Un résumé des effluents issus du contrôle hydraulique et des traitements proposés est présenté au tableau 5.9.

Tableau 5.9 : Effluents du contrôle hydraulique dans les aquifères granulaire et de roc fracturé et traitements envisagés

Provenance des effluents	Effluents	Traitement principal	Traitement secondaire
Puits de pompage	Eau	Traitement <i>ex situ</i> Tour de ventilation	Oxydation catalytique (gaz)
			Oxydation thermique (gaz)
			Disposition à l'incinérateur (gaz)
		Disposition à l'incinérateur	.....

5.1.9.2 Traitement des effluents du concept de solution préliminaire applicable à l'aquifère de roc fracturé : Contrôle hydraulique

Le contrôle hydraulique au roc extrait de l'eau contaminée qui doit être traitée *ex situ*. Les traitements envisagés pour cet effluent sont semblables à ceux proposés pour l'eau contaminée extraite du contrôle hydraulique dans l'aquifère granulaire. Ces traitements sont résumés au tableau 5.9.

5.2 Sélection des concepts de solution préliminaires

Les objectifs et la description des concepts de solution préliminaires applicables aux aquifères granulaire et de roc fracturé, les technologies associées, et les options de conception ont été discutés à la section 5.1. Des tableaux détaillés décrivant les avantages et désavantages des concepts de solution préliminaires et de leurs options d'application sont montrés à la partie B de l'annexe J. Pour concevoir des concepts de solution intégrés pour le contrôle et le traitement des panaches d'eau contaminée de Ville-Mercier, une sélection des concepts de solution préliminaires a été réalisée pour déterminer ceux qui présentent le plus d'intérêt.

La sélection a été poursuivie le 10 février 2004 lors d'une rencontre entre l'INRS et des représentants du MENV (compte-rendu de la rencontre à l'annexe J). Celle-ci a été réalisée en deux parties. Dans un premier temps, une sélection des concepts applicables à l'aquifère granulaire a été faite pour définir ceux qui présentent le plus d'intérêt. Dans un deuxième temps, une sélection a été réalisée pour déterminer les options d'application efficaces dans les concepts applicables à l'aquifère granulaire retenus par la première sélection et le concept de contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé.

5.2.1 Sélection des concepts de solution préliminaires pour l'aquifère granulaire

Pour guider le processus de sélection des concepts, un cahier des charges a été établi afin de pouvoir évaluer en ordre d'intérêt les différents concepts de solution applicables à l'aquifère granulaire (Tableau 5.10). Les objectifs et sous-objectifs du cahier des charges, les barèmes d'évaluation et leurs pondérations ont été établis lors de la rencontre entre l'INRS et les représentants du MENV. Les conditions actuelles de contrôle et de traitement à l'UTES ont été considérées dans la définition des éléments du cahier des charges.

Suite à l'élaboration du cahier des charges, une matrice des résultats qualitatifs a été construite (Annexe K). Cette matrice présente la performance des concepts de solution par rapport aux objectifs et sous-objectifs du cahier des charges. Par la suite, des résultats quantitatifs ont été attribués aux concepts en fonction de leur performance par rapport aux

objectifs et sous-objectifs à l'aide de la pondération associée à chaque barème d'évaluation. Subséquemment, une matrice de décision a été établie (Tableau 5.11) pour présenter les résultats quantitatifs en relation avec les objectifs et sous-objectifs obtenus par les concepts de solution évalués ainsi que leur total en %.

Tableau 5.10 : Cahier des charges : Grille de sélection des concepts de solution préliminaires de l'aquifère granulaire

1. Efficacité 50 %	1.1 Efficacité à traiter tous les contaminants dissous du panache 20% : <ul style="list-style-type: none"> • Oui (20%) (tous les contaminants) • Moyennement (15%) (> 90% avec possibilité d'atténuation naturelle) • Non (0%) (pas tous les contaminants)
	1.2 Efficacité au niveau du contrôle hydraulique 20% : (Risque de fuite, problème de dilution, etc.) <ul style="list-style-type: none"> • Oui (20%) (risque de défaillance faible) • Moyennement (10%) (risques possibles) • Non (0%) (risques certains)
	1.3 Technique prouvée 10% : <ul style="list-style-type: none"> • Oui (10%) (commerciale/courante) • Moyennement (5%) (quelques exemples d'application, ex :Superfund) • Non (0%) (en développement/expérimentale)
2. Robustesse 30%	3.1 Adaptable aux variations de concentrations ou de flux de masse 10% : <ul style="list-style-type: none"> • Oui (10%) • Oui avec ajustements (6%) • Oui avec ajustements importants (3%) • Non (0%)
	3.2 Adaptable aux variations de types de contaminants dans le temps 10% : <ul style="list-style-type: none"> • Oui (10%) • Oui avec ajustements (6%) • Oui avec ajustements importants (3%) • Non (0%)
	3.3 Adaptable aux variations de conditions hydrauliques dans le temps 10% : <ul style="list-style-type: none"> • Oui (10%) • Oui avec ajustements (6%) • Oui avec ajustements importants (3%) • Non (0%)
3. Facilité d'opération 20%	4.1 Facilité d'opération 20% : (Somme des quatre sous-objectifs) <ul style="list-style-type: none"> • Peu de risques de panne (8% oui, 4% moyennement, 0% non) • Facilité de surveillance (4% oui, 2% moyennement, 0% non) • Facilité d'entretien (4% oui, 2% moyennement, 0% non) • Système peu complexe d'opération (4% oui, 2% moyennement, 0% non)

Tableau 5.11 : Matrice de décision : Compilation de l'évaluation des concepts de solution préliminaires de l'aquifère granulaire avec la grille de sélection

Critère général	Éléments du critère	Concepts applicables à l'aquifère granulaire			
		1. Confinement de zone source	2. Contrôle passif et semi-passif	3. Zone réactive	4. Contrôle hydraulique
1. Efficacité 50%	1.1 (20%) Efficacité de contrôle et traitement des contaminants dissous	20%	0% Mur réactif 0% Barrière biologique 15% Mélange de sol en profondeur	15% Combinaison de ORC, HRC 0% biologique 0% extraction à l'air 20% combinaison	20%
	1.2 (20%) Efficacité du contrôle hydraulique	20%	20% avec confinement 10% sans confinement	20% avec confinement 10% sans confinement	20% avec confinement 10% sans confinement
	1.3 (10%) Technique prouvée	5% Traitement passif 10% sans traitement passif	10% Mur réactif 5% Barrière biologique 5% Mélange de sol en profondeur	5%	10%
2. Robustesse 30%	2.1 (10%) Variation dans le temps des concentrations et flux de masse	10%	0% Mur réactif 6% Barrière biologique 6% Mélange de sol en profondeur	6%	6%
	2.2 (10%) Variation dans le temps des types de contaminants	10%	0% Mur réactif 6% Barrière biologique 6% Mélange de sol en profondeur	6%	6%
	2.3 (10%) Variation des conditions hydrauliques	10%	0% Mur réactif 0% Barrière biologique 3% Mélange de sol en profondeur	6%	6%
3. Facilité d'opération 20%	3.1 (20%) Facilité d'opération	12% avec pompage interne + traitement passif 16% avec pompage interne 20% sans pompage interne	20% Mur réactif 14% Barrière biologique 14% Mélange de sol en profondeur	0%	12%
Total 100%		Entre 87-100%	<u>Au mieux</u> 50% Mur réactif 51% Barrière biologique 69% Mélange de sol en profondeur	Entre 33-63%	Entre 70-80%

De cette matrice de décision, il est aisé de remarquer que le concept de confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire est le concept qui dans l'ensemble répond le mieux aux objectifs fixés (87-100%). Le contrôle hydraulique montre également une bonne performance (70-80%). Pour ce qui est du concept de zone réactive, il présente un résultat satisfaisant (69%), dans le cas où une combinaison de technologies est utilisée et qu'un confinement adéquat de la zone d'écoulement du panache est réalisé. Toutefois, dans le pire cas, ce concept atteint un pourcentage faible (50%). Pour sa part, le concept de contrôle passif et semi-passif dans l'aquifère granulaire ne présente aucun intérêt pour la suite des travaux de modélisation et d'optimisation (33-63%). De ces résultats, le confinement des zones sources et le contrôle hydraulique en aval des anciennes lagunes sont les deux concepts préliminaires pour l'aquifère granulaire retenus pour la suite des travaux.

Un quatrième objectif pourrait être relié au fait que les concepts favorisent ou non une éventuelle réhabilitation des zones sources situées dans l'aquifère granulaire. Toutefois, cet objectif ne concorde pas avec le présent mandat de l'INRS-ETE, soit de définir des alternatives pour le contrôle des panaches d'eau contaminée émis par les anciennes lagunes de Ville-Mercier. De ce fait, cet objectif n'a pas été considéré explicitement dans le cahier des charges. Cependant, cet aspect est considéré dans le choix de la solution finale qui est discuté au chapitre 7.

5.3 Résultats de la sélection des concepts de solution préliminaires

Dans les sections subséquentes, les résultats de la sélection des concepts de solution préliminaires sont présentés et discutés. Il est mentionné lesquels des concepts de solution préliminaires applicables à l'aquifère granulaire ont été retenus et rejetés et les options d'application choisies pour les concepts retenus pour l'aquifère granulaire et le concept de contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé. Au chapitre 6, chacun des concepts de solution préliminaires de l'aquifère granulaire retenus par la sélection sera combiné au concept de contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé pour former des concepts de solution intégrés.

5.3.1 Concepts préliminaires applicables à l'aquifère granulaire retenus par la sélection

Le confinement des zones sources et le contrôle hydraulique en aval des zones sources constituent les concepts préliminaires applicables à l'aquifère granulaire qui présentent le plus d'intérêt pour la suite des travaux. Les raisons de leur sélection et les options d'application conservées sont présentées subséquemment. Également, les options d'application qui n'ont pas été retenues sont discutées.

5.3.1.1 Confinement des zones sources

Le confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire a pour objectif de permettre l'arrêt des émissions de contaminants dissous dans l'aquifère et de ne pas nécessiter de mesures autres que la surveillance à l'extérieur de l'enceinte confinée. En combinant le confinement avec le pompage interne de l'eau contenue dans l'enceinte confinée, le contrôle des charges hydrauliques permet de réduire les risques de surpressions sur les installations de confinement. Dans cette optique, le confinement seul ne peut être une solution envisagée puisque des fuites de contaminants pourraient survenir à l'extérieur de l'enceinte confinée.

Le concept de confinement des zones sources combiné au pompage interne fait appel à des technologies efficaces et éprouvées. De plus, ce concept est très robuste, c'est-à-dire qu'il permet d'assurer la même efficacité de contrôle en dépit des modifications possibles des conditions hydrauliques dans le secteur suite à l'arrêt éventuel du pompage à l'UTES.

Au niveau du traitement des effluents, l'option de traitement passif *in situ* par puits réactifs est une option d'application qui n'est pas retenue pour la suite des travaux. L'étude d'Envirometal présentée à l'annexe I, indique que le traitement au fer monovalent ne peut traiter que 50 % de la masse de contaminants dissous présente dans l'eau interceptée au puits Z4b. De ce fait, d'autres produits de traitement doivent être complémentaires au fer monovalent. Ces résultats démontrent la complexité de traitement de l'eau contaminée de Ville-Mercier et l'importance de sélectionner des traitements éprouvés. Dans cette optique, seul le traitement *ex situ* des effluents

provenant du confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire est retenu pour le développement d'une solution intégrée. Le tableau 5.12 montre les options d'application du confinement des zones sources qui n'ont pas été sélectionnées et la cause principale de leur rejet.

Tableau 5.12 : Applications rejetées du concept de confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire et cause principale de leur rejet

Application rejetée	Cause principale du rejet
Confinement total seul (sans pompage interne)	Susceptible de permettre des fuites hors du confinement
Traitement passif <i>in situ</i> par puits réactifs	Le fer monovalent dans les puits réactifs ne permet pas de traiter tous les types de contaminants présents dans le panache.

5.3.1.2 Contrôle hydraulique en aval des zones sources

Le contrôle hydraulique dans l'aquifère granulaire a pour objectif d'intercepter le panache d'eau contaminée émis en aval des zones sources. Ce concept fait appel à une technologie simple et éprouvée soit le contrôle *in situ* du panache et le traitement *ex situ* de l'eau captée. De plus, il est robuste aux changements hydrauliques, de concentrations et de types de contaminants qui peuvent survenir dans le temps. Ce concept est également facile d'opération et d'entretien.

L'option d'application retenue pour le développement d'une solution intégrée est le contrôle ponctuel sans autres mesures combinées. Les options d'application qui impliquent des mesures de déviation de l'écoulement local n'ont pas été retenues. Les causes de leur rejet sont présentées au tableau 5.13. Dans le cas où des murs imperméables seraient utilisés pour dévier l'écoulement local, un confinement vertical presque total des zones sources serait nécessaire pour que la déviation soit efficace. Dans le cas où la déviation serait réalisée par des puits, le concept serait plus difficile à opérer et à surveiller et l'eau extraite pourrait avoir à être traitée.

Tableau 5.13 : Applications rejetées du concept de contrôle hydraulique dans l'aquifère granulaire et cause principale de leur rejet

Application rejetée	Cause principale du rejet
Murs confinant l'écoulement local	Application qui s'apparente au confinement vertical des zones sources. Celle-ci ne permettra pas un gain important au niveau de l'efficacité du contrôle hydraulique
Déviations hydrauliques de l'eau non contaminée s'écoulant vers la zone source (Puits d'extraction)	Application plus complexe à opérer et à surveiller et l'eau extraite peut avoir à être traitée

5.3.2 Concepts préliminaires applicables à l'aquifère granulaire rejetés par la sélection

Le contrôle passif et semi-passif et le contrôle par zone réactive applicables à l'aquifère granulaire n'ont pas été retenus par la sélection. Dans les sections suivantes, les désavantages principaux de ces concepts sont présentés. Ceux-ci constituent les causes de leur rejet.

5.3.2.1 Contrôle passif et semi-passif

Le concept de contrôle passif et semi-passif a pour objectif de contrôler passivement et de traiter *in situ* le panache d'eau contaminée. Ce concept a pour désavantages d'être peu efficace et robuste aux conditions hydrauliques et de la contamination dans l'aquifère granulaire.

5.3.2.2 Contrôle par zone réactive

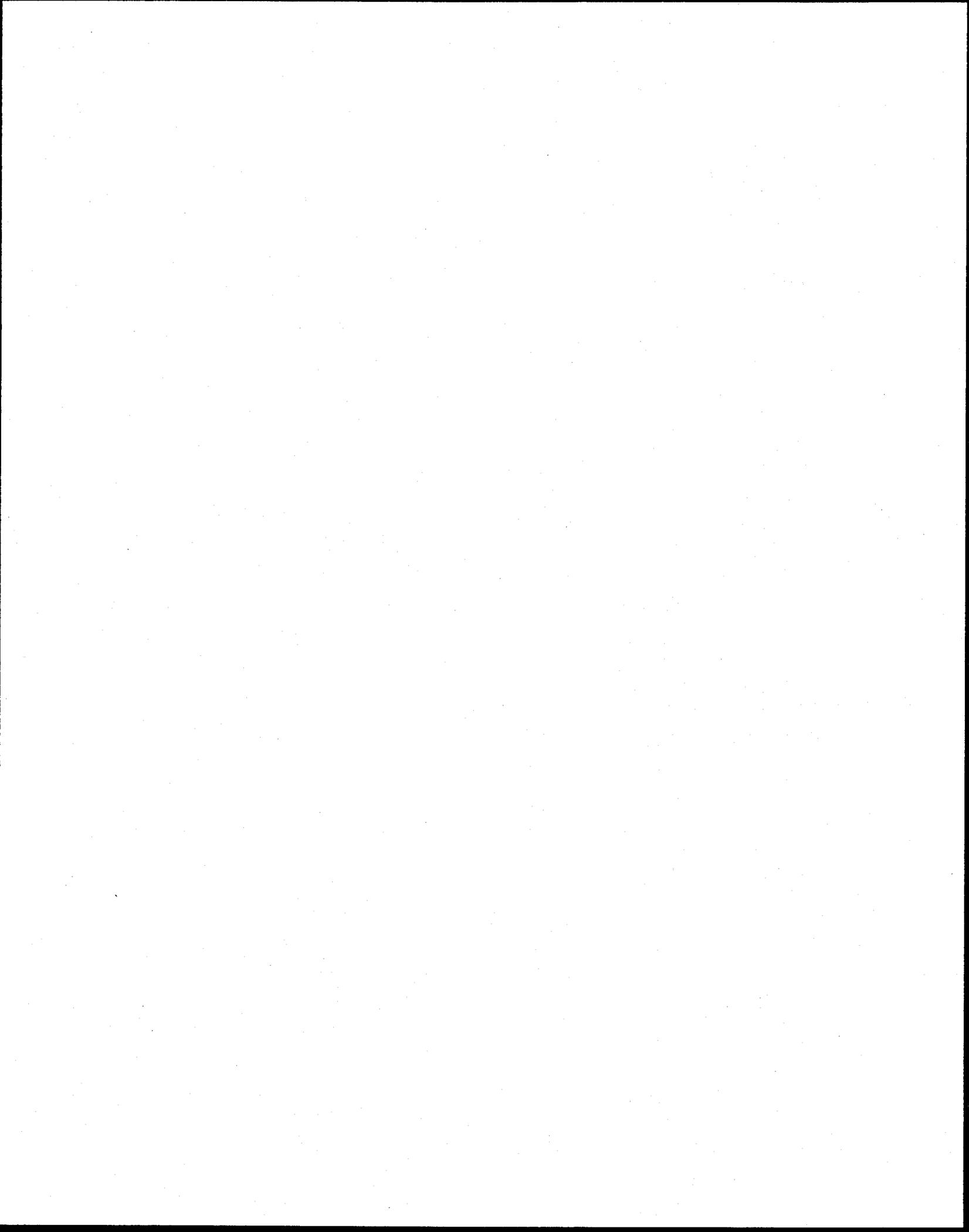
Le concept de contrôle par zone réactive a pour objectif d'intercepter le panache d'eau contaminée et de le traiter *in situ*. Le désavantage principal de ce concept est qu'il implique des technologies qui doivent être combinées pour traiter l'ensemble des contaminants présents dans le panache. De ce fait, les conditions d'opération et d'entretien de ce concept sont complexes. Également à titre de désavantage, certaines technologies proposées dans ce concept ne sont pas des applications courantes.

5.3.3 Options d'application du concept de contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé retenues et rejetées

Certaines options d'application du contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé n'ont pas été retenues lors de la rencontre entre l'INRS et les représentants du MENV. Celles-ci sont présentées au tableau 5.14 ainsi que la cause principale de leur rejet. Seul le contrôle hydraulique linéaire en aval de la zone source a été retenu pour l'élaboration de solutions intégrées.

Tableau 5.14 : Applications rejetées du concept de contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé et cause principale de leur rejet

Application rejetée	Cause principale du rejet
Contrôle ponctuel en aval de la zone source (1 puits)	L'utilisation d'un seul puits pour le contrôle n'est pas recommandable, puisque le système doit posséder au minimum 1 puits de rechange en cas d'arrêt pour l'entretien du système.
Contrôle distribué à l'intérieur de la zone source	Récupération possible de LID, ce qui peut compliquer le contrôle et le traitement des effluents
Déviation hydraulique de l'eau non contaminée s'écoulant vers la zone source (Puits d'extraction)	Application plus complexe à opérer et à surveiller et l'eau extraite peut avoir à être traitée



CHAPITRE 6

PHASE III

Concepts de solution intégrés

Ce chapitre présente la définition détaillée des concepts de solution intégrés pour le contrôle et le traitement des panaches d'eau contaminée de Ville-Mercier et les travaux de modélisation qui ont été réalisés par la suite afin de préciser et d'optimiser les conditions de mise en œuvre de ces concepts. Suite à ces travaux, il a été possible de définir les éléments de design optimaux des infrastructures constituant les concepts intégrés et d'en évaluer leurs coûts globaux. Les travaux de la Phase III correspondent aux étapes 8 à 11 du processus de sélection présenté à la figure 6.1.

6.1 Élaboration des concepts de solution intégrés

Les concepts de solution préliminaires applicables à l'aquifère granulaire retenus par la sélection du chapitre 5 ont été combinés au concept de solution élaboré pour l'aquifère de roc fracturé afin de définir des concepts de solution intégrés. De cet exercice, deux concepts globaux ont été définis :

- Concept 1: Confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire combiné au contrôle hydraulique du panache d'eau contaminée dans l'aquifère de roc fracturé;
- Concept 2: Contrôle hydraulique des panaches d'eau contaminée dans les aquifères granulaire et de roc fracturé avec des infrastructures distinctes.

