

Université du Québec
INRS-Géoresources

**CONCEPTION PAR MODÉLISATION NUMÉRIQUE D'UN
ESSAI DE RESTAURATION *IN SITU* À L'AIDE DE
SOLUTIONS TENSIOACTIVES SUR DES SOLS CONTAMINÉS
AUX BPC**

Par
Annie Roy

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

Décembre 1998

© droits réservés de Annie Roy, 1998

RÉSUMÉ

La compagnie Domtar possède une usine de produits chimiques en Ontario datant du début du siècle. L'utilisation de biphényles polychlorés (BPC) à l'usine a occasionné une contamination des sols et de l'eau souterraine principalement sous des bâtiments. En 1995, la compagnie a pris des mesures pour restaurer les sols et l'eau souterraine sur la propriété en ayant pour contraintes la préservation des bâtiments en place ainsi que le maintien des activités de production. La méthode de restauration retenue est une technique *in situ* appelée communément *lavage de sol*, développée par l'université Laval de 1993 à 1997 (Martel, R. et al.). Elle consiste en l'injection de produits tensioactifs dans un aquifère afin de solubiliser les contaminants qui sont ensuite récupérés par pompage. Cette technique est basée sur les principes utilisés dans le domaine du génie pétrolier.

Le projet "Domtar" a nécessité la participation d'une dizaine de chercheurs de l'Institut national de la recherche scientifique et de l'Université Laval. Ma contribution au projet a consisté à : 1. coordonner les travaux préparatoires à l'essai pilote de restauration, 2. réaliser la caractérisation exhaustive du site, 3. faire la conception de l'essai pilote et 4. participer à l'essai pilote et à certains travaux de laboratoire. Étant donné l'ampleur des travaux effectués, le présent ouvrage ne porte que sur le volet de la conception de l'essai pilote. Les informations concernant les autres travaux de terrain se trouvent dans un rapport distinct (Roy, 1997).

L'outil retenu pour la conception de l'essai pilote est la modélisation numérique, à l'aide du logiciel MODFLOW© (McDonnald et Harbaugh, 1988 ; Prudic, 1989). Préalablement à la conception de l'essai pilote, l'écoulement de l'eau souterraine à l'échelle de la propriété a été déterminé par modélisation numérique. Le modèle d'écoulement à

l'échelle de la propriété a été monté et calibré en deux mois et demi. La conception de l'essai a ensuite été réalisée, à partir de ce modèle d'écoulement, selon les séquences typiques d'une restauration par *lavage de sol* : 1. le pré-lavage à l'eau, 2. l'injection de polymères et de solutions tensioactives de viscosités variables permettant la solubilisation des contaminants et 3. le rinçage à l'eau (Martel, R. et al., 1993, 1996, 1997). L'essai pilote prévoyait la restauration d'une parcelle d'aquifère de 1 m^3 et d'une superficie de 1 m^2 selon un patron carré composé d'un puits d'injection central et de quatre puits de pompage périphériques. À ce patron s'ajoutent deux puits d'appoint en aval hydrogéologique installés pour intercepter les fuites potentielles des liquides.

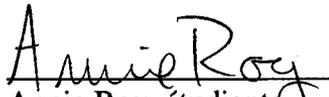
La difficulté majeure de la conception de l'essai pilote était la modélisation de l'injection de liquides de viscosités différentes de celle l'eau. Pour ce faire, la conductivité hydraulique (K) du modèle a été modifiée dans la parcelle à décontaminer selon la formule générale : $K = k \rho g / \mu$ qui permet de tenir compte de la viscosité des fluides. En laboratoire, il a été déterminé que la densité des polymères et des solutions tensioactives était à peu près identique à celle de l'eau alors que leur viscosité pouvait être de 3 à 10 fois plus élevée. Chacune des séquences de lavage a donc été modélisée en tenant compte des différentes viscosités pour obtenir les débits, les temps et les volumes d'injection ainsi que les volumes de liquides pompés. Par la suite, j'ai participé au montage de l'essai pilote qui a été réalisé par l'équipe de recherche durant les mois d'avril et de mai 1997.

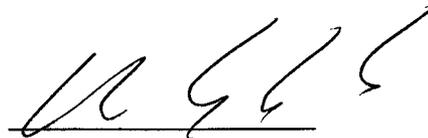
La modélisation numérique s'est avérée très utile pour faire la conception de l'essai pilote et s'est révélée particulièrement pertinente pendant sa réalisation. En effet, en cours d'essai sur le terrain, il a fallu faire une nouvelle modélisation d'une des séquences de lavage parce qu'un des puits de pompage périphériques ne fonctionnait pas tel que prévu. La modélisation numérique a donc aussi démontré sa grande utilité et sa souplesse à s'ajuster à des conditions hydrauliques changeantes durant la réalisation de l'essai pilote.

À la fin de l'essai, le bilan hydraulique a été examiné, à partir des résultats disponibles alors, afin d'avoir une idée de l'efficacité de la modélisation numérique comme outil de conception. Selon ce bilan, il appert que les débits et les temps d'injection prévus par