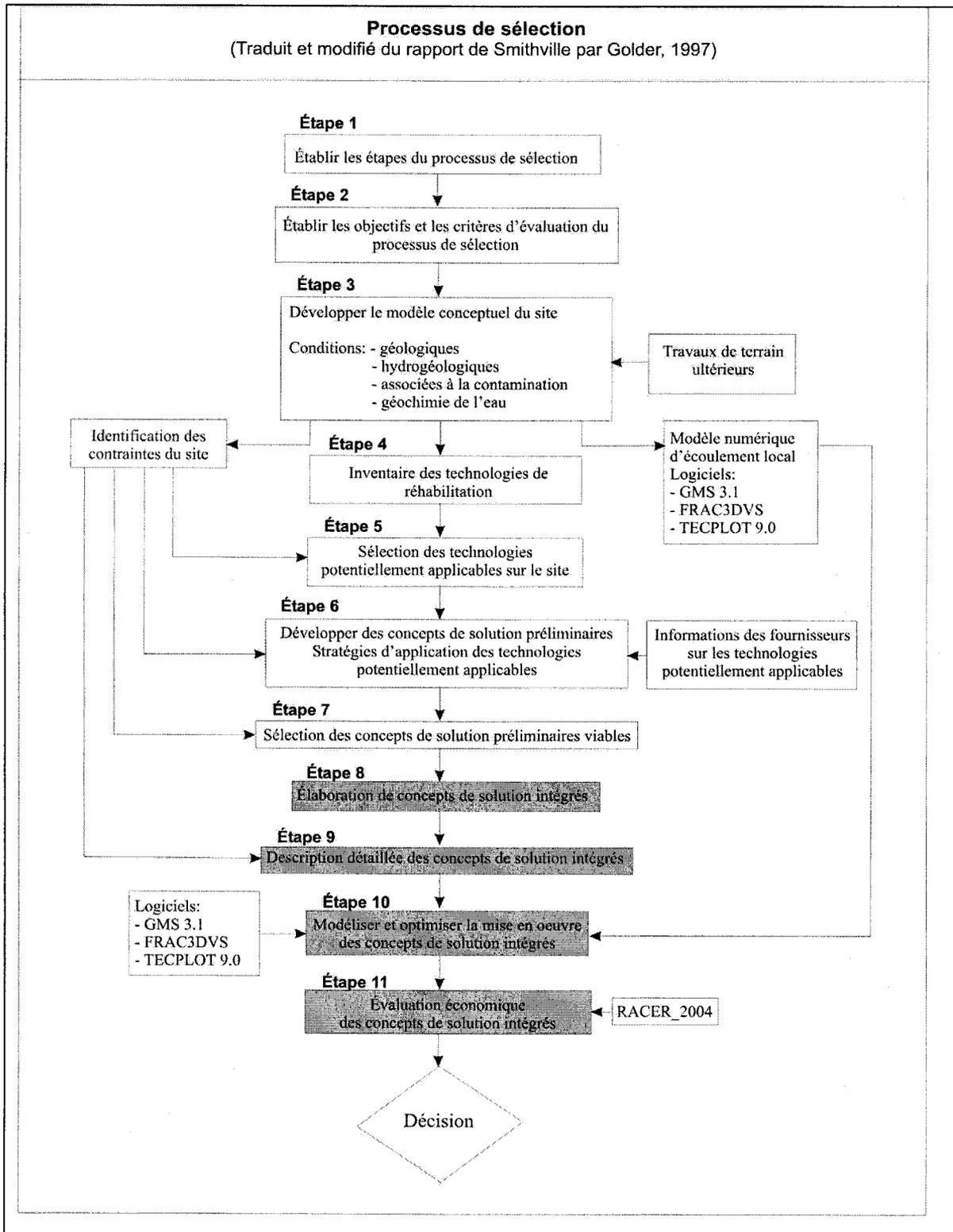


Figure 6.1 : Phase III du processus de sélection

6.2 Description détaillée des concepts de solution intégrés

Suite à la formulation des concepts de solution intégrés, une définition plus détaillée de leurs composantes respectives a été réalisée. Ces travaux sont présentés dans les prochaines sections. Dans un premier temps, une description générale des concepts est faite. Dans un deuxième temps, une description technique des concepts est présentée. Dans un troisième temps, une liste des travaux de caractérisation complémentaire nécessaires aux concepts est élaborée.

6.2.1 Concept 1 – Confinement des lagunes et contrôle hydraulique au roc

6.2.1.1 Description générale du concept intégré 1

Le concept de confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire a été combiné au concept de contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé pour former le concept intégré 1. Le concept de confinement a été retenu dû à ses nombreux avantages qui sont de permettre l'arrêt des émissions de contaminants dissous dans l'aquifère granulaire et de ne pas nécessiter de mesures autres que la surveillance en dehors de l'enceinte confinée. De plus, ce concept est très robuste, c'est-à-dire qu'il permet d'assurer la même efficacité de contrôle en dépit des modifications possibles des conditions hydrauliques dans le secteur suite à l'arrêt éventuel du pompage à l'UTES. Le concept de contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé est, pour sa part, le seul concept retenu pour le contrôle du panache d'eau contaminée au roc.

Suite à la mise en place des mesures de contrôle dans les deux aquifères, il existera un panache à résorber dans l'aquifère granulaire entre les limites de l'enceinte confinée et l'UTES. Plusieurs mesures sont envisagées pour la résorption de ce panache. Ces mesures sont présentées dans la description technique du concept intégré 1.

6.2.1.2 Description technique du concept intégré 1

La description technique du concept intégré 1 est réalisée par partie :

- Confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire ;
- Contrôle hydraulique linéaire en aval de la zone source de l'aquifère de roc fracturé ;
- Captage du panache à résorber dans l'aquifère granulaire, conditions transitoires ;
- Traitement des effluents ; et
- Surveillance.

La figure 6.2 présente la localisation possible des infrastructures qui constituent le concept intégré 1. Ce concept prévoit la mise en place *in situ* de deux infrastructures de contrôle principales, soit celle pour le confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire et celle pour le contrôle hydraulique du panache d'eau contaminée dans l'aquifère de roc fracturé. De plus, ce concept implique la mise en place d'infrastructures pour la résorption du panache dans l'aquifère granulaire et pour la surveillance de ce concept. La localisation envisagée pour la future usine de traitement des effluents est également indiquée.

Confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire

La localisation d'un futur confinement vertical et horizontal des zones sources dans l'aquifère granulaire est indiquée par un trait gras au pourtour des sols contaminés à la figure 6.2. Les limites du confinement comprennent les anciennes lagunes et l'accumulation de LID en aval des lagunes. Une certaine proportion des sols contaminés au nord-ouest du site n'est pas incluse dans l'enceinte de confinement. À cet endroit, la profondeur des sols contaminés est faible, soit moins de 4 m (d'après nos travaux antérieurs). L'excavation de ces sols est recommandée afin de réduire la masse de contaminants dans l'enceinte confinée et de réduire ses dimensions physiques. À l'intérieur de l'enceinte confinée, des puits d'extraction seraient implantés pour contrôler principalement les charges hydrauliques internes afin de maintenir des charges plus faibles à l'intérieur qu'à l'extérieur du confinement. Les localisations envisagées pour ces puits sont présentées à la figure 6.2. Les puits (3) qui seraient implantés dans la

grande lagune (2) et la petite lagune (1) permettraient d'extraire l'eau fortement contaminée contenue dans les nappes perchées existantes. Suite à cette opération, deux puits installés dans des points bas au sud et à l'est de l'enceinte confinée permettraient de contrôler les charges hydrauliques. À l'intérieur du confinement, le pompage interne risque d'extraire également des LIL et des LID contenus dans les sols. Dans cette optique, le système de traitement des effluents doit prévoir un séparateur de phases. Également, des mesures de traitement pour les phases huileuses récupérées doivent être envisagées en plus du système de traitement de l'eau contaminée.

Un système de captage des gaz à l'intérieur de la zone confinée devra être mis en place pour empêcher la migration hors de l'enceinte confinée des gaz contaminés émis dans la zone non saturée par les produits volatils et semi-volatils présents dans les sols.

Un design de base a été réalisé pour la cellule de confinement. Ce design comprend les éléments suivants, présentés au tableau 6.1 :

- L'aire de surface du confinement horizontal à mettre en place à la surface ;
- L'aire de surface de la couche de ventilation pour la récupération des gaz ;
- Le nombre, la position, l'aire et la profondeur des murs du confinement vertical ;
et
- Le nombre, la profondeur, la longueur de la crépine des puits de pompage mis en place à l'intérieur de l'enceinte confinée.

Le design de base pour chacun des éléments constituant le confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire a été défini selon des données précises. Le périmètre du confinement horizontal a été établi selon la limite des sols contaminés dont l'épaisseur excède 4 m (d'après nos travaux antérieurs). La couche de ventilation qui est une composante du confinement horizontal possède des dimensions physiques similaires. Le confinement vertical est constitué de onze (11) murs imperméables qui sont implantés dans l'unité de till compact et se poursuivent jusqu'à la surface du sol.

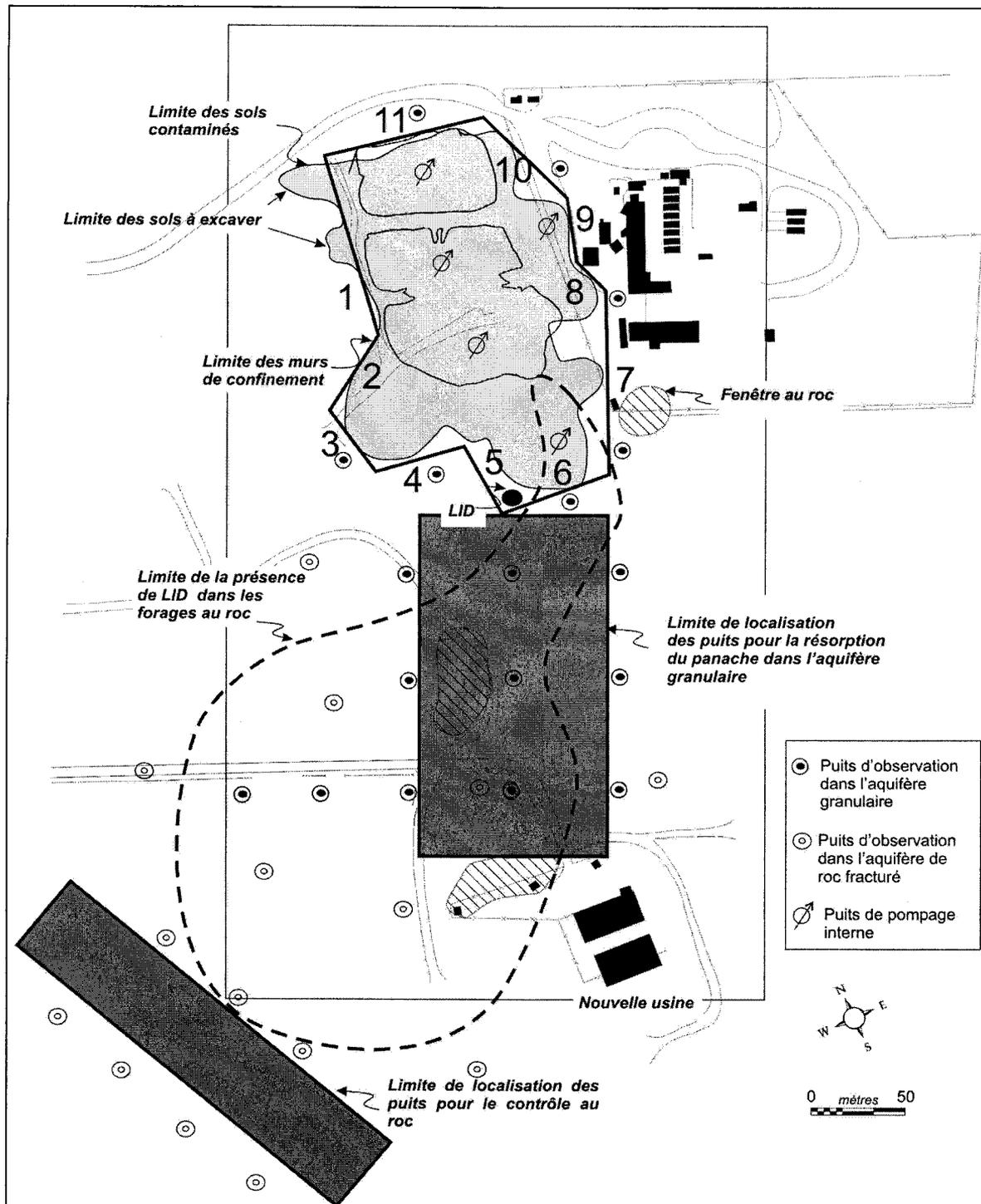


Figure 6.2 : Concept 1 - Confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire combiné au contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé

La profondeur de la grande lagune correspond à la profondeur des puits implantés dans celle-ci. Ces puits sont crépinés sur l'ensemble de l'épaisseur saturée. La profondeur de la petite lagune correspond à la profondeur du puits implanté dans celle-ci. Ce puits est crépiné sur l'ensemble de l'épaisseur saturée. La profondeur de l'aquifère granulaire correspond à la profondeur des puits implantés dans l'enceinte confinée. Ces puits sont crépinés sur l'ensemble de l'épaisseur saturée. Les technologies qui sont applicables au confinement vertical et horizontal ont été présentées à la section 5.1.3.2. Le choix des technologies à appliquer pour le confinement relève de considérations économiques.

Contrôle hydraulique linéaire en aval de la zone source dans l'aquifère de roc fracturé

L'emplacement envisagé pour les puits de contrôle dans l'aquifère de roc fracturé est montré par un rectangle en trait gras dans le coin inférieur gauche de la figure 6.2. La ligne de puits futurs est orientée perpendiculairement à la direction d'écoulement dans le roc fracturé et située en aval de la zone source. Le nombre de puits, leurs emplacements exacts et les débits ponctuels minimaux de contrôle de ceux-ci ont été déterminés par les travaux de modélisation et d'optimisation présentés à la section 6.3. Toutefois, un nombre minimal de 2 puits est considéré, puisqu'il est nécessaire de posséder un puits de remplacement lors de travaux d'entretien.

Un design de base a été établi pour les puits de contrôle au roc. Il est présenté au tableau 6.2. Des études antérieures ont démontré que l'aquifère de roc fracturé est perméable sur une épaisseur d'au moins 30 m. Des LID ont été découverts jusqu'à 15 m de profondeur dans le roc (Gélinas et al., 1989). Ces observations ont permis de déterminer la profondeur des puits d'extraction au roc. Afin de contrôler l'ensemble de la section d'écoulement, la profondeur recommandée pour les puits d'extraction est de 30 m de profondeur dans le roc. La section de captage est ouverte sur l'ensemble de la formation rocheuse.

Tableau 6.1 : Design de base : Confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire

Confinement horizontal	
Aire de surface	23 182 m ²
Couche de ventilation	
Aire de surface	23 182 m ²
Confinement vertical	
Nombre de murs	11
Localisation des murs	Voir figure 6.2
Aire totale verticale	12 727 m ²
Périmètre	651 m
Profondeur du mur 1	8 m
Longueur du mur 1	93 m
Profondeur du mur 2	10 m
Longueur du mur 2	41 m
Profondeur du mur 3	12 m
Longueur du mur 3	52 m
Profondeur du mur 4	18 m
Longueur du mur 4	53 m
Profondeur du mur 5	23 m
Longueur du mur 5	33 m
Profondeur du mur 6	29 m
Longueur du mur 6	59 m
Profondeur du mur 7	31 m
Longueur du mur 7	94 m
Profondeur du mur 8	27 m
Longueur du mur 8	27 m
Profondeur du mur 9	25 m
Longueur du mur 9	35 m
Profondeur du mur 10	23 m
Longueur du mur 10	65 m
Profondeur du mur 11	12 m
Longueur du mur 11	97 m
Puits de pompage interne	
Nombre de puits	5
Profondeur (Puits dans la grande lagune)	11.5 m
Longueur de la crépine (Puits dans la grande lagune)	9.5 m
Profondeur (Puits dans la petite lagune)	6 m
Longueur de la crépine (Puits dans la petite lagune)	6 m
Profondeur (Puits dans l'enceinte confinée au sud)	32 m
Longueur de la crépine (Puits dans l'enceinte confinée au sud)	7 m
Profondeur (Puits dans l'enceinte confinée au sud)	21.25
Longueur de la crépine (Puits dans l'enceinte confinée à l'Est)	6 m

Tableau 6.2 : Design de base : Contrôle hydraulique linéaire dans l'aquifère de roc fracturé

Profondeur	61 m
Longueur de la section ouverte	30 m
Diamètre interne du puits	0.15 m (6'')

Captage du panache à résorber dans l'aquifère granulaire, conditions transitoires

Suite à la mise en place du confinement dans l'aquifère granulaire, il existera un panache d'eau contaminée entre les limites de l'enceinte confinée et l'UTES. Dans cette optique, plusieurs options sont considérées pour la résorption de celui-ci :

- 1) Résorption du panache avec les puits de l'UTES et les débits de pompage actuels ;
- 2) Résorption du panache avec les puits de l'UTES et un débit total de pompage minimal pour contrôler la largeur du panache ;
- 3) La seconde option combinée à des puits distribués dans le panache avec un débit de pompage ponctuel minimal pour contrôler la largeur du panache.

Chacune de ces options a fait l'objet de modélisations et d'optimisation afin de définir les débits minimaux de contrôle et les temps de résorption du panache. Les résultats présentés à la section 6.3 ont permis de déterminer l'option de résorption qui présente le plus d'intérêt d'un point de vue économique et technique.

L'emplacement envisagé pour les puits qui seraient implantés dans le panache d'eau contaminée à résorber est indiqué par un rectangle en trait gras situé entre les anciennes lagunes et l'UTES à la figure 6.2. Les puits seraient implantés parallèlement à la direction d'écoulement et à équidistance. Celle-ci varierait en fonction du nombre de puits utilisés. Le tableau 6.3 présente les éléments de design envisagés pour ces puits.

Tableau 6.3 : Design de base : Puits distribués dans le panache d'eau contaminée à résorber

Profondeur	29 m
Longueur de la crépine	6 m

Le design de base pour ces puits a été défini selon des données précises. La profondeur de l'aquifère granulaire correspond à la profondeur des puits implantés dans le panache à résorber. Ces puits sont crépinés sur le tiers inférieur de l'épaisseur saturée.

Traitement des effluents du concept intégré 1

Dans le concept intégré 1, les technologies de contrôle des panaches d'eau contaminée dans les aquifères granulaire et de roc fracturé génèrent les effluents à traiter suivants :

- Effluents de la cellule de confinement (LID, LIL, gaz et eau souterraine fortement contaminée) ;
- Effluents provenant du contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé (eau souterraine) ;
- Effluents provenant de la résorption du panache dans l'aquifère granulaire (eau souterraine).

Les traitements *ex situ* envisagés pour ces effluents sont présentés subséquemment.

Effluents de la cellule de confinement (LID, LIL, gaz et eau souterraine fortement contaminée)

Tel que mentionné précédemment, les puits d'extraction qui seraient implantés dans l'enceinte confinée pourraient capter à la fois de l'eau souterraine fortement contaminée et des phases libres de LID et de LIL. Un séparateur de phases doit être combiné au système de captage pour récupérer les phases libres de contaminants et les traiter indépendamment de l'eau souterraine contaminée. Les fortes concentrations en contaminants présentent dans les deux phases rendent le traitement de ces effluents complexe. Les LID et les LIL devraient être disposées hors site ou à l'incinérateur. L'eau fortement contaminée devrait soit être disposée hors site ou à l'incinérateur, soit traitée *ex situ* par des installations indépendantes ou traitée *ex situ* avec les effluents provenant du contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé. Les gaz captés passivement par les puits d'observation dans la zone confinée devraient être traités *in situ* par un système de filtre au charbon activé installé dans chacun des puits ou disposé à l'incinérateur.

Effluents provenant du contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé (eau souterraine)

Le traitement de l'eau souterraine contaminée provenant du contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé pourrait être réalisé par un système similaire à celui qui est en fonction actuellement à l'UTES. La ventilation (*Air stripping*) est une technologie éprouvée pour l'enlèvement des composés organiques volatils et semi-volatils dissous dans l'eau souterraine contaminée. Actuellement, l'efficacité du système se situe entre 50 à 70 % d'enlèvement de masse et tous les composés majeurs, excluant de rares exceptions, rencontrent les normes de rejet d'eau de surface (M. Séguin, communication personnelle). Il est important de noter que la tour de ventilation actuelle de l'UTES fonctionne au maximum de sa capacité en terme de volume d'eau et de concentrations totales de contaminants dissous à traiter (M. Séguin, communication personnelle). De ce fait, l'option de construction d'une nouvelle tour de ventilation dont le design serait optimal pourrait permettre un enlèvement de masse surpassant les 99 %.

Les volumes d'eau à traiter qui ont été déterminés par les travaux de modélisation et d'optimisation à la section 6.3 ont permis de définir un design de base pour la tour de ventilation. Comme il a été mentionné précédemment, l'eau fortement contaminée provenant du pompage interne dans la zone confinée pourrait être également traitée par le système de ventilation de la nouvelle usine. Dans ce concept, un traitement est proposé pour l'air contaminé généré par la tour de ventilation, soit l'oxydation catalytique. Le design de cette technologie est basé sur celui de la tour de ventilation (RACER_2004, voir annexe L). Il est possible que ce traitement soit facultatif, dans le cas où les concentrations en composés organiques volatils et semi-volatils de l'air contaminé seraient inférieures aux normes de rejet dans l'atmosphère sur le site.

Actuellement, à l'UTES, l'enlèvement du fer dissous représente la majeure partie des opérations de traitement de l'eau souterraine. Ces traitements coûteux comptent pour 66 % du budget annuel d'opération et de maintenance de l'UTES. Ces traitements sont nécessaires pour enlever suffisamment le fer dissous pour rencontrer les normes de rejet de l'eau de surface (M. Séguin, communication personnelle). Il est à noter que les fortes concentrations en fer dissous présentes dans l'eau contaminée correspondent aux

concentrations naturelles retrouvées dans les aquifères. De ce fait, la ré-injection des effluents dans les aquifères, suite au traitement par ventilation, n'aurait pas à rencontrer de normes au niveau du fer dissous. Présentement, les taux d'enlèvement de masse des composés organiques volatils et semi-volatils à l'UTES ne permettent pas de considérer la ré-injection des effluents dans les aquifères, puisque les concentrations de ces composés surpassent les normes de rejet de l'eau souterraine. Toutefois, en considérant un traitement de ventilation qui serait optimal et des taux d'enlèvement de masse qui surpasseraient les 99%, il serait intéressant du point de vue économique de considérer l'option de ré-injection des effluents dans les aquifères. À la section 6.3, des travaux de modélisation ont été réalisés afin de montrer l'effet hydraulique de la ré-injection dans l'aquifère granulaire.

Effluents provenant de la résorption du panache dans l'aquifère granulaire (eau souterraine)

Deux possibilités sont envisagées pour le traitement de l'eau souterraine provenant de la résorption du panache dans l'aquifère granulaire. Les possibilités sont que l'eau contaminée soit traitée par ventilation à l'UTES actuelle ou qu'elle soit traitée par la nouvelle usine envisagée principalement pour le traitement de l'eau provenant du contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé.

Surveillance

Un plan de surveillance des installations du confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire et du contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé a été développé. Les localisations des puits de surveillance pour le concept intégré 1 sont montrées à la figure 6.2. Dans l'aquifère granulaire, une première surveillance doit être réalisée au pourtour du confinement afin d'évaluer l'efficacité de celui-ci. Ensuite, des puits d'observation doivent être mis en place dans le panache à résorber pour suivre l'évolution de la résorption. Dans l'aquifère de roc fracturé, des puits doivent être implantés de part et d'autre de la zone source ainsi qu'en amont et en aval du système de pompage afin d'évaluer l'efficacité du contrôle effectué. Ceux-ci permettront également de suivre les directions d'écoulement au niveau des fenêtres dans le till compact suite à l'arrêt de l'UTES. Cette surveillance est nécessaire pour vérifier que l'eau contaminée du

roc ne se dirige pas dans l'aquifère granulaire par le biais des fenêtres, car celle-ci ne serait pas captée et traitée. Des puits d'observation doivent être mis en place également dans la zone source de l'aquifère de roc fracturé pour suivre l'évolution des concentrations et des charges hydrauliques. Le tableau 6.4 résume les éléments de design des puits d'observation et leurs fonctions principales.

6.2.1.3 Travaux de caractérisation complémentaire pour le concept intégré 1

Des travaux de caractérisation complémentaire sont recommandés pour permettre un design plus précis des infrastructures de contrôle et de traitement des panaches d'eau contaminée de Ville-Mercier. Le confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire, la résorption du panache dans l'aquifère granulaire et le contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé nécessitent des travaux de caractérisation complémentaire distincts.

Les principaux travaux de caractérisation complémentaire peuvent être résumés comme suit:

- Contrôle du panache dans l'aquifère granulaire :
 - Caractériser l'étendue réelle de l'accumulation de LID en aval des anciennes lagunes.
- Résorption du panache dans l'aquifère granulaire :
 - Évaluer l'étendue et les concentrations en contaminants dissous du panache d'eau contaminée à résorber entre la future zone de confinement et l'UTES.
- Contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé :
 - Caractériser davantage les propriétés hydrauliques du roc;
 - Évaluer l'aire d'alimentation d'un puits de captage à différents débits de pompage;
 - Déterminer plus précisément la profondeur et la distribution de la zone source de LID dans le roc;
 - Observation des directions d'écoulement au niveau des fenêtres dans l'unité de till compact suite à l'arrêt de l'UTES.

Tableau 6.4 : Éléments de design des puits d'observation du concept intégré 1 et fonctions principales

Éléments	Fonctions principales	Nombre de puits	Profondeur
Confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire	Évaluer l'efficacité du confinement	7 nids de 2 puits dont les profondeurs sont différentes	15 m
			25 m
Résorption du panache dans l'aquifère granulaire	Suivre la résorption du panache au niveau des concentrations en contaminants dissous et les charges hydrauliques	11 nids de 2 puits dont les profondeurs sont différentes	15 m
			25 m
Contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé	Évaluer l'efficacité du contrôle hydraulique de part et d'autre de la zone source et en amont et en aval du captage	11 nids de 2 puits dont les profondeurs sont différentes	40 m
			50 m
	Suivre la direction d'écoulement au niveau des fenêtres dans le till compact suite à l'arrêt de l'UTES	4 nids de 2 puits dont les profondeurs sont différentes	40 m
Suivre les concentrations en contaminants dissous au niveau de la zone source	50 m		

6.2.2 Concept 2 – Contrôle hydraulique dans les deux aquifères

6.2.2.1 Description générale du concept intégré 2

Le concept de contrôle hydraulique en aval des zones sources dans l'aquifère granulaire a été combiné au concept de contrôle hydraulique linéaire en aval de la source dans l'aquifère de roc fracturé pour constituer le concept intégré 2. Le concept de contrôle hydraulique indépendant dans les deux aquifères à l'aide de deux systèmes de pompage conventionnel distincts a été sélectionné puisqu'il fait appel à une technologie prouvée, robuste et facile d'opération et d'entretien. De plus, il a été démontré sur le site depuis plus de vingt ans que le piège hydraulique créé par le système de pompage en place capte efficacement les panaches d'eau contaminée présents dans les deux aquifères. Toutefois, un mauvais design du système de captage et une mise en œuvre non optimale ne permettent pas de rendre économique le système de contrôle et de traitement actuel.

Dans le présent concept, les contrôles hydrauliques réalisés indépendamment dans les deux aquifères ont fait l'objet de modélisations et d'optimisation à la section 6.3 afin de rendre leur mise en œuvre optimale. Comme il a été mentionné dans le concept 1, suite à la mise en place des systèmes de contrôle hydraulique dans l'aquifère granulaire et de roc fracturé, il existera un panache à résorber dans l'aquifère granulaire entre le système de contrôle en aval des anciennes lagunes et l'UTES. Les mesures pour la résorption de ce panache sont les mêmes que celles présentées dans la description technique du concept intégré 1.

6.2.2.2 Description technique du concept intégré 2

La description technique du concept intégré 2 est réalisée en parties :

- Contrôle hydraulique en aval des zones sources dans l'aquifère granulaire ;
- Contrôle hydraulique linéaire en aval de la zone source de l'aquifère de roc fracturé ;
- Captage du panache à résorber dans l'aquifère granulaire, conditions transitoires ;
- Traitement des effluents ; et
- Surveillance.

La figure 6.3 présente la localisation possible des infrastructures qui constituent le concept intégré 2. Ce concept prévoit la mise en place *in situ* de deux infrastructures de contrôle principales, soit celle pour le contrôle hydraulique en aval des zones sources dans l'aquifère granulaire et celle pour le contrôle hydraulique du panache d'eau contaminée dans l'aquifère de roc fracturé. De plus, ce concept implique la mise en place d'infrastructures pour la résorption du panache dans l'aquifère granulaire et pour la surveillance de ce concept. Également, la localisation d'une future usine de traitement est montrée.

Contrôle hydraulique en aval des zones sources dans l'aquifère granulaire

L'emplacement envisagé pour l'implantation d'un système de contrôle hydraulique dans l'aquifère granulaire est montré à la figure 6.3. Cet emplacement est localisé en aval des anciennes lagunes et de l'accumulation de LID. Sur la figure, les limites connues du panache d'eau contaminée sont également présentées. Celles-ci ont permis de déterminer les limites latérales envisagées pour l'implantation des puits de contrôle hydraulique. Deux (2) puits sont proposés pour réaliser le contrôle hydraulique en aval des anciennes lagunes, puisqu'il est nécessaire de posséder un puits de remplacement lors de travaux d'entretien. Un design de base des puits de contrôle comprenant la profondeur et la longueur de la crépine est montré au tableau 6.5. Des travaux de modélisation et d'optimisation à la section 6.3 ont été poursuivis pour déterminer le débit minimal ponctuel de contrôle et le diamètre interne des puits.

Tableau 6.5 : Design de base : Contrôle hydraulique dans l'aquifère granulaire

Profondeur	27 m
Longueur de la crépine	6 m

Le design de base pour ces puits a été défini selon des données précises. La profondeur de l'aquifère granulaire correspond à la profondeur des puits implantés en aval des anciennes lagunes. Ces puits sont crépinés sur le tiers inférieur de l'épaisseur saturée.

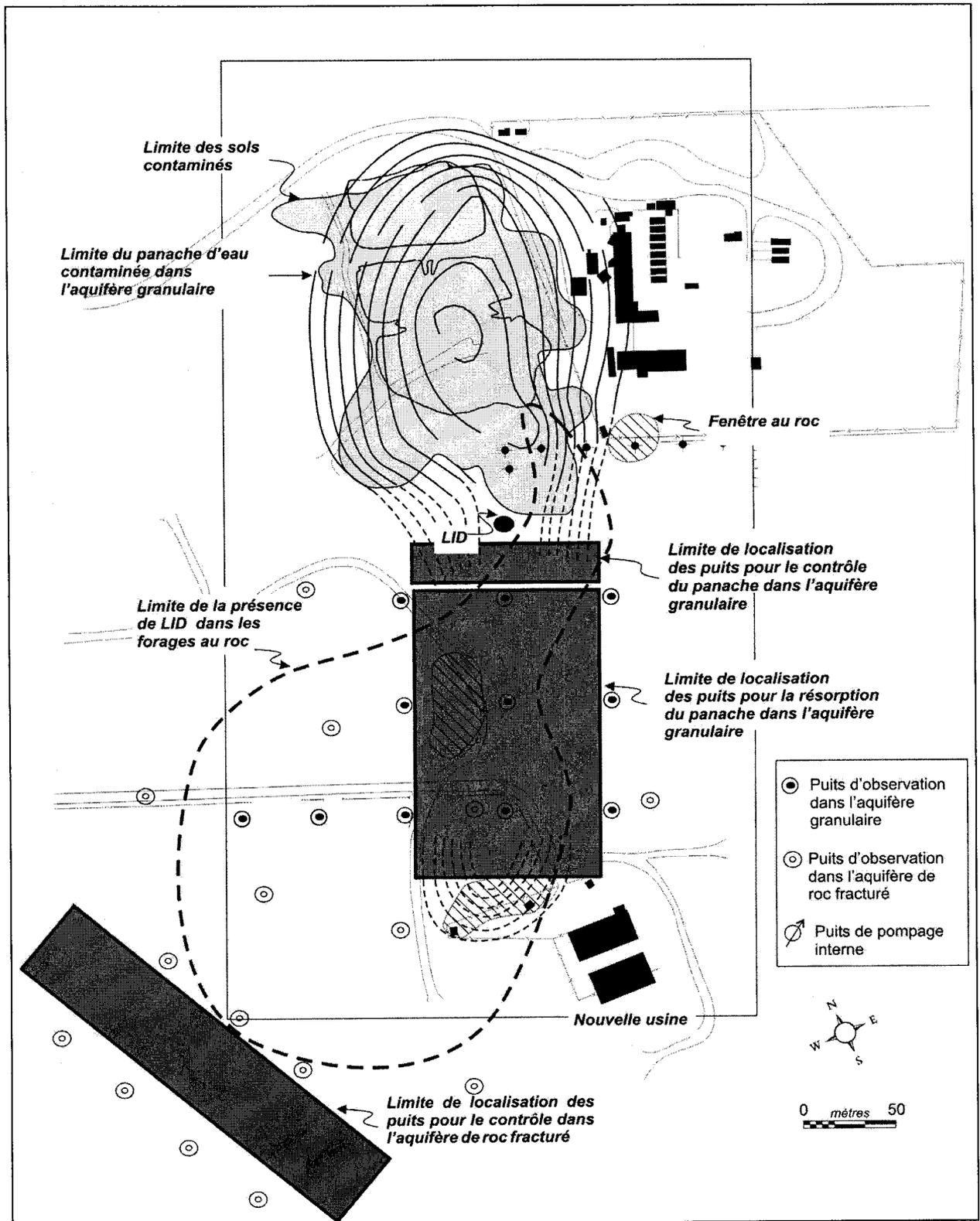


Figure 6.3 : Concept 2 : Contrôle hydraulique dans les aquifères granulaire et de roc fracturé

Contrôle hydraulique linéaire en aval de la zone source dans l'aquifère de roc fracturé

L'emplacement envisagé pour le contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé est montré à la figure 6.3. Cet emplacement est le même que celui présenté dans le concept intégré 1. De ce fait, la description technique de cet élément est disponible à la section 6.2.1.2 (Tableau 6.2).

Captage du panache à résorber dans l'aquifère granulaire, conditions transitoires

Suite à la mise en place du contrôle hydraulique dans l'aquifère granulaire et l'aquifère de roc fracturé, il existera un panache à résorber dans l'aquifère granulaire entre le système de contrôle en aval des anciennes lagunes et l'UTES. Les options de résorption du panache de l'aquifère granulaire en conditions transitoires sont semblables à celles proposées dans le concept intégré 1. Toutefois, la limite nord de l'emplacement envisagé pour les puits qui seraient implantés dans le panache est plus au sud due aux limites du contrôle hydraulique proposées. La description technique des options de résorption du panache est présentée à la section 6.2.1.2 (Tableau 6.3).

Traitement des effluents du concept intégré 2

Dans le concept intégré 2, les technologies utilisées pour le contrôle des panaches d'eau contaminée dans l'aquifère granulaire et de roc fracturé génèrent les effluents à traiter suivants :

- Effluents provenant du contrôle hydraulique dans l'aquifère granulaire et dans l'aquifère de roc fracturé (eau souterraine) ;
- Effluents provenant de la résorption du panache dans l'aquifère granulaire (eau souterraine).

Les traitements *ex situ* envisagés pour ces effluents sont présentés subséquentment.

Effluents provenant du contrôle hydraulique dans l'aquifère granulaire et dans l'aquifère de roc fracturé (eau souterraine)

Tel que mentionné pour le concept intégré 1, un système de traitement similaire à celui de l'UTES pourrait être mis en place pour traiter les effluents provenant du contrôle

hydraulique dans l'aquifère granulaire et dans l'aquifère de roc fracturé. La tour de ventilation est une technologie éprouvée qui permettrait dans le cas d'un design optimal d'enlever plus de 99% des composés organiques volatils et semi-volatils présents dans l'eau contaminée. Dans cette optique, la ré-injection des effluents dans les aquifères, suite au traitement de ventilation, pourrait être un choix économique puisque le traitement du fer dissous ne serait pas nécessaire. À la section 6.3, des travaux de modélisation ont été réalisés afin de montrer l'effet hydraulique de la ré-injection dans l'aquifère granulaire. Comme pour le concept intégré 1, un système d'oxydation catalytique est proposé pour traiter l'air contaminé généré par la tour de ventilation.

Les travaux de modélisation et d'optimisation de la section 6.3 ont permis de définir les volumes d'eau à traiter provenant du contrôle hydraulique dans les deux aquifères et de définir le design de base pour les installations de traitement.

Effluents provenant de la résorption du panache dans l'aquifère granulaire (eau souterraine)

Identique au concept intégré 1, l'eau contaminée provenant de la résorption du panache dans l'aquifère granulaire pourrait être traitée par ventilation à l'usine actuelle où à la nouvelle usine envisagée pour le traitement des effluents provenant du contrôle hydraulique dans l'aquifère granulaire et dans l'aquifère de roc fracturé.

Surveillance

Un plan de surveillance pour le concept intégré 2, soit le contrôle hydraulique dans les aquifères granulaire et de roc fracturé, a été développé. La figure 6.3 montre les localisations envisagées pour les puits d'observation. Il est à noter que le plan de surveillance est essentiellement le même que celui développé pour le concept intégré 1 à l'exception de la surveillance associée au confinement qui est exclu. De plus, les puits d'observation qui seraient implantés en aval des anciennes lagunes de part et d'autre du panache à résorber permettrait d'évaluer l'efficacité du contrôle hydraulique dans l'aquifère granulaire en plus de suivre l'évolution de la résorption du panache. Le plan de surveillance du concept intégré 1 est disponible à la section 6.2.1.2 (Tableau 6.4).

6.2.2.3 Travaux de caractérisation complémentaire pour le concept intégré 2

Des travaux de caractérisation complémentaire sont recommandés pour permettre un design plus précis des infrastructures de contrôle et de traitement des panaches d'eau contaminée de Ville-Mercier. Le contrôle hydraulique des panaches d'eau contaminée de l'aquifère granulaire et de l'aquifère de roc fracturé et la résorption du panache dans l'aquifère granulaire nécessitent des travaux de caractérisation complémentaire distincts. Ces travaux sont essentiellement les mêmes que ceux présentés pour le concept intégré 1 à la section 6.2.1.3.

6.3 Modélisation numérique et optimisation des concepts de solution intégrés

La modélisation de la mise en œuvre des concepts intégrés 1 et 2 permet de simuler l'effet hydraulique des technologies qui pourraient être mises en application dans ces concepts. Certaines de ces simulations constituent des études paramétriques dans le but de définir des éléments de design optimaux, tel un débit minimal de contrôle dans le cas d'un système de captage. Le modèle numérique d'écoulement local de Ville-Mercier (Pontlevoy, 2004) constitue la base des simulations numériques de la mise en œuvre des concepts intégrés 1 et 2. Préalablement aux simulations des concepts, des modélisations dites de base ont été réalisées afin de reproduire des conditions spécifiques de l'écoulement local. Les simulations de base sont les suivantes :

- Conditions permanentes : écoulement local actuel (pompage constant avec les puits de l'UTES au débit actuel) ;
- Conditions permanentes : écoulement naturel (sans pompage de l'UTES) ;
- Conditions transitoires entre l'arrêt des puits de l'UTES et le retour aux conditions d'écoulement naturel.

Ces simulations permettent de mieux comprendre le comportement du système d'écoulement local et servent de référence par rapport au comportement du système lorsque les concepts intégrés sont simulés. Les résultats des simulations de base sont présentés au chapitre 3.

6.3.1 Programme de modélisation

Des programmes de modélisation ont été réalisés pour étudier les conditions optimales de mise en œuvre des concepts intégrés 1 et 2 (présentés respectivement aux figures 6.4 et 6.5).

6.3.1.1 Programme de modélisation du concept intégré 1

Le programme de modélisation du concept intégré 1, soit le confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire combiné au contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé, est présenté à la figure 6.4. Le programme est divisé en trois parties :

1. Conditions permanentes : Contrôle hydraulique linéaire en aval de la zone source dans l'aquifère de roc fracturé;
2. Conditions permanentes : Confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire combiné à la partie 1;
3. Conditions transitoires : Résorption du panache de l'aquifère granulaire existant entre l'enceinte confinée et l'UTES combinée aux parties 1 et 2.

Les objectifs de chacune des parties du programme de modélisation ainsi que les calculs préliminaires qui ont été réalisés en relation avec les modélisations effectuées sont présentés au tableau 6.6. Il existe des éléments communs dans les deux concepts intégrés 1 et 2 :

- Le contrôle hydraulique en aval de la zone source dans l'aquifère de roc fracturé ; et
- La résorption du panache dans l'aquifère granulaire, conditions transitoires.

De ce fait, les designs optimaux de ces éléments qui sont définis par les modélisations du concept intégré 1 sont appliqués directement dans les modélisations du concept intégré 2.

6.3.1.2 Programme de modélisation du concept intégré 2

Le programme de modélisation du concept intégré 2 est montré à la figure 6.5. Ce concept implique le contrôle hydraulique linéaire en aval de la zone source dans l'aquifère de roc fracturé combiné au contrôle hydraulique en aval des zones sources dans

l'aquifère granulaire. Ce programme de modélisation est également divisé en trois parties :

1. Conditions permanentes : Contrôle hydraulique linéaire en aval de la zone source dans l'aquifère de roc fracturé (Choix technologique fixé par les modélisations du concept intégré 1);
2. Conditions permanentes : Contrôle hydraulique en aval des zones sources dans l'aquifère granulaire combiné à la partie 1;
3. Conditions transitoires : Résorption du panache de l'aquifère granulaire existant entre le contrôle hydraulique en aval des zones sources et l'UTES (Choix technologique fixé par les modélisations du concept intégré 1) combinée aux parties 1 et 2.

Les objectifs de chacune des parties du programme de modélisation ainsi que les calculs préliminaires réalisés en relation avec les modélisations effectuées sont présentés au tableau 6.7.

6.3.2 Modélisations détaillées et résultats

Les modélisations réalisées pour les concepts intégrés 1 et 2 et leurs résultats sont présentés selon l'ordre suivant :

- Conditions permanentes : modélisations dans l'aquifère de roc fracturé ;
- Conditions permanentes : modélisations dans l'aquifère granulaire ; et
- Conditions transitoires : modélisations pour la résorption du panache dans l'aquifère granulaire.

6.3.2.1 Modélisations détaillées du concept intégré 1 et résultats

Conditions permanentes : modélisations dans l'aquifère de roc fracturé (Contrôle hydraulique)

Des modélisations ont été réalisées dans l'aquifère de roc fracturé afin de déterminer le débit minimal que devrait appliquer le système de pompage pour contrôler le panache d'eau contaminée présent dans l'aquifère rocheux. Un calcul théorique présenté à l'annexe M a permis d'estimer une valeur du débit minimal de contrôle de 467 m³/d.