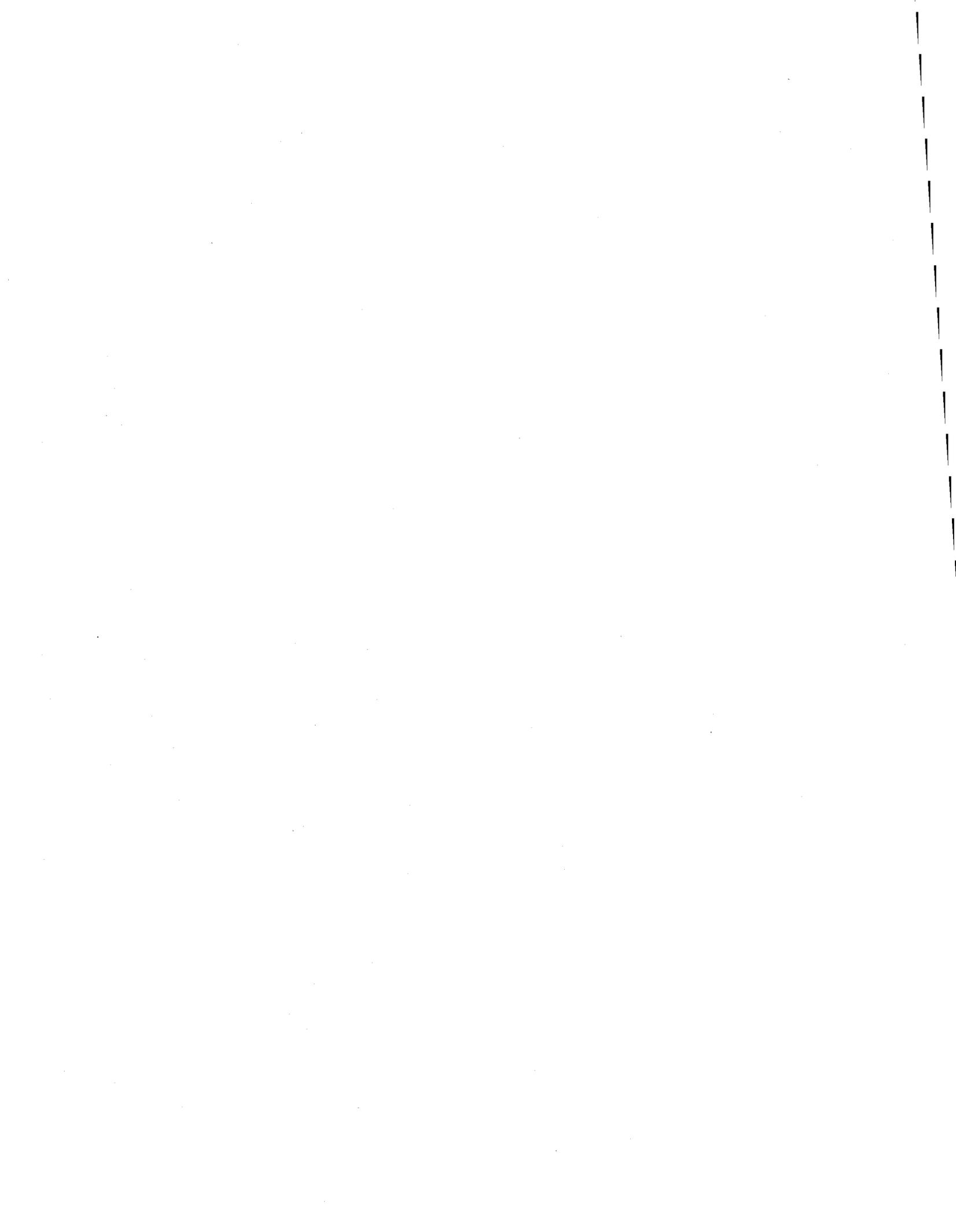
modélisation numérique concordent en général assez bien avec les valeurs obtenues sur le terrain, particulièrement jusqu'à la l'injection de liquides de viscosités supérieures à celle de l'eau. Cependant, les volumes théoriques de liquides pompés s'avèrent nettement supérieurs aux volumes réellement pompés sur le terrain. Malgré les écarts entre les résultats de la modélisation et de l'essai de terrain, le modèle numérique semble performant pour établir l'écoulement et le bilan hydraulique lors des séquences de lavage avec de l'eau ou avec des liquides montrant une faible différence de viscosité (jusqu'à 3 fois). Lorsque la viscosité est supérieure de façon appréciable à celle de l'eau, le bilan hydraulique est moins probant.

En conclusion, le modèle numérique utilisé a été un bon outil pour la conception de l'essai pilote de restauration. Même si le bilan hydraulique n'est pas concluant sur le plan de l'estimation des volumes, le modèle numérique a été d'une grande utilité pour planifier l'essai et choisir les équipements appropriés. Il s'agit là d'un atout indéniable puisque sans la modélisation numérique, les paramètres de conception doivent en général être déterminés de façon empirique.


Annie Roy, étudiante


René Lefebvre
Directeur de recherche


Richard Martel
Codirecteur de recherche



REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier la Fondation de l'ordre des ingénieurs du Québec qui m'a attribué une bourse d'études et ainsi permis de réaliser des études spécialisées en hydrogéologie. De façon plus personnelle, je remercie René Lefebvre, mon directeur de thèse, professeur à l'INRS-Géoressources, d'abord pour m'avoir proposé un projet aussi intéressant et ensuite pour son implication dans le projet quant à l'encadrement, la collaboration, les échanges et l'assistance professionnels. Je remercie aussi Richard Martel, mon codirecteur, également professeur à l'INRS-Géoressources, qui a été un soutien technique important, monsieur Marcel Sylvestre de la compagnie Domtar, tous les chercheurs de l'Université Laval ainsi que toutes les personnes qui ont été impliquées de près ou de loin dans ce projet. Je remercie l'INRS-Géoressources qui m'a permis d'acquérir une formation de qualité. Pour terminer, merci Marc pour les encouragements et l'appui dans cette entreprise.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	V
REMERCIEMENTS	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES.....	XIV
LISTE DES ANNEXES.....	XV
LISTE DES SYMBOLES.....	XVI
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION.....	1
1.1 LE CONTEXTE DU PROJET.....	1
1.2 LES ÉTAPES DU PROJET.....	5
1.3 LES OBJECTIFS ET LA MÉTHODOLOGIE	7
CHAPITRE 2 : LA REVUE DE LITTÉRATURE.....	9
2.1 LES CARACTÉRISTIQUES DES BIPHÉNYLES POLYCHLORÉS	9
2.1.1 <i>L'historique</i>	9
2.1.2 <i>La structure chimique des BPC</i>	11
2.1.3 <i>La nomenclature et l'identification des BPC</i>	11
2.1.4 <i>Les propriétés physico-chimiques des BPC</i>	13
2.2 LES PRINCIPES DU GÉNIE PÉTROLIER ET LA RESTAURATION D'AQUIFÈRES CONTAMINÉS.....	15
2.2.1 <i>La contamination par des fluides immiscibles</i>	16
2.2.2 <i>Les principes de la récupération assistée de fluides immiscibles</i>	18
2.2.3 <i>Les types de récupération assistée</i>	23
2.3 LES PRINCIPES DU CONTRÔLE HYDRAULIQUE.....	25
2.4 LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE	28
2.4.1 <i>La définition d'un modèle</i>	28
2.4.2 <i>Les équations de base de la modélisation numérique</i>	29
2.4.3 <i>Le modèle conceptuel</i>	33
2.4.4 <i>Le montage des données du modèle : le maillage et les paramètres de base</i>	36
2.4.5 <i>Les conditions aux limites</i>	38
2.4.6 <i>La calibration et la précision du modèle</i>	40
2.4.7 <i>Les étapes postcalibration</i>	42
CHAPITRE 3 : LA CARACTÉRISATION DU SITE	43
3.1 LE CONTEXTE GÉNÉRAL.....	43
3.2 LA STRATIGRAPHIE.....	46
3.2.1 <i>L'asphalte et le béton</i>	47
3.2.2 <i>Le remblai</i>	47
3.2.3 <i>Le sable silteux</i>	47
3.2.4 <i>L'argile silteuse</i>	48
3.2.5 <i>Le roc</i>	48

3.3 L'HYDROGÉOLOGIE	48
3.3.1 Données hydrologiques.....	48
3.3.2 L'hydrogéologie.....	49
3.4 LA CONTAMINATION DES SOLS ET DE L'EAU SOUTERRAINE	54
CHAPITRE 4 : LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE DE L'ÉCOULEMENT	57
4.1 LE MODÈLE CONCEPTUEL.....	57
4.2 LE MODÈLE NUMÉRIQUE.....	58
4.2.1 Le choix du modèle.....	58
4.2.2 Le choix du maillage.....	59
4.2.3 Le choix des paramètres physiques et hydrauliques des simulations	64
4.2.4 La calibration	65
4.2.5 L'écoulement à l'échelle de la propriété	71
4.2.6 Le raffinement du domaine à l'échelle de la parcelle à décontaminer	73
CHAPITRE 5 : LA CONCEPTION ET LA MISE EN ŒUVRE DE L'ESSAI PILOTE DE RESTAURATION.....	75
5.1 LE CHOIX DU PATRON D'INJECTION ET DE POMPAGE.....	75
5.2 LES SÉQUENCES D'INJECTION ET DE POMPAGE DE L'ESSAI PILOTE DE RESTAURATION.....	79
5.3 LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE DE L'ESSAI PILOTE DE RESTAURATION.....	81
5.3.1 Séquence 1 : le régime permanent et le prélavage à l'eau	81
5.3.2 Séquence 2 : l'injection de la solution de lavage de viscosité 3 fois supérieure à celle de l'eau.....	85
5.3.3 Les séquences 3 et 4 : l'injection de polymères de viscosités variables	88
5.3.4 La séquence 5 : le rinçage à l'eau.....	92
5.3.5 La synthèse des séquences de l'essai pilote de restauration par lavage de sol	92
5.4 LA MISE EN ŒUVRE ET LA LOGISTIQUE DE L'ESSAI PILOTE DE RESTAURATION	93
5.4.1 Les travaux préalables.....	93
5.4.2 La réalisation de l'essai.....	93
5.4.3 La logistique de l'essai	94
5.4.4 L'utilité de la modélisation numérique durant l'essai	96
5.5 L'ÉVALUATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE DE L'ESSAI PILOTE DE RESTAURATION.....	97
CHAPITRE 6 : CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	103
BIBLIOGRAPHIE	111
ANNEXE A	117
ANNEXE B	123
ANNEXE C	135
ANNEXE D	145

LISTE DES TABLEAUX

2.1 : La nomenclature des BPC.....	12
2.2 : Les principaux noms commerciaux des BPC	12
2.3 : Les propriétés et les mécanismes spécifiques aux conditions hydrostatiques et hydrodynamiques	18
2.4 : Les outils servant à l'établissement du modèle conceptuel	34
2.5 : Les types de limites et de conditions aux limites d'un modèle numérique	39
3.1 : La description des travaux de caractérisation environnementale réalisés sur la propriété Domtar	44
3.2 : Les niveaux d'eau et les valeurs de conductivité hydraulique obtenus lors des travaux de juin et de décembre 1996 par l'INRS-Géoressources et l'Université Laval	51
3.3 : Les conductivités hydrauliques moyennes à l'échelle de la propriété et dans le secteur de la HR et de la HOFR.....	53
4.1 : Les erreurs ME, MAE et RMS des différentes simulations à l'échelle de la propriété Domtar	66
4.2 : Les critères de sélection pour le choix du modèle calibré	67
4.3 : Les caractéristiques des différents domaines discrétisés	73
5.1 : Les débits utilisés pour les simulations de l'injection et du pompage avec le patron carré et le patron en trois points.....	76
5.2 : Séquence 1 : les débits théoriques lors du régime permanent et du prélavage à l'eau.....	82
5.3 : Les valeurs de charge hydraulique de l'essai d'injection et de pompage en régime transitoire	83
5.4 : Les valeurs de conductivité hydraulique dans la parcelle lors de l'injection de produits à viscosité variable.....	86
5.5 : Séquence 2 : Les débits théoriques lors de l'injection de la solution de lavage de viscosité 3 fois supérieure à celle de l'eau.....	87
5.6 : Séquence 3 : Les débits théoriques lors de l'injection du polymère de viscosité 7 fois supérieure à celle de l'eau.....	90
5.7 : Séquence 4 : Les débits théoriques lors de l'injection du polymère de viscosité 10 fois supérieure à celle de l'eau.....	91
5.8 : La synthèse des séquences de l'essai pilote de restauration à l'aide de solutions tensioactives.....	92
5.9 : Le bilan hydraulique théorique et observé de l'essai pilote de restauration	100
A.1 : Les usages des principaux aroclors.....	118
A.2 : La composition chimique de différents aroclors.....	119
A.3 : Les propriétés physico-chimiques des principaux aroclors	120
A.4 : Les valeurs de K_{oc} obtenues des équations de régression linéaire de K_{ow} et de S	122
C.1 : Les caractéristiques des simulations réalisées pour la calibration de l'écoulement à l'échelle de la propriété Domtar.....	136
C.2 : Le bilan de masse du système obtenu par MODFLOW©	144
D.1 : Liste des équipements requis pour l'essai pilote de restauration.....	146