Concept 1: Confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire combiné au contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé

Conditions permanentes: Roc seul

Un puits en aval de la zone source (limite des LID) Déterminer le débit minimal pour contrôler la zone source

À l'aide de la solution de Thiem, définir le nombre de puits de 6" de diamètre nécessaire pour effectuer le contrôle ($2 < nb < 4$) 2 minimum pour le choix technologique

Choix technologique fixé pour la modélisation du concept intégré 2

Déterminer les débits ponctuels minimaux pour le nombre de puits qui a été défini

Conditions permanentes : Aquifère granulaire + Roc fracturé

Ajout du confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire

Confirmation des débits ponctuels minimaux des puits au roc

Conditions transitoires: Aquifère granulaire + Roc fracturé

Résorption du panache avec les débits actuels de l'UTES
Définir le temps de résorption

Résorption du panache avec les puits de l'UTES
Définir le débit minimal de contrôle pour la largeur du panache
Définir le temps de résorption

Résorption du panache avec les puits de l'UTES et x puits dans le panache. ($1 < x < 3$) Déterminer les débits ponctuels minimaux pour le contrôle
Définir le temps de résorption

Choix de la meilleure option de résorption fixé pour la modélisation du concept intégré 2

Figure 6.4 : Programme de modélisation numérique du concept intégré 1

Tableau 6.6 : Objectifs, calculs préliminaires et choix technologiques associés aux modélisations de la mise en œuvre du concept intégré 1

Parties	Objectifs	Calculs préliminaires	Choix technologiques
1 : Contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc seul	<ul style="list-style-type: none"> • Déterminer le débit minimal total de contrôle • Déterminer le nombre de puits nécessaire pour le contrôle 	<ul style="list-style-type: none"> • Calcul théorique du débit minimal total de contrôle (Annexe M) • Calcul théorique de la capacité d'un puits au roc (Annexe N) • Calcul théorique de la distance entre les puits (Annexe O) 	<ul style="list-style-type: none"> • Le design optimal est retenu pour les simulations du concept intégré 2 (nombre de puits, localisations et débits minimaux de contrôle ponctuel)
2 : Confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire + Partie 1	<ul style="list-style-type: none"> • Simuler l'effet du confinement • Confirmer les débits minimaux de contrôle ponctuel pour les puits au roc 	<ul style="list-style-type: none"> • Aucun calcul n'est nécessaire 	<ul style="list-style-type: none"> • Aucun choix technologique
3 : Résorption du panache dans l'aquifère granulaire + Parties 1 et 2	<ul style="list-style-type: none"> • Définir les débits minimaux de contrôle ponctuel pour les puits distribués dans le panache • Déterminer les temps de résorption du panache pour les 3 options technologiques proposées 	<ul style="list-style-type: none"> • Calcul théorique des débits minimaux de contrôle ponctuel pour les puits distribués dans le panache (Annexe M) • Calcul théorique du débit minimal de contrôle total pour les puits de l'UTES (Annexe M) 	<ul style="list-style-type: none"> • L'option technologique qui présente le plus d'intérêt par son design optimal est retenue pour être simulée dans le concept intégré 2

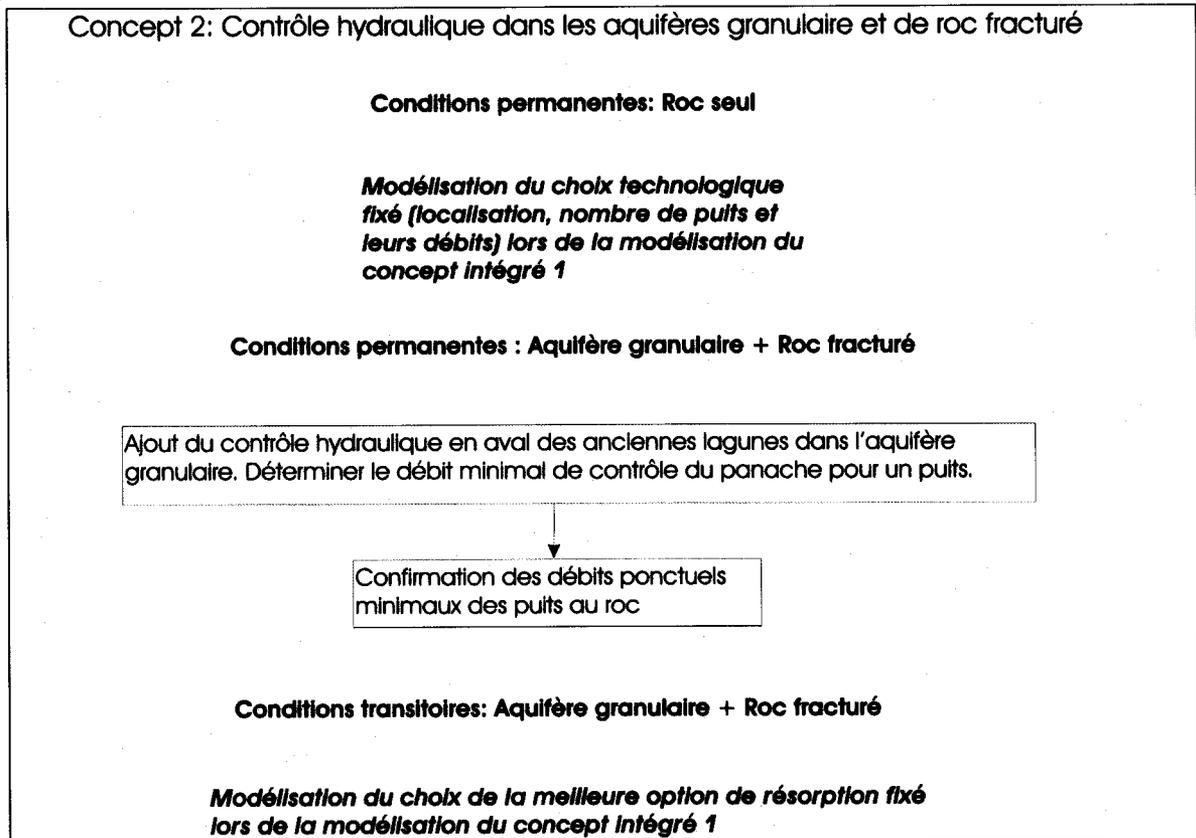


Figure 6.5 : Programme de modélisation numérique du concept intégré 2

Tableau 6.7 : Objectifs, calculs préliminaires et choix technologiques associés aux modélisations de la mise en œuvre du concept intégré 2

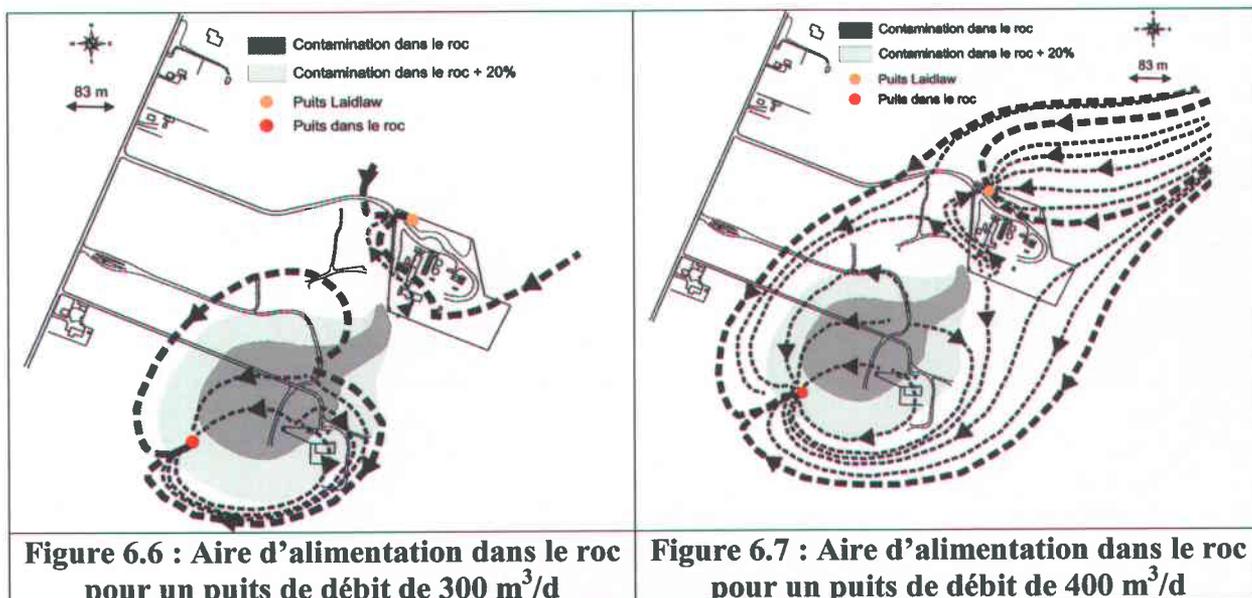
Parties	Objectifs	Calculs préliminaires
1 : Contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc seul	<ul style="list-style-type: none"> • Simuler l'effet hydraulique du choix technologique fixé dans les modélisations de la partie 1 du concept intégré 1 	<ul style="list-style-type: none"> • Semblables au concept intégré 1 (Annexes M, N, O)
2 : Contrôle hydraulique dans l'aquifère granulaire + Partie 1	<ul style="list-style-type: none"> • Définir le débit minimal de contrôle ponctuel • Confirmer les débits minimaux de contrôle ponctuel pour les puits au roc 	<ul style="list-style-type: none"> • Calcul théorique du débit minimal de contrôle ponctuel (Annexe M)
3 : Résorption du panache dans l'aquifère granulaire + Parties 1 et 2	<ul style="list-style-type: none"> • Simuler l'effet hydraulique du choix technologique fixé dans les modélisations de la partie 3 du concept intégré 1 	<ul style="list-style-type: none"> • Semblables au concept intégré 1 (Annexe M)

Dans le modèle numérique d'écoulement local, l'effet hydraulique d'un puits de pompage a été simulé en aval de la zone source dans l'aquifère de roc fracturé. Le design de base d'un puits de contrôle au roc (Tableau 6.2) a été adapté au maillage du modèle. Les conditions de modélisation sont présentées au tableau 6.8.

Tableau 6.8 : Conditions de modélisation du contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé

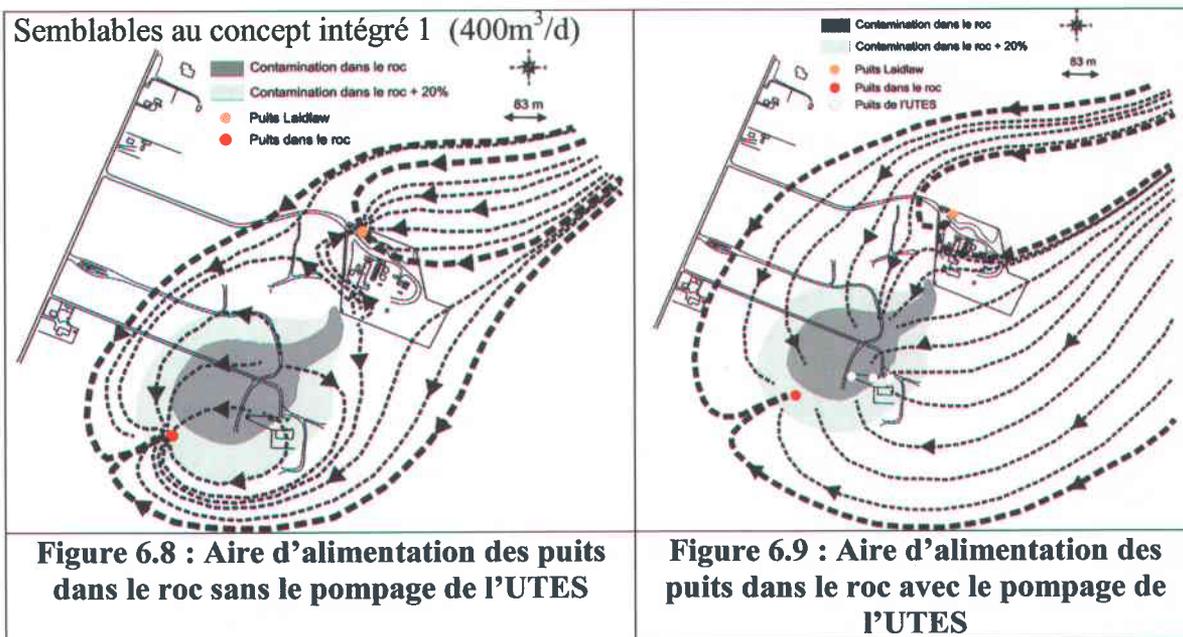
Nombre de puits	1
Débits simulés	300 à 1000 m ³ /d
Incrémentation du débit	100 m ³ /d
Localisation	Voir la figure 6.2
Longueur d'ouverture de captage	30 m
Rayon interne	0.25 m
Élévation (modèle)	-20 m

Les débits de pompage qui ont été simulés varient de 300 à 1000 m³/d. Les figures 6.6 et 6.7, réalisées par la méthode du traçage de particules (Tecplot 9.0), montrent l'effet hydraulique d'un puits dont le débit de pompage est de 300 et 400 m³/d respectivement. Un critère de succès a été défini pour évaluer l'efficacité du contrôle réalisé par le puits de pompage simulé dans l'aquifère de roc fracturé. Ce critère est basé sur l'aire d'alimentation du puits. Lorsque celle-ci contient les limites de la zone source dans l'aquifère de roc fracturé plus 20 % de la largeur de la zone comme facteur de sécurité, le contrôle est considéré s'effectuer avec succès.



Les simulations ont démontré qu'un puits dont le débit de pompage est supérieur à 400 m³/d pourrait contrôler la zone source et le panache d'eau contaminée dans l'aquifère de roc fracturé. La figure 6.7 montre l'aire d'alimentation d'un puits dont le débit de pompage est de 400 m³/d. Il est possible d'observer que la zone source est entièrement comprise dans l'aire de captage du puits. À l'inverse, les simulations représentant un puits dont le débit de pompage est inférieur à 300 m³/d montrent que le contrôle hydraulique réalisé est inadéquat. La figure 6.6 présente l'aire d'alimentation d'un puits dont le débit de pompage est de 300 m³/d. Il est possible d'observer que la partie nord-est de la zone source dans l'aquifère de roc fracturé n'est pas captée par l'aire d'alimentation du puits. Ces résultats de modélisation permettent de conclure que le débit minimal de contrôle du panache d'eau contaminée dans le roc est approximativement 400 m³/d.

D'autres simulations ont été réalisées pour mesurer l'impact de l'implantation de ce système sur les puits de l'UTES actuellement en opération. Les figures 6.8 et 6.9 (Traçage de particules) montrent les résultats de ces simulations sans et avec le pompage de l'UTES au roc. D'après ces résultats, la mise en place du système de contrôle au roc est complémentaire au pompage de l'UTES. Le pompage de l'UTES protège d'ailleurs le puits de l'incinérateur puisque les puits de l'UTES captent l'eau provenant de la fenêtre située au niveau de la limite de la propriété de l'incinérateur.



L'aquifère de roc fracturé possède une transmissivité relativement faible, soit 1.44×10^{-4} m²/s. Cette transmissivité limite le débit de pompage des puits implantés dans l'aquifère de roc fracturé. Un calcul de capacité a été réalisé afin de déterminer le nombre de puits nécessaire pour que le total des débits ponctuels soit de 400 m³/d (Annexe N). La capacité d'un puits implanté dans l'aquifère de roc fracturé serait entre 215 et 300 m³/d, selon les paramètres de calcul choisis. Considérant ces résultats, deux puits sont nécessaires pour atteindre un débit total de pompage de 400 m³/d avec des débits ponctuels de 200 m³/d pour chacun des puits. Un puits de recharge doit être également considéré pour permettre l'entretien du système de pompage tout en ne limitant pas le contrôle hydraulique effectué. Il faudra donc prévoir l'installation de trois puits de pompage pour le contrôle hydraulique du panache dans le roc.

La méthode de Javandel et Tsang (1986) pour établir la distance optimale entre des puits de captage a été utilisée pour évaluer la distance de séparation entre les puits de contrôle dans l'aquifère de roc fracturé (Annexe O). Considérant que deux puits sur trois effectuent le contrôle hydraulique, une distance de 38.5 m doit séparer les puits de contrôle pour limiter les interférences entre ceux-ci qui engendreraient de trop forts rabattements au niveau des puits.

En tout temps, deux des trois puits de contrôle doivent être en fonction. Les débits de contrôle ponctuels des puits en fonction sont de 200 m³/d. Les localisations envisagées pour les trois puits de contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé sont présentées au tableau 6.9.

Tableau 6.9 : Localisations envisagées pour les puits de contrôle dans l'aquifère de roc fracturé

Nom	UTM X	UTM Y
Puits 1	599090.58	5015268.61
Puits 2	599122.52	5015243.14
Puits 3	599149.68	5015219.83

Trois modélisations ont été réalisées afin de simuler l'effet hydraulique de la combinaison des puits de contrôle au roc. La longueur de crépine, la profondeur et le rayon interne des

puits de contrôle ont été présentés au tableau 6.8. Toutes les simulations ont démontré l'efficacité du système à capter le panache d'eau contaminée dans l'aquifère de roc fracturé. La figure 6.10 (Traçage de particules) résume les résultats des trois simulations effectuées. Cette solution au contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé constitue un choix technologique qui sera simulé dans le concept intégré 2, soit le contrôle hydraulique dans les aquifères granulaire et de roc fracturé. En effet, la même approche est utilisée pour le contrôle du panache au niveau du roc dans les deux concepts de solution intégrés.

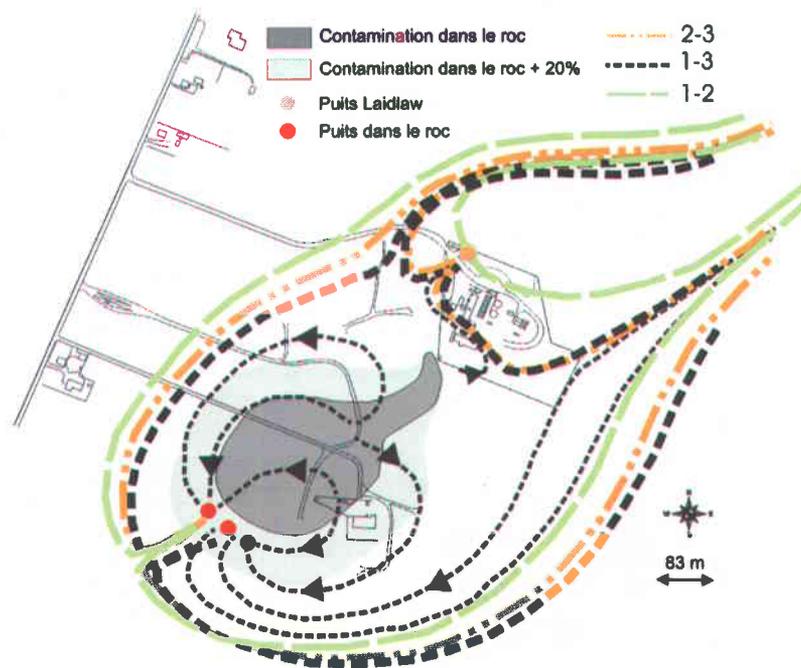


Figure 6.10 : Résumé des simulations de la solution choisie pour le contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé

(La figure montre l'aire d'alimentation obtenue en opérant les différentes paires de puits avec un débit de $200 \text{ m}^3/\text{d}$ pour chaque puits – paires de puits #1 et #2, #1 et #3, #2 et #3)

Conditions permanentes : modélisations dans l'aquifère granulaire (Confinement des zones sources)

L'objectif de ces modélisations est de simuler l'effet hydraulique du confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire combiné au contrôle hydraulique en aval de la zone source dans l'aquifère de roc fracturé.

Afin de représenter cette situation dans le modèle numérique d'écoulement local, la conductivité hydraulique des cellules situées à l'intérieur des limites de confinement a été modifiée afin qu'elles aient la propriété d'un aquitard. La valeur de conductivité hydraulique attribuée aux cellules dans l'enceinte confinée est de 1×10^{-10} m/s. Cette approche permet de simplifier grandement la représentation de l'effet hydraulique de la présence d'un secteur confiné sur l'écoulement dans l'aquifère granulaire.

Le confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire a été simulé avec les conditions optimales du contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé déterminées lors de l'étape précédente du programme de modélisation. Cette simulation a été réalisée en conditions permanentes. Le design des puits de contrôle dans l'aquifère de roc fracturé établi précédemment est toujours satisfaisant puisque la zone source dans le roc est capturée par l'aire d'alimentation des puits de captage. En fait, cette aire d'alimentation est similaire avec ou sans l'effet du confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire. La figure 6.10 représente donc également l'effet hydraulique au roc du contrôle hydraulique optimal dans cet aquifère combiné au confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire.

Conditions transitoires : modélisations pour la résorption du panache dans l'aquifère granulaire

Des modélisations ont été réalisées en conditions permanentes et en conditions transitoires pour représenter la résorption du panache dans l'aquifère granulaire situé entre l'enceinte confinée et l'UTES. Les objectifs de ces modélisations sont liés aux options proposées pour la résorption du panache dans l'aquifère granulaire :

1. Résorption du panache avec les puits de l'UTES et les débits de pompage actuels ;
2. Résorption du panache avec les puits de l'UTES et un débit total de pompage minimal pour contrôler la largeur du panache ;
3. La seconde option et des puits distribués dans le panache avec un débit de pompage ponctuel minimal pour contrôler la largeur du panache.

Résorption du panache avec les puits de l'UTES et les débits de pompage actuels

L'effet hydraulique des puits de pompage de l'UTES a été simulé (Chapitre 3). Le design des puits de l'UTES adapté au maillage du modèle d'écoulement local est présenté au tableau 6.10.

Tableau 6.10: Design des puits de l'UTES adapté au maillage du modèle
(Tous les paramètres sont en mètres)

Puits	UTM X	UTM Y	Sommet crépine	Base Crépine	Rayon interne
P-111	599331.188	5015273.500	20.92	11.57	0.25
P-112	599296.125	5015277.000	21.03	8.53	0.25
P-113	599254.063	5015281.000	20.83	8.63	0.25

Une simulation en transport de masse a été réalisée en conditions transitoires pour représenter la résorption du panache dans l'aquifère granulaire par les puits de l'UTES pompant aux débits actuels, combiné au confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire et au contrôle hydraulique optimal dans l'aquifère de roc fracturé. Les résultats de simulation sont présentés à différents temps pour suivre l'évolution du panache suite à la mise en place des nouvelles infrastructures de contrôle dans les deux aquifères (définie comme le temps zéro des simulations). Les figures 6.11 a, b, c, d et e, (Tecplot 9.0) montrent l'apparence du panache à résorber en plan dans l'unité de sable et gravier et en coupe transversale sur toute la hauteur des dépôts meubles à 6 mois, 1, 2, 5 et 10 ans respectivement.