LISTE DES FIGURES

1.1 : La localisation générale du site étudié	3
1.2 : La localisation de la propriété Domtar	4
1.3 : Les étapes d'un projet de restauration utilisant l'injection de solutions tensioactives	5
2.1 : La structure chimique des BPC	11
2.2 : Un exemple d'identification des aroclors	13
2.3 : Le comportement général d'un système à phase mixte	16
2.4 : L'angle de contact et le type de mouillabilité associé	20
2.5 : Le comportement dynamique de fluides immiscibles lorsque l'eau ou l'huile est le liquide mouillant	21
2.6 : Les patrons d'injection et de pompage	25
2.7 : Un exemple de récupération d'une phase flottante d'hydrocarbures	27
2.8 : Les étapes de la méthodologie utilisée pour la modélisation numérique	29
2.9 : Deux types de maillages en modélisation numérique	37
3.1 : La localisation de l'essai pilote de restauration (HOFR et HR)	45
3.2 : Le modèle conceptuel de la stratigraphie sur la propriété Domtar	46
3.3 : L'écoulement de l'eau souterraine dans les dépôts meubles sur la propriété Domtar	50
3.4 : L'écoulement de l'eau souterraine dans l'unité de sable silteux dans le secteur de la HOFR et de la HR	52
3.5 : La contamination des sols dans le secteur de la HOFR et de la HR	55
4.1 : Le maillage du domaine à l'échelle de la propriété Domtar	62
4.2 : Les conditions aux limites du domaine à l'échelle de la propriété Domtar	63
4.3 : La validation du modèle numérique à l'aide du modèle mathématique de Neumann pour un essai de pompage fictif	70
4.4 : Le patron d'écoulement de l'eau souterraine à l'échelle de la propriété (simulation 17)	72
4.5 : Les différents domaines discrétisés	74
5.1 : La piézométrie selon le patron d'injection et de pompage carré	77
5.2 : La piézométrie selon le patron d'injection et de pompage en trois points	78
5.3 : Séquence 1 : le patron d'écoulement lors du régime permanent et du pré lavage à l'eau	82
5.4 : Séquence 2 : le patron d'écoulement lors de l'injection de la solution de lavage de viscosité 3 fois supérieure à celle de l'eau	87
5.5 : Séquence 3 : le patron d'écoulement lors de l'injection du polymère de viscosité 7 fois supérieure à celle de l'eau	90
5.6 : Séquence 4 : le patron d'écoulement lors de l'injection du polymère de viscosité 10 fois supérieure à celle de l'eau	91
5.7 : Le montage du système d'injection et de pompage de l'essai pilote de restauration	95
5.8 : La comparaison entre la séquence 4 ($\mu > 10$) de la simulation originale et de la simulation ajustée en cours d'essai	98

LISTE DES ANNEXES

A : Les caractéristiques des BPC	117
B : La stratigraphie et la conception des puits d'observation au droit des forages réalisés par l'INRS et l'Université Laval, juin et décembre 1996.....	123
C : Les caractéristiques des simulations réalisées pour la calibration de l'écoulement à l'échelle de la propriété Domtar.....	135
D : La mise en œuvre et la logistique de l'essai pilote de restauration	145

LISTE DES SYMBOLES

b	épaisseur saturée de l'aquifère (L)
E_r	efficacité de récupération
E_d	efficacité de déplacement
E_b	efficacité de balayage
g	accélération gravitationnelle $9,81 \text{ m/s}^2$
h	charge hydraulique (L)
H	constante de Henry ($\text{atm L}^3/\text{mol}$),
i	gradient hydraulique (L/L)
K	conductivité hydraulique (L/T)
K_v	conductivité hydraulique verticale (L/T)
K_h	conductivité hydraulique horizontale (L/T)
k	perméabilité (L^2)
K_{ow}	coefficient de partition octanol-eau
K_{oc}	coefficient de partition carbone organique-eau
K_d	coefficient de distribution
L	drainance (L)
M_{mol}	Masse moléculaire (M)
μ	viscosité dynamique (tPa).
n	porosité
n_d et S_y	porosité de drainage et 'specific yield'
P	pression (Pa)
P_v	pression de vapeur (Pa)
P_c	pression capillaire (Pa)
Q	débit (L^3/T)
q	flux (L/T)
r	distance entre les piézomètres et le puits de pompage (L)
r_w	rayon du puits (L)
R_e	rayon d'influence (L)
ρ	densité (M/L^3),
s	rabattement dans les piézomètres (L)
S	coefficient d'emmagasinement de l'aquifère
S_s	emmagasinement spécifique (L^{-1})
S	solubilité (M/L^3 , M/M)
S_r	saturation résiduelle
σ	Tension interfaciale (N/L)
T_{eb}	température d'ébullition ($^{\circ}\text{C}$)
T	transmissivité (L^2/T)
θ_c	angle de contact (degré)
W(u)	fonction de puits de Theis

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 LE CONTEXTE DU PROJET

Ce projet de maîtrise réalisé à l'INRS-géoresources fait partie d'un programme en environnement conjoint avec l'industrie. La compagnie Domtar est l'initiatrice du projet réalisé avec la collaboration d'un groupe de chercheurs de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS), de l'Université Laval et de l'Institut de recherche en biotechnologie (IRB). Le projet "Domtar" est financé à parts égales par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et l'industrie.

La compagnie Domtar opérait une usine de fabrication de produits chimiques en Ontario depuis le début du siècle jusque dans les années 1990, période où les activités ont été reprises par une autre compagnie. La propriété est située à environ 100 km au nord de Toronto et est bordée à l'ouest et à l'est par deux lacs importants (Figure 1.1). Les installations de l'usine sont montrées à la Figure 1.2.

L'usine fabriquait une grande gamme de produits chimiques notamment du charbon et de l'alcool de bois, jusqu'au milieu des années 1940, ainsi que du carboxyméthyl de cellulose et des produits tensioactifs, jusqu'à ce jour. Le propriétaire actuel poursuit toujours la fabrication de produits tensioactifs qui sont utilisés pour fabriquer des savons commerciaux. Durant les années cinquante, des biphényles polychlorés (BPC) ont été utilisés à l'intérieur des salles de fournaies pour le chauffage des produits chimiques. Ces salles sont désignées HOFR (*hot oil furnace room*) et HR (*hot room*).

Or, une contamination des sols et des eaux souterraines en BPC a été détectée sous ces salles de fournaise (HOFR et HR) et à d'autres endroits sur la propriété, laquelle serait vraisemblablement due à des déversements accidentels durant la manutention des BPC. La compagnie Domtar a réalisé de nombreuses études de caractérisation depuis 1990 pour évaluer l'état de cette contamination sur la propriété (ESL, 1990, 1992, 1994 et DCS 1995). Selon ces études, les types de BPC présents sont principalement les aroclor 1248 et 1260. Par ailleurs, le critère de contamination de 50 mg/kg de BPC dans les sols défini par le ministère de l'Environnement de l'Ontario est dépassé à plusieurs endroits.

La problématique environnementale du site réside donc dans la décontamination des sols et des eaux souterraines tout en maintenant les bâtiments en place et en maintenant les activités de production actuelles. Les méthodes de réhabilitation *ex situ* conventionnelles comme l'excavation des sols par exemple, ne peuvent être utilisées dans l'optique d'une réutilisation des bâtiments et d'une poursuite des activités de production. Le caractère récalcitrant des BPC s'ajoute également aux contraintes déterminantes dans le choix de la méthode de restauration. La technologie retenue par la compagnie Domtar pour solutionner cette problématique de restauration est celle qui fut développée par l'Université Laval (Martel, R. et al., 1993, 1996, 1997). Cette technique, appelée communément *lavage de sols*, consiste à injecter des solutions tensioactives dans un aquifère pour favoriser la solubilisation des contaminants et leur mobilisation par pompage.

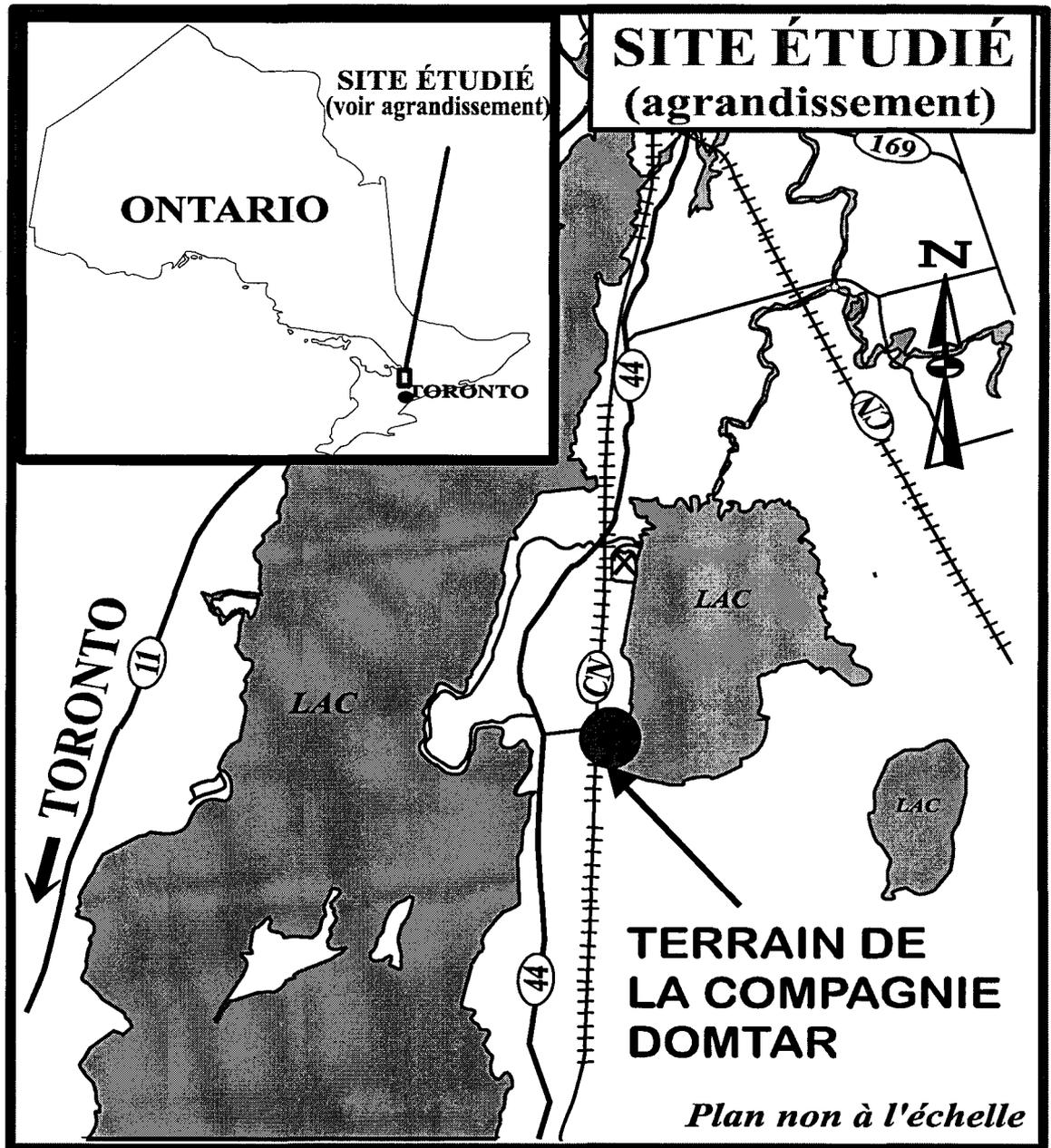


Figure 1.1 : La localisation générale du site étudié

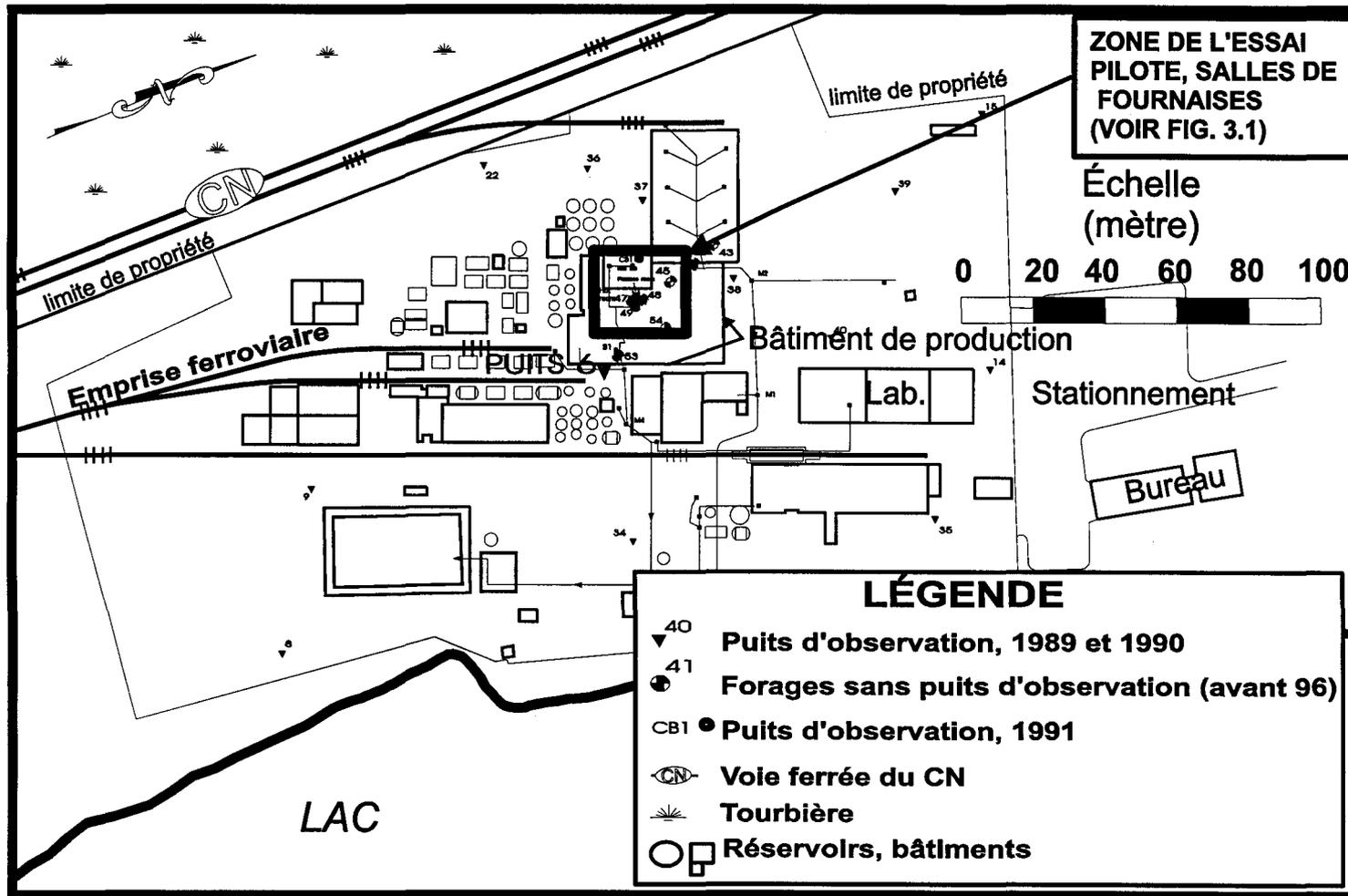


Figure 1.2 : La localisation de la propriété Domtar (ESL, 1994)

1.2 LES ÉTAPES DU PROJET