Ces figures montrent que suite à la mise en place des infrastructures de contrôle dans les deux aquifères, le panache dans les sables et graviers se résorbe en grande majorité après 2 ans d'opération des puits de l'UTES à un débit total de pompage de 3880 m³/d. Les

contaminants contenus dans les argiles en surface et dans le till en profondeur sont plus difficiles à résorber.

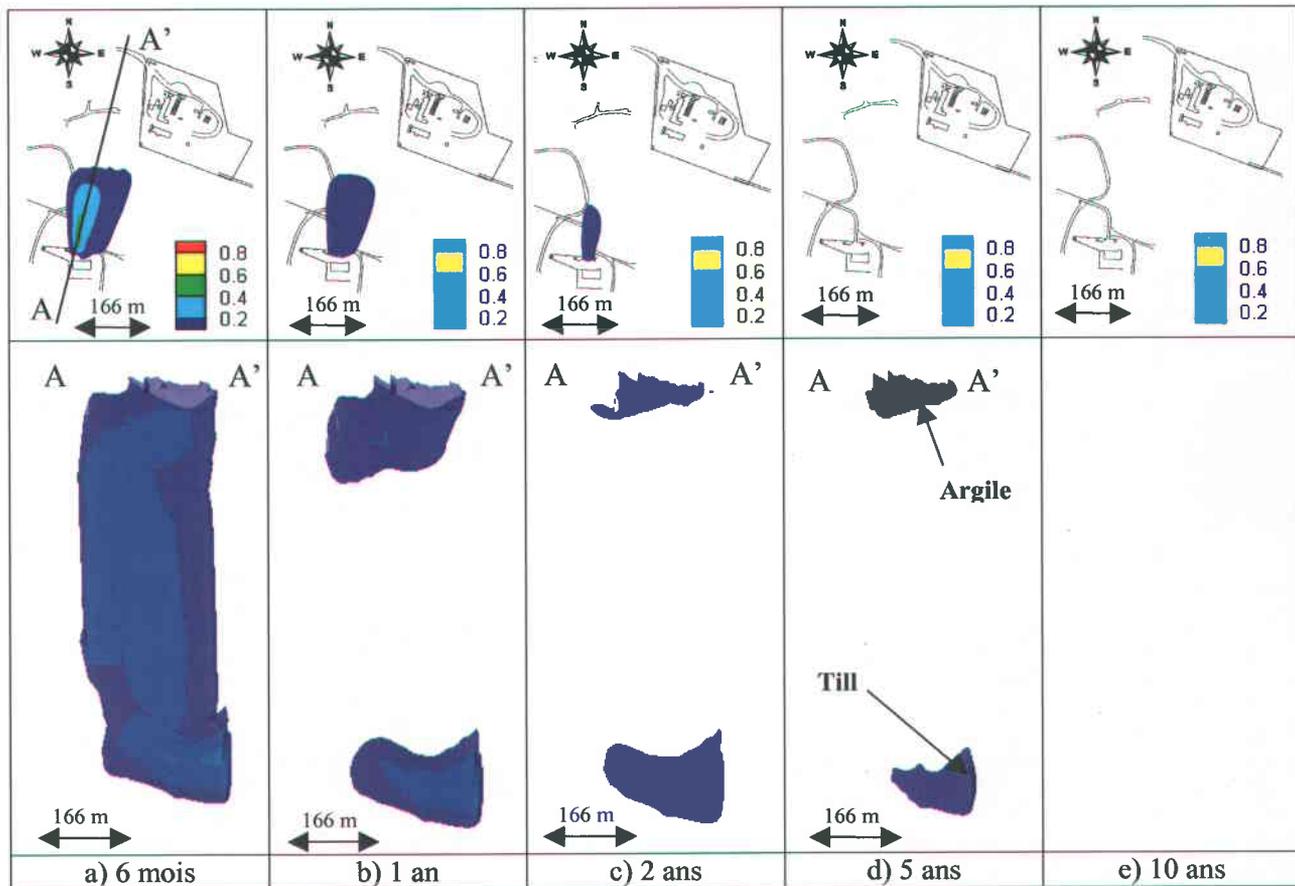


Figure 6.11: Évolution du panache à résorber en fonction du temps d'opération de l'UTES à un débit total de pompage de 3880 m³/d

Résorption du panache avec les puits de l'UTES et un débit total de pompage minimal pour contrôler la largeur du panache.

Des simulations ont été réalisées pour définir le débit total minimal pour capter le panache d'eau contaminée à résorber avec les puits de l'UTES. Le calcul théorique présenté à l'annexe M a permis d'estimer le débit total minimal à 1600 m³/d. Dans le modèle numérique d'écoulement local, l'effet hydraulique des puits de l'UTES à différents débits a été simulé. Ces simulations ont été réalisées en considérant l'effet hydraulique du confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire et le contrôle hydraulique optimal dans l'aquifère de roc fracturé. Le design des puits de l'UTES adapté au maillage du modèle a été présenté au tableau 6.10. Les conditions de modélisation de ce cas sont résumées au tableau 6.11.

Tableau 6.11 : Conditions de modélisation de la résorption du panache avec les puits de l'UTES à débit total minimal de contrôle

Nombre de puits en fonction	2
Débits totaux simulés	1200, 1500, 1800, 2400 m ³ /d

Les simulations ont été effectuées en conditions permanentes. Les figures 6.12 et 6.13 (Traçage de particules) montrent l'effet hydraulique des puits de l'UTES à débit moindre que celui appliqué présentement, soit à 1200 et 1500 m³/d. L'efficacité du captage du panache à résorber est évaluée d'après le critère de succès défini précédemment. Ainsi, le captage est considéré un succès dans le cas où l'aire d'alimentation des puits contient les limites du panache à résorber dans l'aquifère granulaire, plus 20 % de sa largeur comme facteur de sécurité.

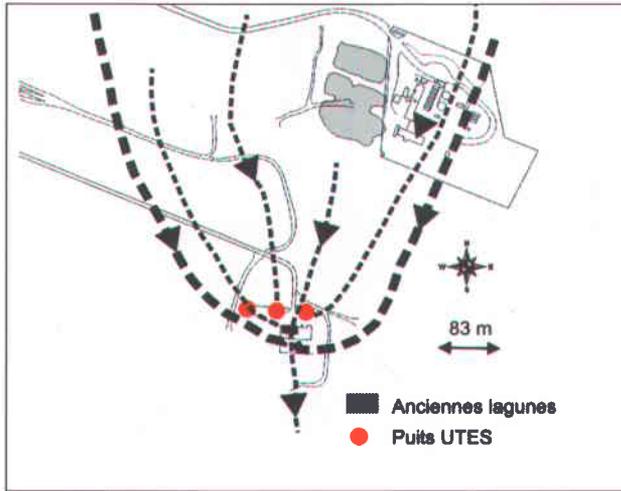


Figure 6.12 : Aire d'alimentation des puits de l'UTES pour un débit de 1200 m³/d

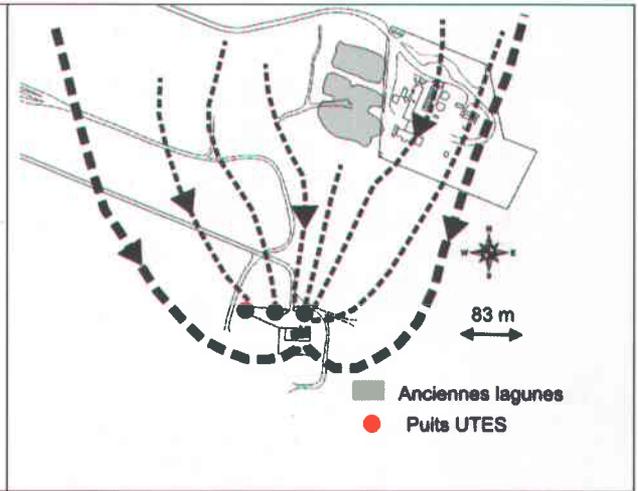
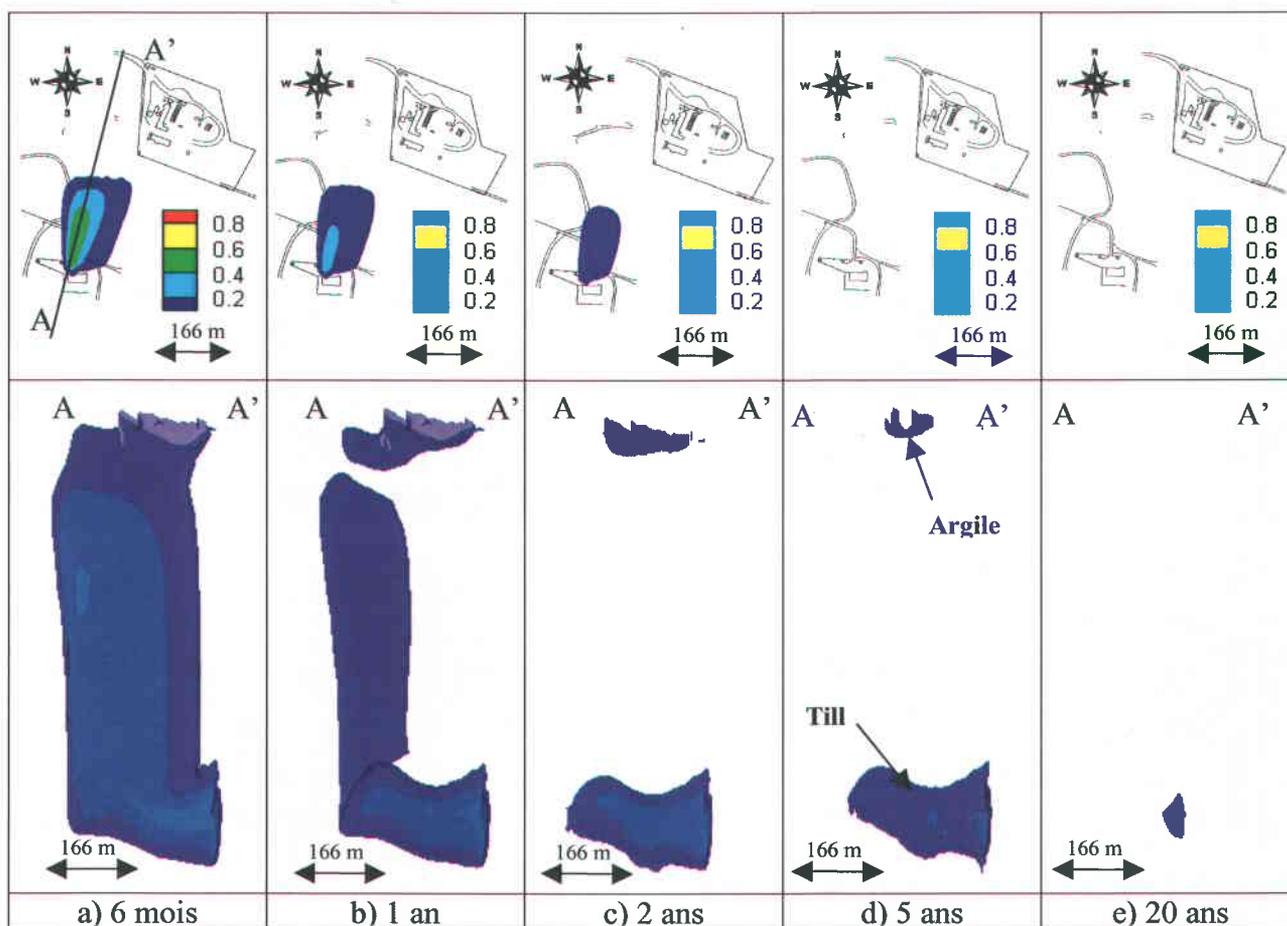


Figure 6.13 : Aire d'alimentation des puits de l'UTES pour un débit de 1500 m³/d

Lors des simulations, il a été démontré que les puits de l'UTES fonctionnant à plus de 1500 m³/d au total captent efficacement le panache à résorber comme le démontre la figure 6.13. En effet, l'aire d'alimentation des puits sur toute l'épaisseur des dépôts granulaires n'est totalement prise en compte qu'à partir d'un débit de 1500 m³/d. À l'inverse, si le débit total des puits de l'UTES est inférieur à 1200 m³/d, le panache à résorber n'est pas totalement capté par l'aire d'alimentation des puits comme il est montré à la figure 6.12. Ceci est mis en évidence par le tracé de la particule qui s'échappe en aval des puits de captage. D'après ces résultats, le débit total minimal de contrôle pour

les puits de l'UTES retenu pour la résorption du panache dans l'aquifère granulaire est de $1500 \text{ m}^3/\text{d}$.

Dans le modèle numérique d'écoulement local, les mesures de contrôle optimales des panaches d'eau contaminée dans les deux aquifères combinées à la résorption du panache effectuée par les puits de l'UTES à un débit total de $1500 \text{ m}^3/\text{d}$ ont été simulées en conditions transitoires (Transport de masse). Les résultats de simulation sont présentés à différents temps pour suivre l'évolution du panache suite à la mise en place des nouvelles infrastructures de contrôle dans les deux aquifères (définie comme le temps zéro des simulations). Les figures 6.14 a, b, c, d et e montrent l'apparence du panache à résorber en plan dans l'unité de sable et gravier et en coupe transversale sur toute la hauteur des dépôts meubles à 6 mois, 1, 2, 5 et 20 ans respectivement.



Figures 6.14 : Évolution du panache à résorber en fonction du temps d'opération de l'UTES à un débit total de pompage de $1500 \text{ m}^3/\text{d}$

Ces figures montrent que le panache dans les sables et graviers mettra environ 3 ans à se résorber si un débit total de 1500 m³/d est maintenu par les puits de l'UTES. Par contre, les contaminants contenus dans les argiles en surface et dans le till en profondeur sont plus difficiles à résorber.

Résorption du panache de l'aquifère granulaire par les puits de l'UTES à un débit minimal de contrôle combinés à des puits implantés dans le panache

Des modélisations ont été réalisées afin de déterminer le débit de pompage minimal de contrôle pour un puits qui serait implanté dans le panache à résorber dans l'aquifère granulaire. Un calcul théorique a permis d'estimer le débit minimal de contrôle du panache à résorber à 1030 m³/d (Annexe M).

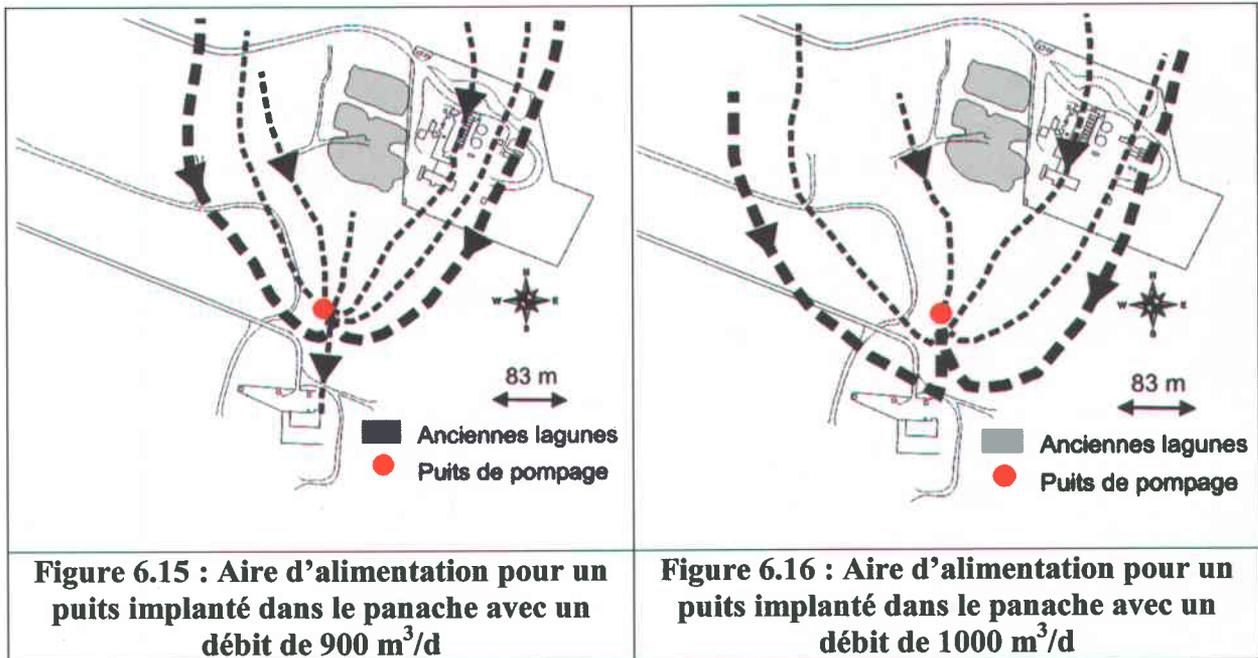
Le modèle numérique d'écoulement local a simulé l'effet hydraulique d'un puits implanté à mi-chemin entre l'enceinte confinée et l'UTES dans l'aquifère granulaire. Les modélisations ont été réalisées en considérant l'effet hydraulique du confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire et du contrôle hydraulique optimal dans l'aquifère de roc fracturé. Le design du puits de résorption a été présenté au tableau 6.3. Toutefois, le design a été adapté au maillage du modèle. Le design adapté et les conditions de modélisation sont présentés au tableau 6.12.

Tableau 6.12 : Conditions de modélisation d'un puits implanté dans le panache à résorber

Nombre de puits	1
Débits simulés	800 à 1000 m ³ /d
Incrémentation du débit	100 m ³ /d
Localisation x	599344.04
Localisation y	5015368.18
Longueur de crépine	4 m
Rayon interne	0.25 m
Élévation (modèle)	20

Les débits de pompage simulés varient de 800 à 1000 m³/d. Les figures 6.15 et 6.16 (Traçage de particules) montrent l'effet hydraulique d'un puits implanté dans le panache à résorber dont le débit de pompage est de 900 et 1000 m³/d respectivement. L'efficacité du

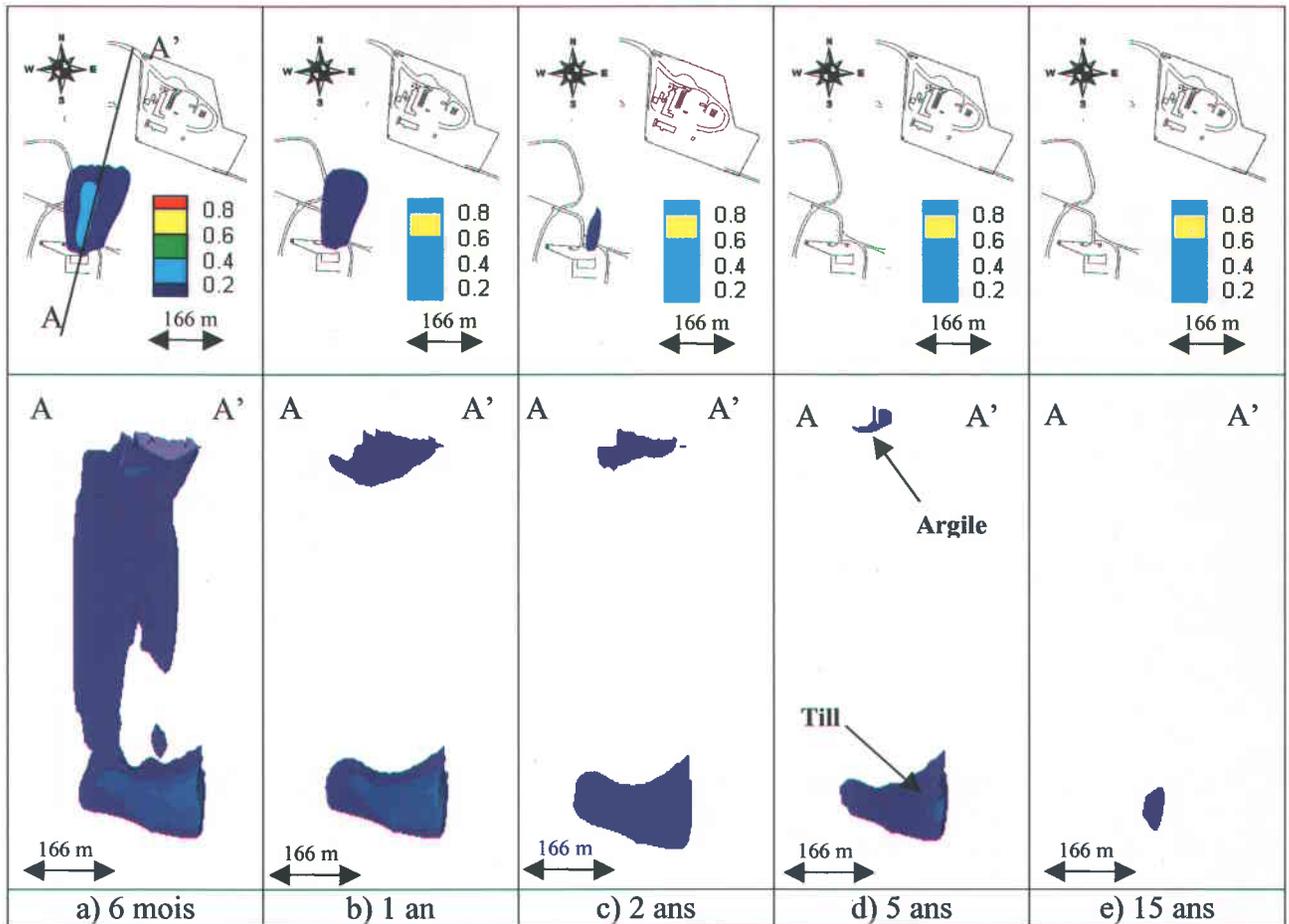
captage du panache à résorber est basée sur le critère de succès défini précédemment. Ainsi, le captage est considéré un succès lorsque l'aire d'alimentation des puits contient les limites du panache à résorber dans l'aquifère granulaire, plus 20 % de sa largeur comme facteur de sécurité.