Le projet Domtar porte sur la recherche et le développement d'une technologie de décontamination *in situ*, à l'aide de solutions tensioactives, des sols et de l'eau souterraine contaminés par des BPC. Ces produits sont immiscibles dans l'eau et très visqueux, c'est-à-dire qu'ils ne sont généralement pas solubles. La technique de décontamination utilisant des solutions tensioactives (*lavage de sol*), favorise la solubilisation et la mobilisation des contaminants immiscibles. Elle est basée sur les principes utilisés dans l'industrie pétrolière. La Figure 1.3 présente le déroulement général d'un projet de *lavage de sol*.

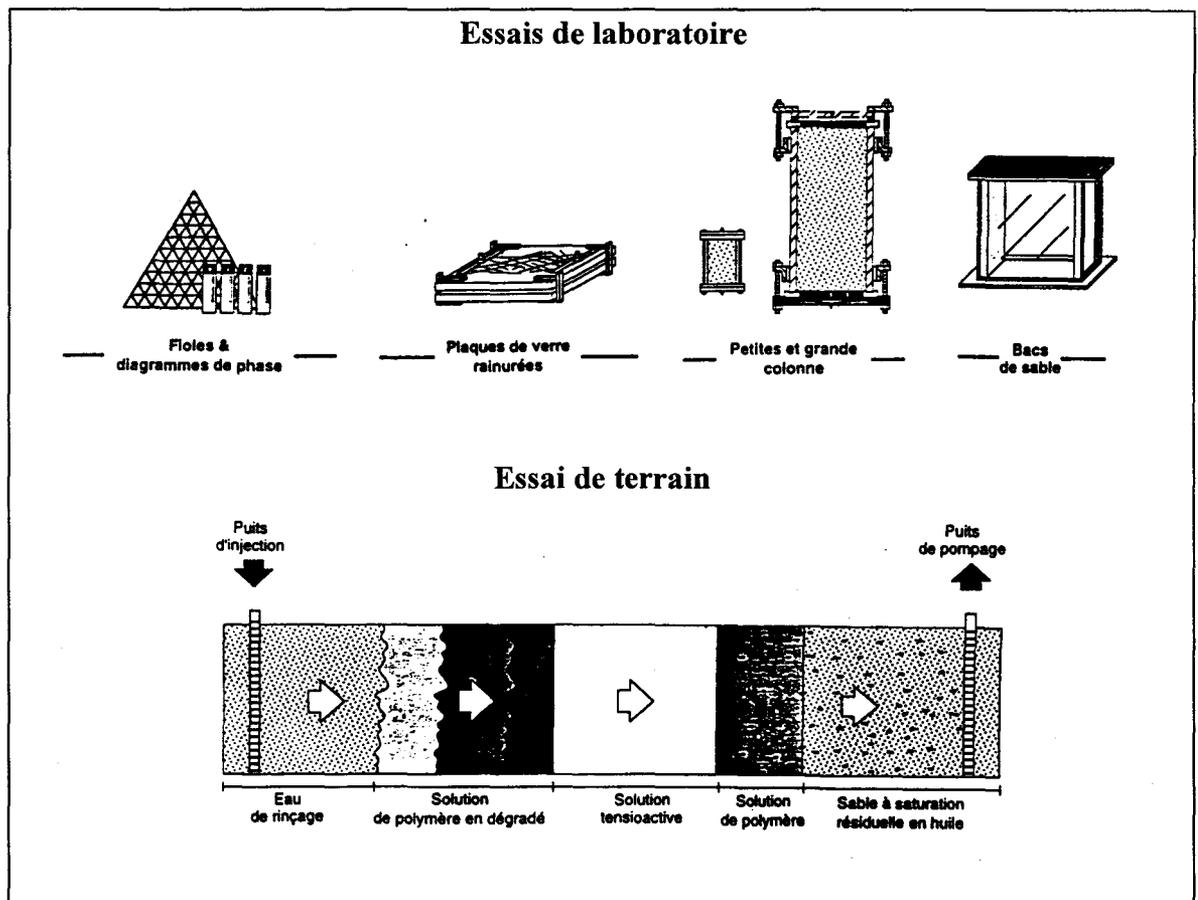


Figure 1.3 : Les étapes d'un projet de restauration utilisant l'injection de solutions tensioactives (Martel, K.E., 1995)

Selon Martel, R. et al. (1993, 1996, 1997), la première étape du projet est l'identification et le développement de différentes solutions tensioactives applicables pour le contaminant

étudié. Elle est suivie de tests de laboratoire permettant de sélectionner, parmi ces solutions, celles qui sont les plus efficaces pour solubiliser le contaminant. L'outil permettant de déterminer la solubilité des différents liquides immiscibles est le diagramme de phase.