Les simulations d'un puits implanté dans le panache à résorber dans l'aquifère granulaire ont montré qu'un débit de pompage inférieur à 900 m³/d est insuffisant pour créer une aire d'alimentation qui capte complètement le panache à résorber. Ceci est mis en évidence par le tracé de la particule qui s'échappe en aval des puits de captage à la figure 6.15. À l'inverse, un débit de pompage supérieur à 1000 m³/d est suffisant pour capter entièrement le panache à résorber, comme il est montré à la figure 6.16. D'après ces résultats, il est possible de déterminer un débit moyen de 1000 m³/d pour tous les puits qui pourraient être implantés dans le panache à résorber dans l'aquifère granulaire.

Le modèle numérique d'écoulement local a simulé en conditions transitoires (Transport de masse) les mesures de contrôle optimales des panaches d'eau contaminée dans les deux aquifères combinées à la résorption du panache effectuée par les puits de l'UTES à un débit total de 1500 m³/d et par un puits implanté dans le panache à résorber (1000 m³/d). Les résultats de simulation sont présentés à différents temps pour suivre l'évolution du panache suite à la mise en place des nouvelles infrastructures de contrôle

dans les deux aquifères (définie comme le temps zéro des simulations). Les figures 6.17 a, b, c, d et e montrent l'apparence du panache à résorber en plan dans l'unité de sable et gravier et en coupe transversale sur toute la hauteur des dépôts meubles à 6 mois, 1, 2, 5 et 15 ans respectivement.



Figures 6.17 : Évolution du panache à résorber en fonction du temps d'opération de l'UTES à un débit total de pompage de 1500 m³/d et d'un puits implanté dans le panache à résorber pompant à un débit de 1000 m³/d

Ces figures montrent que le panache dans les sables et graviers mettra plus de 2 ans à se résorber si un débit total de 1500 m³/d est maintenu par les puits de l'UTES et qu'un puits implanté dans le panache à résorber pompe à un débit de 1000 m³/d. De plus, les contaminants contenus dans les argiles en surface et dans le till en profondeur sont plus difficiles à se résorber. Le tableau 6.13 résume les options simulées pour la résorption du panache dans l'aquifère granulaire (débits totaux minimaux de captage et temps de résorption).

Tableau 6.13 : Résultats des simulations des options pour la résorption du panache dans l'aquifère granulaire

Option	Nombre de puits en fonction	Débit total	Temps de résorption minimum
Résorption avec les puits de l'UTES au débit actuel	2	3880 m ³ /d	2 ans
Résorption avec les puits de l'UTES à un débit total minimal de contrôle du panache	2	1500 m ³ /d	3 ans
Résorption avec les puits de l'UTES et un puits implanté dans le panache à des débits minimaux de contrôle ponctuel.	3	2500 m ³ /d	2 ans

L'option simulée de la résorption du panache avec les puits de l'UTES à un débit minimal de contrôle présente un temps de résorption minimum d'environ 3 ans. Ce temps équivaut à la durée de vie limite prévue de l'UTES estimée à 3 ans (M. Séguin, comm. pers.). Cette option ne peut donc pas être retenue. Les autres options de résorption du panache dans l'aquifère granulaire présentent des temps de résorption minimum similaires de 2 ans. Dans le cas où les effluents provenant du captage du panache à résorber seraient traités à l'UTES, seule l'option de résorption avec les puits de l'UTES aux débits actuels présente un intérêt. D'abord, les temps d'opération nécessaires à la résorption du panache sont semblables pour les deux options. De ce fait, il n'est pas intéressant de payer un coût supplémentaire pour la mise en place d'un puits d'extraction dans le panache pour un même temps de résorption. Ensuite, l'UTES ne peut traiter un volume d'eau de plus de 3880 m³/d avec une concentration moyenne totale de contaminants dissous surpassant 800 ppb (M. Séguin, comm. pers.). En envisageant de diminuer le débit total de captage des puits de l'UTES de 3880 à 1500 m³/d et d'ajouter un puits dans le panache à résorber (1000 m³/d), le captage du panache à résorber serait plus efficace et il s'y produirait possiblement moins de dilution. De ce fait, les concentrations en contaminants dissous présentes dans l'eau récupérée par ce système de captage pourraient dépasser la capacité actuelle du traitement à l'UTES qui est de 800 ppb (Annexe P).

La nouvelle usine envisagée pour le traitement des effluents provenant du roc et du pompage interne dans la zone confinée aurait en conditions permanentes environ 400 m³/d à traiter. Dans cette optique, il est presque impossible de considérer que les effluents provenant du captage du panache à résorber dans l'aquifère granulaire pourraient être traités à la nouvelle usine, car cela exigerait une surcapacité minimale de 625% (2500/400 m³/d).

En conséquence, les simulations des puits supplémentaires implantés dans le panache à résorber combinés au pompage des puits de l'UTES à 1500 m³/d qui étaient envisagées ne sont plus intéressantes à réaliser. Même si l'ajout de puits supplémentaires dans le panache pourrait diminuer le temps de résorption, chaque puits ajouté impliquerait un coût d'installation additionnel et un débit de 1000 m³/d d'eau contaminée supplémentaire à traiter.

Suite à ces résultats, l'option qui présente le plus d'intérêt en terme économique et technique pour la résorption du panache dans l'aquifère granulaire est le captage par les puits de l'UTES au débit total actuel de 3880 m³/d.

Concept intégré 1 et choix technologiques retenus

Suite aux résultats des modélisations numériques présentés précédemment, le tableau 6.14 résume les choix technologiques optimaux retenus pour réaliser un design détaillé des infrastructures de contrôle et de traitement du concept intégré 1.

Tableau 6.14 : Résumé des choix technologiques optimaux du concept intégré 1

Concept 1	Choix technologiques du concept intégré 1 simulés
Conditions transitoires	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé : 2 puits sur 3 en fonction à un débit total de <u>400 m³/d</u> • Confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire • Résorption du panache dans l'aquifère granulaire avec les puits de l'UTES : 2 puits sur 3 en fonction à un débit total de <u>3880 m³/d</u>
Conditions permanentes	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé : 2 puits sur 3 en fonction à un débit total de <u>400 m³/d</u> • Confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire

Sur la base de ces résultats, un calcul a été réalisé afin d'évaluer la concentration moyenne totale en contaminants qui serait présente dans les effluents provenant du contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé et du pompage interne dans la zone confinée de l'aquifère granulaire. La valeur maximale de celle-ci pourrait être de 427 ppm (Annexe Q). Tel que mentionné, la concentration totale admise à l'UTES est de 0.8 ppm. De ce fait, il est presque impossible d'envisager que le traitement des effluents soit effectué à l'usine de traitement actuelle, puisque son design est basé sur une concentration totale trop faible. C'est pourquoi il est recommandé de construire une nouvelle usine de traitement et de ne pas rénover les infrastructures en place.

6.3.2.2 Modélisations détaillées du concept intégré 2 et résultats

Conditions permanentes : modélisations dans l'aquifère de roc fracturé (Contrôle hydraulique)

Tel que mentionné précédemment, les conditions optimales du contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé sont semblables pour les concepts intégrés 1 et 2. Conséquemment, les simulations réalisées à la section 6.3.2.1 ont permis de définir les éléments du design optimal des puits de contrôle dans l'aquifère de roc fracturé pour le concept intégré 2 :

- Deux puits de contrôle sur trois en fonction;
- Débit ponctuel de 200 m³/d par puits en fonction;
- Localisations des puits telles qu'indiquées au tableau 6.9.

Conditions permanentes : modélisations dans l'aquifère granulaire (Contrôle hydraulique)

Des modélisations ont été réalisées dans l'aquifère granulaire afin de déterminer le débit minimal pour contrôler les zones sources dans l'aquifère granulaire. Un calcul théorique a permis d'estimer le débit minimal de contrôle à 1010 m³/d (Annexe M). Dans le modèle d'écoulement, l'effet hydraulique d'un puits de pompage a été simulé en aval des anciennes lagunes dans l'aquifère granulaire selon les conditions présentées au tableau 6.15. Le design de base d'un puits de contrôle dans l'aquifère granulaire (Tableau 6.5) a été adapté au maillage du modèle.

Tableau 6.15 : Conditions de modélisation du contrôle hydraulique dans l'aquifère granulaire

Nombre de puits	1 sur 2 en fonction
Localisation	Voir figure 6.3
Débits totaux simulés	700 à 1000 m ³ /d
Incrémentation du débit	100 m ³ /d
Longueur de crépine	4 m
Rayon interne	0.25 m
Élévation (modèle)	20

Les débits de pompage simulés varient de 700 à 1000 m³/d. Les simulations ont été réalisées en conditions permanentes et l'effet du contrôle hydraulique optimisé dans l'aquifère de roc fracturé a été considéré. Les figures 6.18 et 6.19 (Traçage de particules) montrent respectivement l'effet hydraulique d'un puits avec un débit de pompage de 900 et de 1000 m³/d. L'efficacité du contrôle du panache dans l'aquifère granulaire est basée sur le critère de succès défini à la section 6.3.2.1. Le contrôle est considéré un succès dans le cas où l'aire d'alimentation du puits contiendrait les limites des zones sources dans l'aquifère granulaire, plus 20 % de ces limites comme facteur de sécurité.

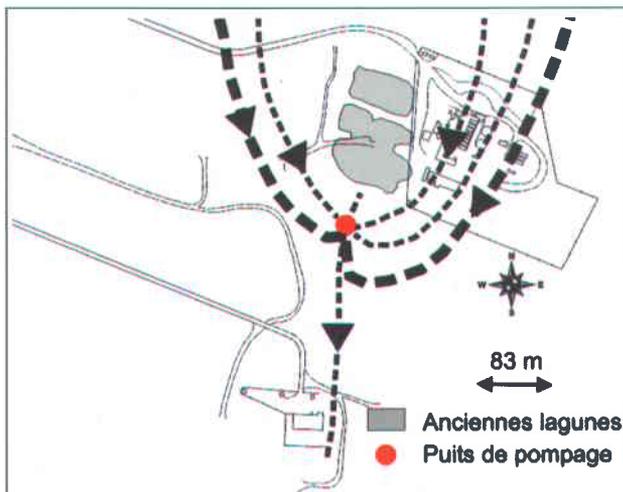


Figure 6.18 : Aire d'alimentation pour un puits implanté en aval des lagunes pour un débit de 900 m³/d

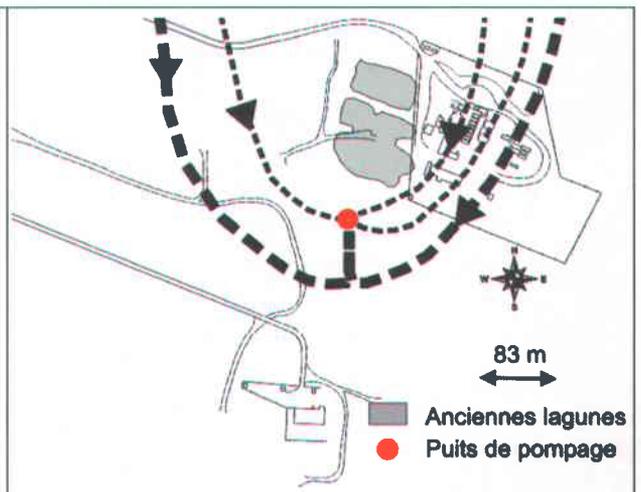


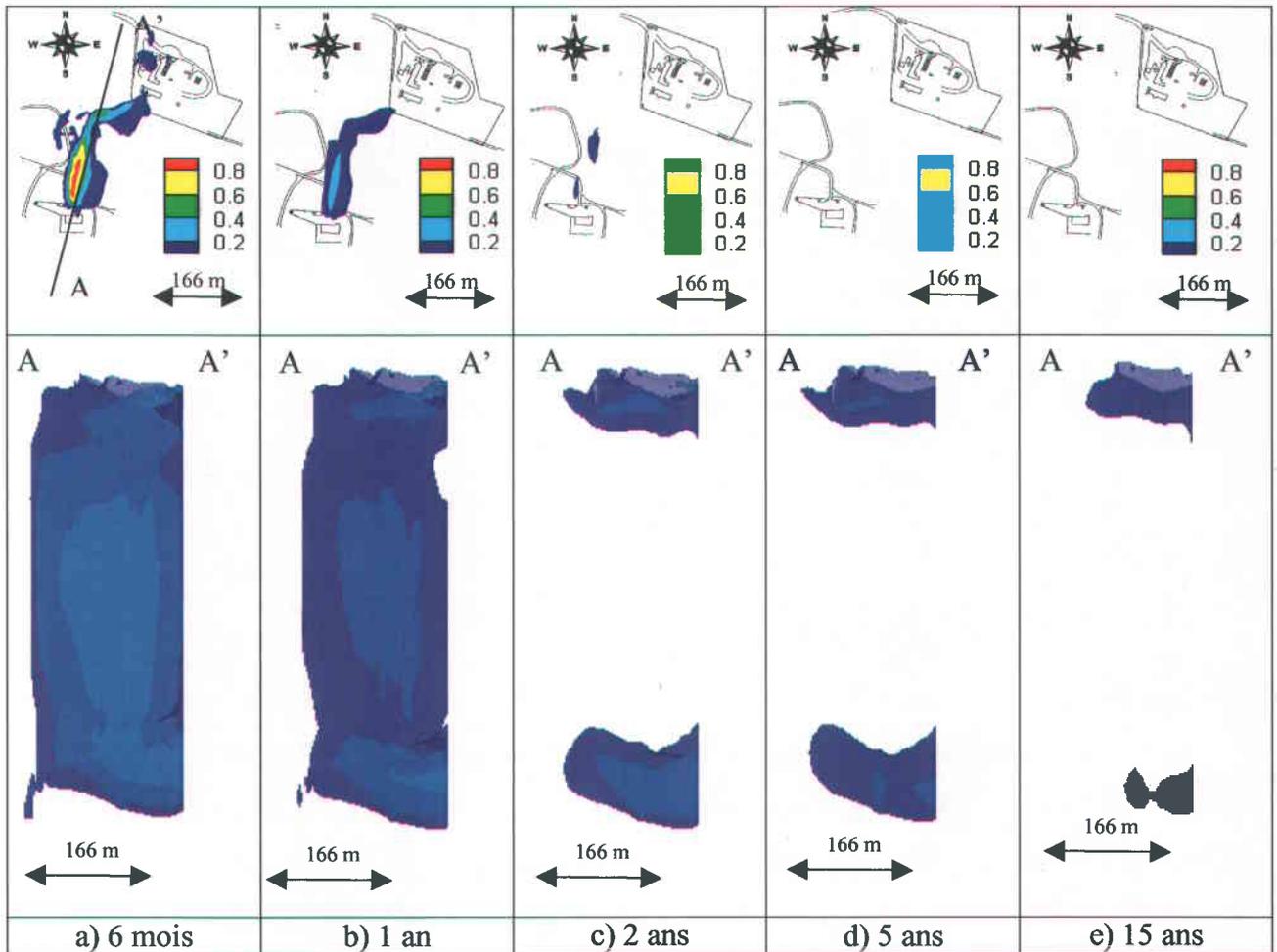
Figure 6.19 : Aire d'alimentation pour un puits implanté en aval des lagunes pour un débit de 1000 m³/d

Les simulations d'un puits implanté en aval des zones sources dans l'aquifère granulaire ont montré qu'un débit de pompage inférieur à $900 \text{ m}^3/\text{d}$ est insuffisant pour créer une aire d'alimentation qui capte complètement les limites des zones sources (Figure 6.18). Ceci est mis en évidence par le tracé de la particule qui s'échappe en aval des puits de captage. À l'inverse, un débit de pompage supérieur à $1000 \text{ m}^3/\text{d}$ est suffisant pour capter entièrement les zones sources (Figure 6.19). Il est ainsi possible de déterminer le débit total minimal pour contrôler les zones sources et le panache d'eau contaminée dans l'aquifère granulaire, soit approximativement $1000 \text{ m}^3/\text{d}$.

Conditions transitoires : résorption du panache dans l'aquifère granulaire

Tel que mentionné, les conditions optimales de résorption du panache dans l'aquifère granulaire sont similaires pour les concepts intégrés 1 et 2. Ainsi, les simulations réalisées à la section 6.3.2.1 ont permis de sélectionner l'option de résorption du panache dans l'aquifère granulaire la plus efficace et la moins coûteuse, soit avec les puits de l'UTES au débit actuel de $3880 \text{ m}^3/\text{d}$.

Le modèle d'écoulement a simulé en conditions transitoires (Transport de masse) le contrôle hydraulique optimal dans les deux aquifères combiné à la résorption du panache effectuée par les puits de l'UTES à un débit total de $3880 \text{ m}^3/\text{d}$. Les résultats sont présentés à différents temps pour suivre l'évolution du panache suite à la mise en place des nouvelles infrastructures de contrôle dans les deux aquifères (définie comme le temps zéro des simulations). Les figures 6.20 a, b, c, d et e montrent l'apparence du panache à résorber en plan dans l'unité de sable et gravier et en coupe transversale sur toute la hauteur des dépôts meubles à 6 mois, 1, 2, 5 et 15 ans respectivement. Ces figures montrent que le panache dans les sables et graviers mettra plus de 2 ans à se résorber si un débit total de $3880 \text{ m}^3/\text{d}$ est maintenu par les puits de l'UTES. Les contaminants contenus dans les argiles en surface et dans le till en profondeur sont plus difficiles à se résorber.



Figures 6.20 : Simulation des conditions liées au contrôle hydraulique dans les deux aquifères ainsi que la résorption du panache par l'UTES en fonction du temps

Concept intégré 2 et choix technologiques retenus

Suite aux modélisations présentées, le tableau 6.16 résume les choix technologiques optimaux retenus pour réaliser un design détaillé des infrastructures de contrôle et de traitement du concept intégré 2. Sur cette base, la concentration moyenne totale en contaminants qui serait présente dans les effluents provenant du contrôle hydraulique dans les aquifères granulaire et de roc fracturé a été estimée à 251 ppm (Annexe R). Tel que mentionné, la concentration totale admise à l'UTES est de 0.8 ppm. Ainsi, il est presque impossible d'envisager que le traitement des effluents soit effectué à l'usine de traitement actuelle, puisque son design est basé sur une concentration totale trop faible.

C'est pourquoi il est recommandé également dans ce concept de construire une nouvelle usine de traitement et de ne pas rénover les infrastructures en place.

Tableau 6.16 : Résumé des choix technologiques optimaux du concept intégré 2

Concept 2	Choix technologiques du concept intégré 2 simulés
Conditions transitoires	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé : 2 puits sur 3 en fonction à un débit total de <u>400 m³/d</u> • Contrôle hydraulique dans l'aquifère granulaire : 1 puits sur 2 en fonction à un débit de <u>1000 m³/d</u> • Résorption du panache dans l'aquifère granulaire avec les puits de l'UTES : 2 puits sur 3 en fonction à un débit total de <u>3880 m³/d</u>
Conditions permanentes	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé : 2 puits sur 3 en fonction à un débit total de <u>400 m³/d</u> • Contrôle hydraulique dans l'aquifère granulaire : 1 puits sur 2 en fonction à un débit de <u>1000 m³/d</u>

6.3.2.3 Modélisation de la ré-injection

Dans la description détaillée des concepts de solution intégrés 1 et 2, il a été discuté de la possibilité d'effectuer de la ré-injection dans l'aquifère granulaire de l'eau traitée *ex situ* par ventilation. Cette option constitue une alternative au rejet actuel de l'eau traitée dans les eaux de surface qui exige l'enlèvement du fer dans l'eau souterraine pompée dans les aquifères. Dans les deux concepts de solution intégrés, une seule localisation est possible pour la ré-injection, soit en aval de l'UTES actuelle. Il est essentiel que la ré-injection dans l'aquifère granulaire ne compromette pas l'efficacité du contrôle hydraulique réalisé dans l'aquifère granulaire. À la figure 6.21, une localisation possible du puits de ré-injection est proposée. En comparant cette figure avec la figure 6.19 présentant l'aire d'alimentation du puits de contrôle dans l'aquifère granulaire à 1000 m³/j, il est démontré que la position du puits de ré-injection en aval de l'UTES ne compromet pas l'efficacité du contrôle hydraulique.

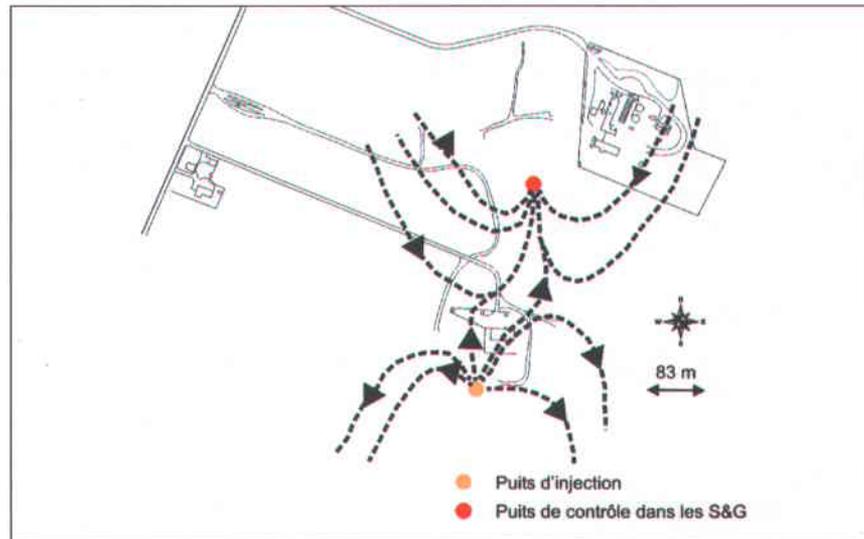


Figure 6.21 : Localisation possible d'un puits de ré-injection et effet hydraulique dans l'aquifère granulaire

La position de ré-injection en amont des zones sources dans l'aquifère granulaire n'a pas été retenue, car elle compromet l'efficacité des deux concepts de solution intégrés. Dans le cas du concept de confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire combiné au contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé, la ré-injection de l'eau en amont des installations de confinement va possiblement créer des surpressions qui ne sont pas souhaitables. Dans le cas du concept de contrôle hydraulique dans les aquifères granulaire et de roc fracturé, le volume de l'eau traitée ré-injectée ($1400 \text{ m}^3/\text{j}$) par rapport au volume de l'eau captée par le contrôle hydraulique dans l'aquifère granulaire ($1000 \text{ m}^3/\text{j}$) n'est pas équivalent. De ce fait, la ré-injection en amont des zones sources peut compromettre l'efficacité du contrôle hydraulique dans l'aquifère granulaire.