D'autres tests de laboratoire servent à vérifier la performance des solutions tensioactives sur des sols contaminés, provenant du terrain à l'étude. Cette mesure permet de vérifier si la solution choisie est suffisamment efficace pour atteindre les niveaux de décontamination escomptés ou s'il faut l'optimiser davantage. Les essais en petites et en grandes colonnes sont parmi les tests de laboratoire effectués pour ce faire.

L'étape suivante est l'essai de restauration sur le terrain. La conception d'un essai comprend, entre autres, le choix du patron d'injection, l'établissement des séquences d'injection et de pompage des produits (eau, solutions tensioactives, polymères...) telles que celles montrées sur la Figure 1.3, la détermination des paramètres hydrauliques de l'essai (débits, volumes de liquides ...), le choix des équipements et la réalisation de l'essai. La dernière étape porte sur l'évaluation des résultats de terrain par rapport aux prévisions, des possibilités d'application futures ainsi que sur le suivi de la restauration.

Le projet "Domtar" a nécessité la participation d'une dizaine de chercheurs de l'Institut national de la recherche scientifique et de l'Université Laval attirés aux différentes étapes de laboratoire et de terrain. Ma contribution au projet a consisté à : **1.** coordonner les travaux préparatoires à un essai pilote de restauration, **2.** réaliser la caractérisation exhaustive du site, **3.** faire la conception de l'essai pilote et **4.** participer à l'essai pilote et à certains travaux de laboratoire. Étant donné l'ampleur des travaux effectués dans le cadre de ma maîtrise, ils n'ont pas pu être tous abordés dans le présent ouvrage, celui-ci portant plus particulièrement sur la conception de l'essai pilote. Les informations issues des autres travaux se trouvent dans un rapport distinct (Roy, 1997).

Deux outils peuvent être utilisés pour la conception de l'essai pilote, soit l'évaluation empirique à l'aide des équations mathématiques usuelles (méthode du puits image,

équation de Theis...) ou la modélisation numérique. La modélisation numérique a été privilégiée pour la conception de l'essai notamment parce qu'il fallait un outil réutilisable en prévision d'une restauration à grande échelle. Le logiciel MODFLOW© a été utilisé pour ce faire (McDonnald, Harbaugh, 1988 ; Prudic, 1989).

L'échéancier du projet "Domtar" se détaillait ainsi : la réalisation des essais de laboratoire pour le choix des solutions tensioactives durant l'automne 1995 à l'Université Laval, la caractérisation du site, la conception et la préparation de l'essai pilote au cours de l'année 1996 et la mise en oeuvre de l'essai au printemps 1997.

1.3 LES OBJECTIFS ET LA MÉTHODOLOGIE

L'objectif visé par la modélisation numérique dans le présent projet est de développer un outil efficace, réutilisable et fiable pour la conception d'un essai pilote de restauration. Les objectifs de l'essai pilote, quant à eux, sont de vérifier l'efficacité des solutions tensioactives mises au point au laboratoire et de déterminer les paramètres nécessaires à une restauration subséquente à grande échelle. La méthodologie qui fut utilisée pour ce projet correspond aux sujets traités dans les chapitres 2 à 6 de ce mémoire.

1. La revue de littérature et l'acquisition des connaissances de base sur le contaminant, les principes du génie pétrolier et la modélisation numérique (Chapitre 2) ;
2. L'établissement du contexte hydrogéologique et stratigraphique du terrain à partir des données de caractérisation (Chapitre 3) ;
3. La modélisation numérique de l'écoulement à l'échelle de la propriété Domtar (Chapitre 4) ;
4. La conception de l'essai pilote de restauration par modélisation numérique dans la zone des salles de fournaies (Chapitre 5) ;
5. La détermination des séquences d'injection et de pompage (Chapitre 5) ;
6. L'analyse de l'essai pilote par rapport aux prévisions du modèle numérique (Chapitres 5 et 6).

CHAPITRE 2

LA REVUE DE LITTÉRATURE

Dans le cadre du projet "Domtar", la restauration *in situ* à l'aide de solutions tensioactives a fait appel à trois champs de connaissance qui sont : les caractéristiques du contaminant, les principes du génie pétrolier utilisés en récupération assistée de fluides immiscibles ainsi que la modélisation numérique.

2.1 LES CARACTÉRISTIQUES DES BIPHÉNYLES POLYCHLORÉS

2.1.1 L'historique

Les biphényles polychlorés (BPC) ne sont pas présents naturellement dans l'environnement. Ils proviennent de la synthèse de produits organiques et de chlore et ont été fabriqués pour la première fois en 1881 (Carrier, 1985). Les BPC ont été produits à plusieurs endroits dans le monde et le principal producteur en Amérique du nord est la compagnie Mosanto située à Saint-Louis dans l'état du Missouri. Le nom commercial des BPC fabriqués par cette compagnie est l'aroclor (CCME, 1986).

À l'origine, les BPC ont été produits pour les besoins de l'industrie électrique, comme liquides isolants dans les transformateurs et les condensateurs. Les qualités des fluides isolants recherchées, auxquelles les BPC répondaient, étaient la stabilité thermique, la faible inflammabilité et les capacités diélectriques. Avec le temps, ils ont aussi connu d'autres usages notamment comme pesticides en agriculture ou en foresterie (Tableau A.1, annexe A). Par ailleurs, les BPC sont également produits de façon indirecte lors de l'incinération de

déchets solides ou du blanchiment au chlore de la pâte et du papier par exemples. Les alumineries, les industries de fabrication de peinture, de produits chimiques et les industries du secteur de la pétrochimie sont également d'autres producteurs secondaires (MEF, 1993).

Environ 635 000 tonnes de BPC ont été produites en Amérique du nord avant l'interdiction d'en fabriquer en 1977. Quelques 40 000 tonnes ont été importées au Canada dont un peu moins de la moitié est recensée (CCME, 1986). Selon Howard (1989) et Carrier (1985), les équipements électriques contenant des BPC sont en voie d'être démantelés sur tout le territoire canadien mais cette opération n'est pas encore terminée et il reste encore des volumes de BPC à gérer. La production indirecte diminue de façon substantielle notamment par des efforts de l'industrie (ex. : pâtes et papiers versus l'utilisation d'autres agents de blanchiment que le chlore). Les auteurs indiquent que malgré ces améliorations, la grande persistance des BPC fait en sorte qu'ils seront présents dans l'environnement encore pour une très longue période.