6.4 Infrastructures et coûts des concepts de solution intégrés

La description détaillée des concepts intégrés 1 et 2 (Section 6.2) et les modélisations (Section 6.3) ont permis de définir les éléments de design des infrastructures de contrôle, de traitement et de surveillance qui constituent ces concepts.

La présente section documente l'évaluation des coûts globaux des concepts, ce qui permettra de les comparer du point de vue économique. Au chapitre 5, portant sur l'élaboration préliminaire de concepts de solution, la notion de coûts reliés aux

infrastructures avait été introduite mais de façon générale. Il a été mentionné, entre autre, que le désavantage principal du confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire est que les infrastructures impliquées présentent un fort coût en capital. De même, le coût en capital modéré relié aux infrastructures de contrôle hydraulique avait été mentionné. L'évaluation des coûts constitue donc un autre élément nécessaire à la prise de décision concernant les infrastructures à sélectionner pour le contrôle des panaches d'eau contaminée dans la région des anciennes lagunes de Ville-Mercier.

6.4.1 Méthode

Les coûts reliés aux infrastructures des concepts intégrés 1 et 2 ont été évalués à l'aide du logiciel RACER_2004 «*Parametric Cost-Estimating Software for Remediation and Restoration Projects*» (RACER, 2004). Ce logiciel est commercialisé par Earth Tech. Inc. et ses accréditations sont présentées dans le CD annexé au mémoire (annexe/dossier RACER_pdf/Info). Cet outil d'évaluation des coûts est recommandé par l'U.S. EPA, l'agence de protection de l'environnement américaine, et il a été produit pour l'U.S. EPA et d'autres agences gouvernementales américaines (version antérieure documentée dans le site Internet de l'U.S. EPA : www.epa.gov/swerust1/tnkracr1.htm). Dans RACER_2004, les évaluations de coûts réalisées par le logiciel sont basées sur des solutions génériques d'ingénierie dérivées de l'historique des projets d'ingénierie, de données industrielles, de laboratoires gouvernementaux, d'agences de construction, de vendeurs, d'analyses d'ingénierie, etc. Un résumé des informations de base du logiciel est également disponible sur le CD annexé (annexe/dossier RACER_pdf/Info).

Avec RACER_2004, l'évaluation des coûts des infrastructures s'effectue par le biais de formulaires où les éléments de design sont enregistrés et traités. Le logiciel évalue les coûts en dollars canadiens et prend en considération les coûts locaux de matériel, d'équipement et de main-d'œuvre. Différentes analyses de coûts sont disponibles et elles sont présentées subséquemment :

- Coûts directs actualisés ;
- Coûts avec marge de profits; et
- Coûts avec amortissements.

Dans le cas présent, les évaluations de coûts ont été réalisées avec des coûts directs actualisés. Ces coûts ne prennent pas en considération la marge normalement prélevée par une firme d'ingénierie ou un entrepreneur pour la construction des infrastructures ou leur opération. Les coûts réels sont normalement majorés de 10% à 15% pour compenser les frais d'administration et fournir une marge de profit pour les firmes de génie conseil.

Pour chacun des concepts de solution, les coûts en capital et les coûts d'opération et de maintenance sur 20 ans ont été évalués pour les infrastructures suivantes :

- Coûts des infrastructures de contrôle ;
- Coûts des infrastructures de traitement ; et
- Coûts des infrastructures de surveillance.

6.4.2 Évaluation des coûts des infrastructures du concept intégré 1

La description détaillée et les modélisations du concept de confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire combiné au contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé ont permis de définir les éléments de design des infrastructures de contrôle, de traitement et de surveillance. Ces éléments de design ont été enregistrés et traités dans les formulaires du logiciel RACER_2004 afin de déterminer leurs coûts en capital ainsi que leurs coûts d'opération et de maintenance sur 20 ans. Le tableau présenté à l'annexe S montre les éléments de design des technologies et des infrastructures composant le concept intégré 1 qui ont été enregistrés dans les formulaires du logiciel. Les coûts résultants de l'évaluation de RACER_2004 sont présentés au tableau 6.17. Ce tableau des coûts des infrastructures est subdivisé en 7 parties :

- Contrôle dans l'aquifère granulaire;
- Contrôle dans l'aquifère de roc fracturé;
- Infrastructures de traitement des effluents provenant du contrôle au roc;
- Infrastructures de traitement des effluents provenant du pompage interne dans la zone confinée;
- Disposition des effluents provenant du pompage interne dans l'enceinte confinée;
- Infrastructures de surveillance; et
- Résorption du panache dans l'aquifère granulaire.

Le concept intégré 1 présente deux options de traitement des effluents provenant du pompage interne dans l'enceinte confinée. Le temps de réalisation de ces options a été établi à 2 ans pour le calcul des coûts. Toutefois, ces opérations pourraient être étalées sur une plus longue période. L'option 1 est la disposition des huiles et de l'eau fortement contaminée hors-site. Dans l'option 2, l'eau fortement contaminée est combinée aux effluents provenant du contrôle hydraulique pour leur traitement commun. Les coûts de ces options de traitement sont indiqués au tableau 6.17. Pour l'option 1, les coûts de traitement sont surlignés en vert et ils sont surlignés en jaune pour l'option 2. Le coût total du concept varie selon l'option de traitement considérée, celui-ci est également surligné par la couleur correspondant à l'option de traitement choisie.

L'évaluation des coûts du concept intégré 1 au tableau 6.17 montre que plusieurs choix d'infrastructures et de traitement présentent un coût total élevé :

- Infrastructures du confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire : 6.6 M\$
- Disposition hors-site de l'eau fortement contaminée (54.7 M\$) ou des huiles (3.6 M\$)
- Surveillance : 5.0 M\$

Dans les deux options de traitement proposées dans le concept intégré 1, la disposition des effluents hors-site pourrait être remplacée par la disposition à l'incinérateur. Si cette alternative était possible, le coût total du concept pourrait être diminué significativement.

À la section 6.2.1.2, il a été discuté de la possibilité de mettre en place une seconde usine pour traiter indépendamment l'eau fortement contaminée provenant du pompage interne dans la zone confinée de l'eau provenant du pompage dans l'aquifère de roc fracturé (Concept intégré 1-option 2). Afin d'évaluer les coûts des infrastructures de traitement de cette usine, les éléments de design ont été identifiés et enregistrés dans les formulaires du logiciel RACER_2004 (Annexe T). Le coût minimal en capital évalué pour cette usine s'élève à 85 k\$. En ajoutant le coût en capital de l'usine de traitement des effluents provenant du pompage dans l'aquifère de roc fracturé, le coût total en capital des

infrastructures de traitement est de 325 k\$. Dans l'optique où les effluents provenant du pompage interne de la zone confinée et du pompage dans l'aquifère de roc fracturé seraient combinés pour le traitement, le coût en capital des infrastructures de traitement serait de 235 k\$. Ainsi, la construction d'une usine pour traiter indépendamment l'eau provenant du pompage interne dans la zone confinée n'est pas économiquement viable.

Les évaluations de coûts réalisées par RACER_2004 pour le concept intégré 1, options 1 et 2 sont disponibles en fichiers PDF dans le CD annexé au mémoire (annexe/dossier RACER_pdf/concept1_option1 ou concept1_option2).

Tableau 6.17 : Coûts du concept intégré 1

Solution	Infrastructure	Coût Capital	Coût O & M (20 ans)	Coût Total/Infrastructure
Contrôle du panache dans l'aquifère granulaire : Confinement des zones sources	Murs de confinement (11)	2.607 M\$	0.072 M\$	2.679 M\$
	Recouvrement imperméable (1)	3.111 M\$	0.165 M\$	3.276 M\$
	Puits de pompage interne (5)	0.279 M\$	0.196 M\$	0.475 M\$
	Séparateur de phases (1)	0.043 M\$	0.143 M\$	0.186 M\$
	Puits de pompage (3)	0.240 M\$	0.119 M\$	0.359 M\$
Contrôle du panache dans l'aquifère de roc fracturé : Contrôle hydraulique				
Résorption du panache dans l'aquifère granulaire : Réalisée par les puits de l'UTES sur 2 ans	Puits de pompage de l'UTES	N/A	0.600 M\$ (2 ans)	0.600 M\$
Traitement des effluents : <u>Option 1</u> Traitement des effluents provenant du pompage dans l'aquifère de roc fracturé Disposition des huiles et de l'eau fortement contaminée provenant du pompage dans la zone confinée de l'aquifère granulaire	Tour de ventilation (1)	0.100 M\$	0.306 M\$	0.406 M\$
	Oxydation catalytique (1)	0.124 M\$	0.802 M\$	0.926 M\$
	Disposition des huiles		3.637 M\$ pour 2 ans	
	Disposition de l'eau		54.674 M\$ pour 2 ans	
Traitement des effluents : <u>Option 2</u> Traitement de l'eau provenant du pompage dans l'aquifère de roc fracturé et du pompage interne dans la zone confinée de l'aquifère granulaire Disposition des huiles provenant du pompage interne dans l'aquifère granulaire	Tour de ventilation (1)	0.098 M\$	0.315 M\$	0.413 M\$
	Oxydation catalytique (1)	0.135 M\$	0.802 M\$	0.937 M\$
	Disposition des huiles		3.637 M\$ pour 2 ans	
Surveillance	Puits d'observation (66)	1.932 M\$	3.063 M\$ (comportant l'échantillonnage)	4.995 M\$
Concept 1+ option de traitement 1	Capital total 8.436 M\$	O&M total 63.777 M\$	Coût total 72.213 M\$	
Concept 1 + option de traitement 2	Capital total 8.445 M\$	O&M total 9.112 M\$	Coût total 17.557 M\$	

6.4.3 Évaluation des coûts des infrastructures du concept intégré 2

La description des éléments de design des infrastructures du concept de contrôle hydraulique dans les aquifères granulaire et de roc fracturé a été enregistrée dans les formulaires du logiciel RACER_2004 (Annexe U). Les coûts des infrastructures qui ont été obtenus par l'évaluation du logiciel sont présentés au tableau 6.18 qui est subdivisé en quatre parties :

- Infrastructures de contrôle ;
- Infrastructures de traitement des effluents provenant du contrôle hydraulique dans les deux aquifères;
- Infrastructures de surveillance ; et
- Résorption du panache dans l'aquifère granulaire.

L'évaluation des coûts du concept intégré 2 montrée au tableau 6.18 indique que plusieurs choix d'infrastructures et de traitement présentent un coût total élevé. Les éléments coûteux sont les suivants :

- Traitement des effluents : 2.988 M\$
- Surveillance : 4.052 M\$

Les évaluations de coûts réalisées par RACER_2004 pour le concept intégré 2 sont disponibles en fichiers PDF dans le CD annexé au mémoire (annexe/dossier RACER_pdf/concept2).

6.4.4 Coûts de l'usine de traitement d'eau souterraine actuelle

L'usine de pompage et traitement actuellement en opération à Ville-Mercier, l'UTES, a été mise en fonction en 1984. Les coûts totaux en capital s'élevaient à l'époque à plus de 3 million de dollars (3 M\$). Dans les premières années de l'usine, le secteur privé s'occupait des opérations et de la surveillance pour un coût annuel de l'ordre de 0.45 M\$. Actuellement, le secteur public effectue le maintien et la surveillance des infrastructures de l'usine pour un coût annuel de l'ordre de 0.3 M\$. En 2002, des travaux de réfection ont été réalisés sur certaines infrastructures de l'UTES dans le but d'allonger sa durée de vie

de cinq années (M. Séguin, comm. pers.). Le tableau 6.19 présente les différents coûts associés à l'UTES. Ces coûts sont donnés à titre de comparaison avec les coûts des concepts de solution intégrés qui sont proposés pour remplacer l'UTES.

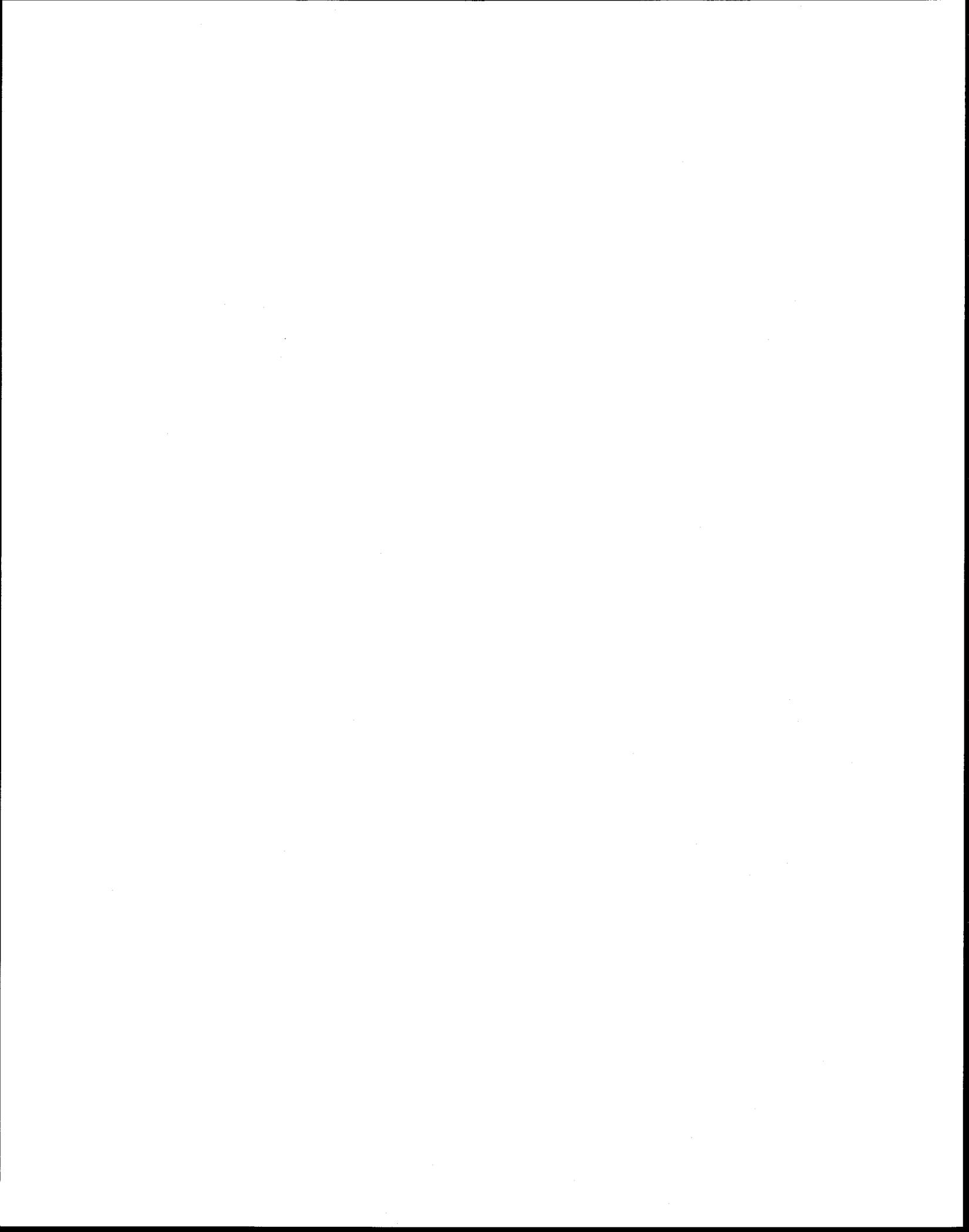
Tel que mentionné précédemment, l'UTES dans son état actuel ne peut être opérée pour traiter les effluents provenant du concept intégré 1 ou 2 en conditions permanentes. Son design de base ne permet pas le traitement efficace des composés volatils et semi-volatils présents en fortes concentrations dans les effluents produits. Par contre, il est recommandé qu'elle soit opérée pendant 2 ans pour résorber le panache qui va subsister suite à la mise en place des nouvelles infrastructures de contrôle dans l'aquifère granulaire (Voir sections 6.2 et 6.3).

Tableau 6.18 : Coûts du concept intégré 2

Solution	Infrastructure	Coût Capital	Coût O & M (20 ans)	Coût Total/Infrastructure	Coût Sous-total/Solution
Contrôle du panache dans l'aquifère granulaire : Contrôle hydraulique	Puits de pompage (2)	0.098 M\$	0.205 M\$	0.303 M\$	0.303 M\$
Contrôle du panache dans l'aquifère de roc fracturé : Contrôle hydraulique	Puits de pompage (3)	0.240 M\$	0.119 M\$	0.359 M\$	0.359 M\$
Résorption du panache dans l'aquifère granulaire : Réalisée par les puits de l'UTES sur 2 ans	Puits de pompage de l'UTES	N/A	0.600 M\$ (2 ans)	0.600 M\$	0.600 M\$
Traitement des effluents provenant du contrôle hydraulique dans l'aquifère granulaire et de roc fracturé	Tour de ventilation (1)	0.146 M\$	0.531 M\$	0.677 M\$	2.988 M\$
	Oxydation catalytique (1)	0.185 M\$	2.126 M\$	2.311 M\$	
Surveillance	Puits d'observation (52)	1.709 M\$	2.343 M\$ (comprenant l'échantillonnage)	4.052 M\$	4.052 M\$
Concept 2	Capital total 2.378 M\$	O&M total 5.924 M\$	Coût total 8.302 M\$		

Tableau 6.19: Coûts associés à l'UTES

Coûts en capital	Coûts en opération et maintenance (par le MENV)	Coûts supplémentaires
3 M\$ en dollars de 1984 (Mme Picard, comm. pers.)	Traitement des composés organiques volatils : 0.100 M\$/an (M. Séguin, comm. pers.)	0.068 M\$ (rénovations, durée de vie de 5 ans, depuis 2002)
	Traitement du fer : 0.200 M\$/an (M. Séguin, comm. pers.)	0.050 M\$ (rénovations, durée de vie de 5 ans, depuis 2002)



CHAPITRE 7

PRISE DE DÉCISION

Conclusions et recommandations

Le présent chapitre présente tous les éléments pris en compte dans le processus de sélection afin de déterminer lequel des concepts de solution intégrés développés au chapitre 6 présente le plus d'intérêt pour le contrôle et le traitement des panaches d'eau souterraine contaminée de Ville-Mercier. Dans un premier temps, une conclusion résumant les phases du processus de sélection qui ont été réalisées dans cette étude est présentée. Dans un deuxième temps, une conclusion sur les avantages et désavantages relatifs aux concepts de solution intégrés est établie. Les résultats de ces conclusions ont permis de prendre une décision par rapport à l'alternative de contrôle à adopter. La prise de décision est discutée dans les recommandations de cette étude. Des travaux futurs en relation avec la prise de décision sont également recommandés.

7.1 Conclusion sur les phases du processus de sélection

L'INRS-ETE a reçu le mandat de réaliser une étude permettant de préciser les technologies qui pourraient être considérées pour le contrôle des panaches d'eau souterraine contaminée dans la région des anciennes lagunes de Ville-Mercier. Ces technologies doivent être aptes à remplacer le présent système en place de pompage et de traitement (UTES) qui arrive au terme de sa vie utile. Dans le but de trouver une alternative efficace à l'UTES, un cheminement logique a été établi, soit le processus de sélection.

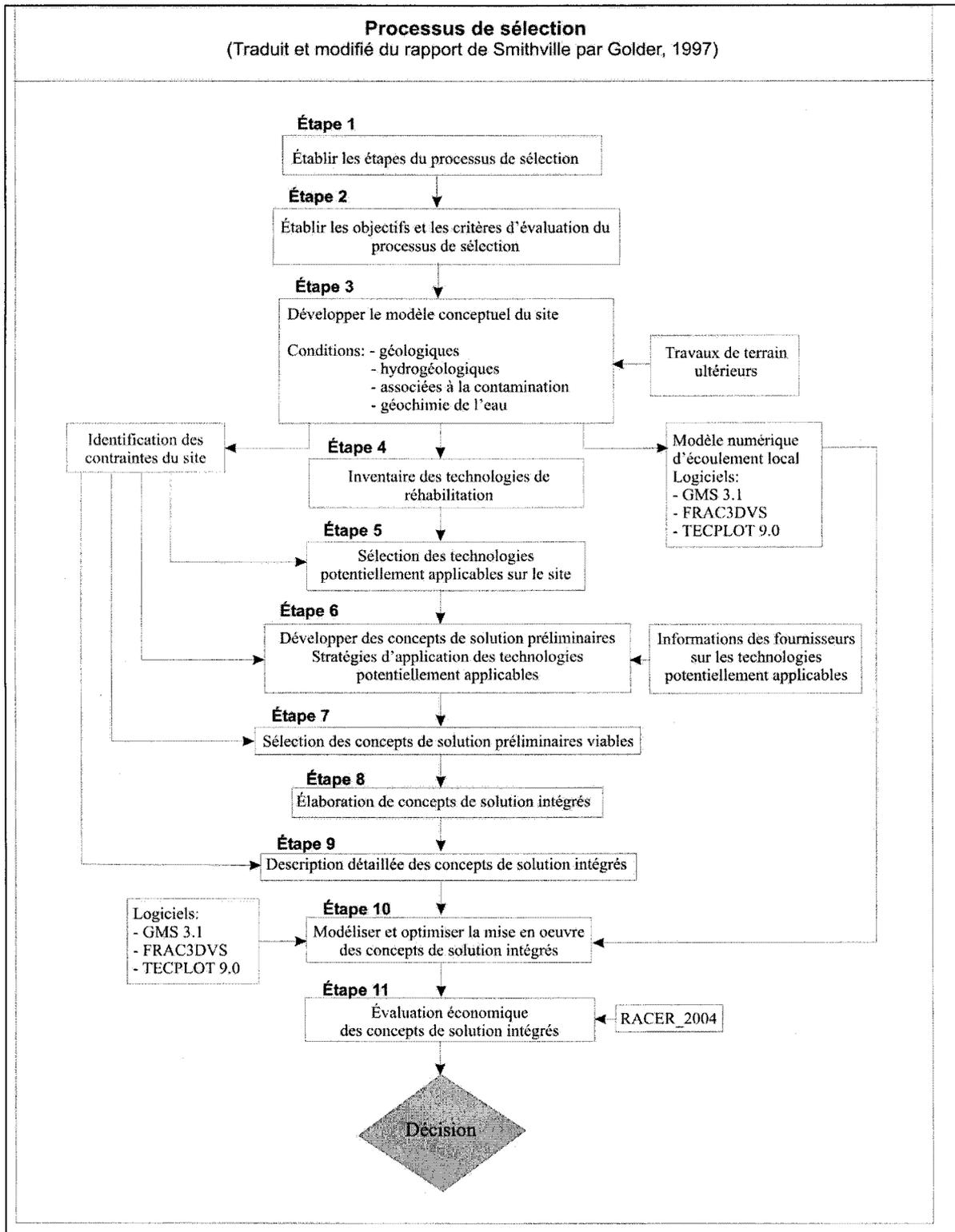


Figure 7.1 : Processus de sélection : Prise de décision

Suite à l'élaboration du processus de sélection, un modèle conceptuel du site a été créé afin de regrouper l'ensemble des informations connues sur le contexte régional et local du site. Ce modèle conceptuel a permis de définir une liste des contraintes du site qu'il est nécessaire de considérer dans l'applicabilité et la mise en œuvre de nouvelles technologies de contrôle et de traitement des panaches d'eau contaminée de Ville-Mercier. Par la suite, le modèle conceptuel a été intégré dans un modèle numérique d'écoulement local et régional afin de simuler les conditions d'écoulement naturel et en pompage sur le site. Ces travaux ont constitué le sujet d'étude M.Sc d'Olivier Pontlevoy (2004).

Dans la Phase I (Étapes 4 et 5) du processus de sélection, l'inventaire des technologies de réhabilitation réalisé antérieurement a permis la sélection des technologies potentiellement aptes à permettre le contrôle et le traitement des panaches d'eau contaminée, soit pour l'aquifère granulaire ou l'aquifère de roc fracturé, du secteur des anciennes lagunes de Mercier. À cette fin, une grille de décision a été établie pour déterminer le potentiel d'utilisation des différentes technologies.

Dans la Phase II (Étape 6 et 7) du processus de sélection, quatre concepts de solution préliminaires applicables à l'aquifère granulaire ont été développés utilisant respectivement les approches 1) de confinement, 2) de contrôle passif, 3) de zone réactive et 4) de contrôle hydraulique. Un seul concept a été développé pour l'aquifère de roc fracturé soit le contrôle hydraulique. Sur la base de ces concepts préliminaires, deux combinaisons de technologies se sont révélées plus avantageuses dans le contexte du site pour le contrôle du panache dans l'aquifère granulaire, soit le confinement et le contrôle hydraulique. Ces technologies ont été sélectionnées suite à une rencontre entre l'INRS-ETE et des représentants du MENV sur la base des critères d'une grille de sélection.

Sur la base de cette grille de sélection, le confinement de la zone source dans l'aquifère granulaire est apparu comme le concept le plus techniquement avantageux. Ce concept a une grande efficacité potentielle en plus d'être très robuste et facile d'opération. L'autre groupe de technologies qui présente un intérêt est le contrôle hydraulique qui est

relativement simple et efficace en plus d'être adaptable à des changements de conditions hydrauliques ou de la contamination. Ces deux groupes de technologies ont fait l'objet d'une étude plus détaillée.

Les technologies qui ont été rejetées et n'ont pas été évaluées en détail sont la zone réactive et le contrôle passif. Les technologies de zone réactive présentent un intérêt mais seraient plus complexes à appliquer et à contrôler dans le contexte hydrogéologique complexe de Mercier qui a aussi une vaste gamme de contaminants dissous dans le panache. Le concept de traitement passif ou semi-passif par mur réactif n'apparaît pas recommandable. La technologie la plus commune de mur réactif avec fer monovalent permettrait seulement de traiter environ la moitié des contaminants présents dans le panache de Ville-Mercier. De plus, ce concept est très sensible aux changements de conditions d'écoulement ou de concentrations qui sont susceptibles de se produire au site.

Suite à la rencontre du 10 février entre l'INRS et des représentants du MENV, deux concepts préliminaires pour le contrôle du panache dans l'aquifère granulaire ont été retenus, soit le confinement des zones sources et le contrôle hydraulique.

Dans la Phase III (Étape 8 à 11) du processus de sélection, les concepts de solution préliminaires de l'aquifère granulaire, retenus par la sélection, ont été combinés individuellement au concept du contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé pour constituer des concepts de solution intégrés qui ont été développés en détail :

- Concept intégré 1 : Confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire combiné au contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé
- Concept intégré 2 : Contrôle hydraulique dans l'aquifère granulaire et l'aquifère de roc fracturé.

Une description détaillée de chacun de ces concepts a été réalisée afin de définir la localisation et les éléments de design des infrastructures de contrôle, de traitement et de surveillance reliées à ces concepts. Des travaux de modélisation ont été poursuivis afin de définir les conditions optimales de mise en œuvre des concepts intégrés et d'évaluer leur

efficacité. De plus, ces travaux ont permis de préciser davantage certains éléments de design des infrastructures, tels le débit de contrôle minimal dans le cas d'un système de contrôle. Afin d'évaluer du point de vue économique les différents concepts intégrés optimaux, une évaluation des coûts des infrastructures a été effectuée pour les deux concepts de solution intégrés. L'organigramme du processus de sélection présenté à la figure 7.1 montre le cheminement réalisé dans cette étude, depuis les objectifs du processus de sélection jusqu'à la prise de décision.

7.2 Conclusion sur les avantages et désavantages des concepts de solution intégrés

Le tableau 7.1 fait le sommaire des concepts intégrés, de leurs principaux avantages et désavantages, des risques qui y sont reliés et de leurs coûts. Ces informations devraient permettre de soutenir les décisions en relation avec la sélection de concepts de solution pour le contrôle des panaches d'eau souterraine contaminée des aquifères granulaire et de roc fracturé dans le secteur des anciennes lagunes de Ville-Mercier.

Les deux concepts de solution intégrés décrits au tableau 7.1 sont viables techniquement et ils possèdent des avantages et désavantages respectifs. Le concept 1 impliquant le confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire, a l'avantage de la robustesse, de l'efficacité face à de larges variations des conditions hydrauliques dans le secteur des lagunes et de la simplicité d'opération. Ce concept pourrait aussi grandement faciliter une éventuelle réhabilitation des zones sources puisqu'il prévient la fuite de contaminants à partir des zones sources. Le concept 1 a le désavantage d'impliquer de forts coûts en capital et en opération, particulièrement pour le traitement initial des eaux et des huiles contaminées qui doivent être extraites de l'enceinte confinée. Ces opérations ont cependant l'intérêt de permettre l'enlèvement d'une masse importante de contaminants, bien que cet enlèvement ne constitue pas en soi une approche efficace et suffisante de réhabilitation des zones sources.

Le concept 2, impliquant le contrôle hydraulique indépendamment dans les aquifères granulaire et de roc fracturé, possède le grand avantage de la simplicité de mise en œuvre

et d'opération combiné à des coûts relativement faibles, tant en capital qu'en opération. Si ce concept était retenu, le pompage de l'eau contenue dans les lagunes n'est pas nécessairement recommandé compte tenu des coûts très élevés de cette opération. Le contrôle hydraulique est cependant moins robuste que le confinement sous des conditions hydrauliques changeantes ou des concentrations variables qui sont susceptibles de se produire suite à l'arrêt de l'UTES.

Tableau 7.1: Comparaison des deux concepts de solution intégrés

Particularités du concept	Concept intégré 1	Concept intégré 2
Description	<ul style="list-style-type: none"> • Confinement de la zone source des lagunes combiné au pompage et traitement¹ au roc • Option de traitement 2 : traitement de l'eau et disposition des huiles 	<ul style="list-style-type: none"> • Pompage et traitement¹ dans le sable et gravier combiné au pompage et traitement¹ au roc
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Simple d'opération. • Très robuste et efficacité possible sous des conditions très variables. • Fuites potentielles captées par le système au roc. • Pourrait faciliter une réhabilitation éventuelle. 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût relativement faible. • Simple d'opération. • Flexible. • Fuites potentielles captées par le système au roc.
Désavantages	<ul style="list-style-type: none"> • Coût élevé. • Opération coûteuse de pompage dans les lagunes requise. • Incertitude sur les conditions au roc et l'efficacité du système dans le roc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Moins robuste et efficacité peut être moindre sous des conditions hydrauliques ou des concentrations variables. Exige un temps d'ajustement. • Incertitude sur les conditions au roc et l'efficacité du système dans le roc.
Risques	<ul style="list-style-type: none"> • Le contrôle hydraulique doit fonctionner en permanence pour éviter les fuites de contaminants dans l'aquifère de roc. • Fuites possibles du confinement dans l'aquifère granulaire. • Possibilité de ne pas tout capter le panache au roc. • Possibilité d'avoir une efficacité faible du système de traitement. 	<ul style="list-style-type: none"> • Le contrôle hydraulique doit fonctionner en permanence pour éviter les fuites de contaminants dans les deux aquifères. • Problème potentiel d'adaptation à des conditions changeantes. • Possibilité de ne pas tout capter le panache au roc. • Possibilité d'avoir une efficacité faible du système de traitement.
Coûts	<ul style="list-style-type: none"> • Capital : 8.4 M\$ • O&M : 9.1 M\$ • Total : 17.5 M\$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Capital : 2.4 M\$ • O&M : 5.9 M\$ • Total : 8.3 M\$

1 : Le traitement ne comprend pas l'enlèvement du fer ou du manganèse.

Pour les deux concepts, un contrôle hydraulique au roc indépendant devrait assurer une opération plus ciblée et plus flexible. Par contre, l'hydraulique de l'aquifère rocheux fracturé de même que la nature de la zone source au roc sont moins bien caractérisées que pour l'aquifère granulaire. De ce fait, il reste une incertitude sur l'efficacité éventuelle du contrôle hydraulique au roc.

Les deux concepts intégrés devraient être efficaces au niveau technique et permettre le contrôle des panaches d'eau contaminée dans l'aquifère granulaire et l'aquifère de roc fracturé bien que ces concepts aient des coûts très différents. Il faut par contre souligner qu'il pourrait y avoir une réduction significative du coût du concept intégré 1 si l'huile pouvait être traitée directement à l'incinérateur plutôt que transportée hors site. En comparant les coûts, il serait tentant de baser le choix du concept à mettre en œuvre sur une base économique puisqu'il y a une différence importante entre les coûts estimés pour les deux concepts. Il faut cependant réaliser que ces concepts représentent des choix qui ont des implications importantes au-delà de leur utilité première d'assurer le contrôle des panaches d'eau contaminée. D'autres considérations que l'efficacité technique doivent aussi guider la sélection du concept de solution à mettre en œuvre.

En fait, il faut se demander ce que représentent les deux concepts de solution par rapport à la situation présente au site de Mercier. Le concept intégré 2 qui utilise uniquement le contrôle hydraulique est un système amélioré de la même technologie présentement en œuvre à l'UTES. C'est une approche palliative qui ne fait que contrôler la situation par un pompage actif de l'eau contaminée. Dans 20 ans, il faudra à nouveau considérer une solution de remplacement de ce système s'il est mis en œuvre. Une telle solution pourra difficilement être perçue comme une amélioration de la situation existante. Enfin, cette approche n'offre pas d'avantage par rapport à une éventuelle réhabilitation de la zone source dans l'aquifère granulaire.

Le concept intégré 1 qui implique le confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire atteint l'objectif de contrôle du panache d'eau contaminée dans cet aquifère et

il est combiné à un contrôle hydraulique dans le roc comme le concept intégré 2. Le confinement des zones sources apporte cependant beaucoup plus d'effets positifs que le simple contrôle hydraulique. Avec l'application de ce concept, les émissions de contaminants dissous devraient en fait cesser dans l'aquifère granulaire à partir des anciennes lagunes. Ce concept implique aussi le pompage d'une grande quantité d'eau contaminée présentement accumulée dans les nappes perchées retrouvées dans l'enceinte des anciennes lagunes. En plus de cette opération, il y aura pompage interne à l'enceinte confinée dans l'aquifère granulaire pour garder les charges à l'intérieur inférieures aux charges à l'extérieur de l'enceinte. Ce pompage permettra ainsi de retirer de la masse de contaminants des anciennes lagunes. La mise en œuvre du concept intégré 1 implique donc des actions significatives de réduction du risque de contamination de l'aquifère granulaire. De ce fait, il ne sera plus nécessaire de garder des opérations de contrôle dans cet aquifère en dehors de l'enceinte confinée. L'aquifère granulaire sera ainsi beaucoup moins à risque d'une contamination qui pourrait résulter d'un bris du système de contrôle.

Ces actions positives au niveau de la stabilisation de la source de contamination dans l'aquifère granulaire ne sont cependant pas de réelles opérations de réhabilitation des zones sources. L'intérieur de l'enceinte confinée gardera tout de même un niveau élevé de contamination des sols en produits organiques immiscibles à très long terme. Le confinement des zones sources favorisera cependant d'éventuelles actions de réhabilitation en prévenant les émissions en dehors de l'enceinte confinée de tout produit qui pourrait être utilisé pour favoriser la réhabilitation des sols. Le concept intégré 1 représente ainsi une progression vers une solution à long terme du cas de contamination de Mercier par rapport au concept intégré 2 qui est un *statu quo* amélioré.

Le concept intégré 1 ne représente pas une solution définitive de la situation à Mercier et le mandat de cette étude visait spécifiquement à trouver une alternative viable pour le contrôle des panaches d'eau contaminée, pas d'évaluer des options de réhabilitation des zones sources. La réhabilitation complète des zones sources dans les aquifères granulaire et de roc fracturé apparaît difficile et coûteuse compte tenu de la situation complexe du site. Il est donc difficile d'envisager une solution définitive simple. Le confinement des

zones sources constituées des sols contaminés dans l'aquifère granulaire devrait cependant simplifier la mise en œuvre éventuelle d'une telle solution. Ce confinement ne doit pas cependant être perçu comme une infrastructure permanente, car toutes les technologies de confinement ont une durée de vie finie et nécessitent des travaux éventuels de maintenance ou de remplacement.

7.3 Recommandations

Les travaux documentés dans cette étude devraient être suivis d'un programme de travail comprenant les aspects suivants :

- Caractérisation complémentaire : certains aspects du site sont encore trop mal compris pour établir soit les conditions d'écoulement ou de la contamination, ce qui limite la capacité présente à faire la conception finale de technologies efficaces. Les principaux aspects exigeant une caractérisation complémentaire sont les suivants (détails aux sections 6.2.1.3 et 6.2.2.3) :
 - Contrôle du panache dans l'aquifère granulaire;
 - Résorption du panache dans l'aquifère granulaire;
 - Contrôle hydraulique dans l'aquifère de roc fracturé.
- Développement de pilotes pour tester l'applicabilité et la performance des concepts de solution proposés. Les prévisions de l'efficacité des concepts de solution intégrés proposés repose sur des principes bien établis et des travaux de simulation représentatifs. Il est cependant essentiel de vérifier l'efficacité des systèmes en mode pilote avant de commettre les fonds pour la mise en œuvre en pleine grandeur d'un concept de solution. Les essais à l'échelle pilote permettront ainsi de vérifier l'efficacité des concepts, la performance des infrastructures et de faire l'optimisation des conditions d'opération.

Le choix final d'un concept de solution à mettre en œuvre pour remplacer l'UTES ne doit pas se faire uniquement sur une base technique. Cette décision doit aussi être faite en relation avec des considérations économiques et sociales, notamment l'acceptabilité de la solution par la population locale, particulièrement si c'est le MENV qui met en œuvre le concept de solution. Si c'est plutôt le propriétaire du site qui doit mettre en œuvre une

solution de remplacement à l'UTES, les conclusions de cette étude pourront servir de guide pour valider l'efficacité technique présumée des solutions qui pourraient être proposées.

Bien que les deux solutions soient techniquement viables et devraient être efficaces, la mise en œuvre du concept intégré 1 est favorisée. Celle-ci implique le confinement des zones sources dans l'aquifère granulaire combiné au contrôle hydraulique dans le roc fracturé. Bien que plus coûteux, ce concept est robuste et simple d'opération, il permet l'enlèvement d'une partie de la contamination en eau souterraine accumulée dans les lagunes, et il pourra simplifier la mise en œuvre éventuelle de technologies de réhabilitation des zones sources dans les sols contaminés reliés aux anciennes lagunes dans l'aquifère granulaire.

RÉFÉRENCES

ANDERSON, M.P., and WOESSNER, W.W., 1992. Applied groundwater modelling : Simulation of flow and advective transport. Academic Press, 381 p.

BACHAND, G., 1987. Simulation de la charge hydraulique à Ville Mercier. Mémoire de Maîtrise en géologie, Université de Sherbrooke, Québec, Décembre 1987.

BYU, 2000: Department of Defense Groundwater Modeling System (GMS), version 3.1, Tutorial Manual, Brigham Young University-Environmental Modeling Research Laboratory, 313p.

CARSEL, R.F., PARRISH, R.S., 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. Water Resour. Res. 24, 755-769.

CNFS, 1993. Caractérisation exhaustive du panache de contamination des anciennes lagunes de Ville-Mercier. Volume 1-5, Ministère de l'Environnement du Québec.

D'ANJOU, N., 1991. Simulation de pièges hydrauliques par éléments finis pour l'aquifère fracturé de Ville Mercier. Mémoire de maîtrise en géologie, Université Laval, Québec, avril 1991.

DENIS, C., 1991. Caractérisation hydrogéologique du substratum rocheux fracturé du site pollué de Ville-Mercier. Mémoire de Maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi.

DION, D.J., COCKBURN, D., CARON, P., 1985. Levé géotechnique de la région de Beauharnois-Candiac. Rapport DV 85-05, cartes 2015, Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Québec.

DOMENICO, P.A., and SCHWARTZ, F.W., 1990. Physical and chemical hydrogeology. John Wiley & Sons, New York, 506p.

FORATEK INTERNATIONAL INC., 1987. Tricil, programme de forages. Rapport 857, projet 87014, foratek Int.

FRTR, 2003. Federal Remediation Technologies Roundtable. Site Internet www.frtr.gov.

GELINAS, P., ISABEL, D., ROULEAU, A., 1989. Aquifer decontamination for toxic organics: the case of Mercier, Québec. Contract KE405-8-6001/01-SS, Université Laval et U.Q.A.C.

GÉOMINES LTÉE, 1983. Étude hydrogéologique, Région de Saint-Rémi. Rapport 83150, Ministère de l'Agriculture, des pêcheries et de l'Alimentation, 22 p.

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 ASSOCIATES LIMITED, 1997. Smithville Phase 4 Bedrock Remediation Program. Minister of the environment of Ontario.

GREGI, 1993. Aquifer decontamination for toxic organics: the case study of Ville-Mercier, Québec. Final Report, Volume II. Université Laval.

HYDROGÉO CANADA INC., 1978. Sondages de reconnaissance et expertise hydrogéologique. Rapport préparé pour Tricil, contrat 2848, 13p.

JAVANDEL, I., and C.F. TSANG, 1986. Capture-zone type curves: A tool for aquifer cleanup, *Ground Water*, 24:616-625.

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.

MCCORMACK, R., 1981. Étude hydrogéologique - Bassin versant de la Châteauguay. Ministère de l'Environnement du Québec, rapport E.F.-2.

NFESC, 2003. Naval Facilities Engineering Service Center. Site internet www.enviro.nfesc.navy.mil/erb/

PONTLEVOY, O., 2004. Modélisation hydrogéologique pour supporter la gestion du système aquifère de la région de Ville-Mercier. Mémoire de maîtrise, INRS-ETE, 98p.

PONTLEVOY, O., LEFEBVRE, R., 2002. Modélisation régionale de l'écoulement de l'eau souterraine dans la région de Ville-Mercier, Québec. Rapport de recherche N° 630, INRS- Eau, Terre et Environnement, Octobre 2002.

PONTLEVOY, O., RACINE, C., LEFEBVRE, R., THERRIEN, R., TRÉPANIÉ, L., 2003. Étude initiale des alternatives de contrôle du panache d'eau souterraine contaminée émis par les anciennes lagunes de Mercier. INRS- Eau, Terre et Environnement, Rapport de recherche R-689, version finale soumise au MENV en octobre 2003, 46 p. et annexes.

POULIN, M., 1977. Groundwater contamination near a liquid waste lagoon, Ville Mercier, Quebec. M.Sc. Thesis, University of Waterloo.

RACER, 2004. Parametric Cost-Estimating Software for Remediation and Restoration Projects. Site internet www.earthtech.com.

THERRIEN, R., SUDICKY, E.A., 1996. Three-dimensional analysis of variably-saturated flow and solute transport in discretely-fractured porous media, *Journal of Contaminant Hydrology*, 23, pp 1-44.