La persistance des BPC est un problème d'importance particulièrement au regard de la toxicité de ce produit. En effet, plusieurs études sur le sujet (Trépanier, 1984 ; Carrier, 1985) indiquent qu'il a des toxicité aiguë¹ et chronique² reconnues sur plusieurs espèces d'animaux. Ils ont, par surcroît, la particularité de s'accumuler dans la chaîne alimentaire principalement en raison de leur grande liposolubilité. La réalisation d'études plus poussées sur la toxicité des BPC remonte à la fin des années soixante en réponse à deux événements d'intoxication alimentaire qui ont eu lieu en Asie. Il s'agit des incidents de Yuscho au Japon et de Yu-Cheng en Taïwan en 1968 et en 1979, tous deux liés à une contamination d'huile de riz par des BPC utilisés comme lubrifiants dans la machinerie. Ces événements ont eu de graves répercussions sur la santé de la population et ont amené l'abolition du produit dans plusieurs pays dont le Japon en 1972. Par ailleurs, en 1976, la Toxic Substances Control Administration (TSCA) déclarait que les BPC sont extrêmement toxiques et cancérigènes et les pays du monde entier ont adopté des réglementations sévères sur ce produit dans les années qui suivirent (Carrier, 1985).

¹ toxicité aiguë : toxicité résultant d'une exposition de courte durée à de fortes doses

² toxicité chronique : toxicité résultant d'une exposition prolongée à de faibles doses

2.1.2 La structure chimique des BPC

Les biphényles polychlorés sont issus de la synthèse entre le benzène (C_6H_6) et le chlorure de sodium (NaCl) et font partie de la famille des produits organochlorés. La Figure 2.1 montre la structure chimique des BPC. Ils peuvent être représentés par la formule empirique suivante : $C_{12}H_{10-n}Cl_n$ avec "n" représentant le nombre d'atomes de chlore.

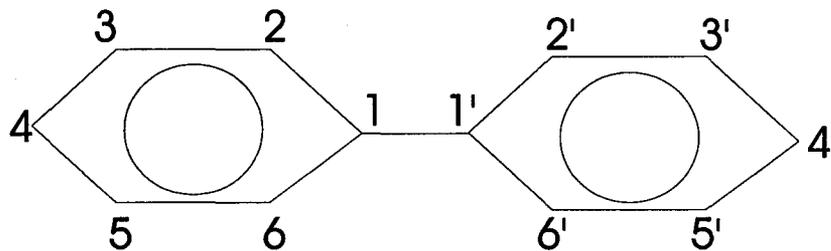


Figure 2.1: La structure chimique des BPC (IPCS, 1992)

Comme le montrent la formule et la structure chimiques, les BPC peuvent posséder de 1 à 10 atomes de Cl autour des anneaux de benzène (positions 2 à 6 et 2' à 6' sur la Figure 2.1) et ces atomes peuvent être placés à des endroits différents ce qui conduit à une possibilité de 209 congénères (ou isomères) potentiels. Sur ces 209 congénères, environ 137 ont été synthétisés et se retrouvent dans l'environnement.

2.1.3 La nomenclature et l'identification des BPC

Les BPC sont en fait un mélange de ses différents congénères. De plus, selon la littérature consultée, les BPC contiennent également du naphthalène (famille des hydrocarbures aromatiques polycycliques) ainsi que des dioxines et des furannes (famille des organochlorés) (Trépanier, 1984 ; Carrier, 1985). Les BPC peuvent être décrits à partir du nombre d'atomes de chlore dans la molécule selon la nomenclature présentée au Tableau 2.1. Ils peuvent également être identifiés par leur nom commercial. Les principaux noms commerciaux utilisés dans le monde sont indiqués au Tableau 2.2.

Tableau 2.1 : La nomenclature des BPC (Howard, 1989 ; Carrier, 1985)

Nombre de Cl	Nom du congénère	Formule chimique abrégée ¹
1	monochlorobiphényle	C ₁₂ H ₉ Cl
2	dichlorobiphényle	C ₁₂ H ₈ Cl ₂
3	trichlorobiphényle	C ₁₂ H ₇ Cl ₃
4	tétrachlorobiphényle	C ₁₂ H ₆ Cl ₄
5	pentachlorobiphényle	C ₁₂ H ₅ Cl ₅
6	hexachlorobiphényle	C ₁₂ H ₄ Cl ₆
7	heptachlorobiphényle	C ₁₂ H ₃ Cl ₇
8	octachlorobiphényle	C ₁₂ H ₂ Cl ₈
9	nonachlorobiphényle	C ₁₂ HCl ₉
10	décachlorobiphényle	C ₁₂ Cl ₁₀

1. La formule chimique indique le nombre d'atomes de Cl dans la molécule biphényle mais pas leur position

Tableau 2.2: Les principaux noms commerciaux des BPC (Trépanier, 1984), (Carrier, 1985)

Nom commercial	Fabriquant	Pays
Aroclor¹	Mosanto	États-Unis
Fenclor ou apirolio	Caffaro	Italie
Kaneclor ²	Mitsubishi	Japon
Pyranol	G.E.	États-Unis

1. Seul produit présent en Amérique du nord.

2. Produit en cause dans les intoxications de Yusho et de Yu-Cheng.

Les BPC fabriqués et vendus en Amérique du nord sont généralement identifiés avec le nom *Aroclor* suivis de quatre chiffres représentant le pourcentage en chlore qui le compose comme le montre l'exemple à la Figure 2.2.

<i>Aroclor wx yz</i>			
<i>avec</i>	<i>wx</i>	<i>= 12</i>	<i>biphényle polychloré</i>
		<i>= 54</i>	<i>triphényle polychloré (TPC)</i>
		<i>= 25</i>	<i>mélange de BPC (75%) et de TPC (25%)</i>
		<i>= 44</i>	<i>mélange de BPC (60%) et de TPC (40%)</i>
<i>et</i>	<i>yz</i>	<i>= le % en poids du chlore (Cl) dans le mélange</i>	

Figure 2.2 : Un exemple d'identification des aroclors

Ainsi, l'aroclors 1248 est un biphényle polychloré contenant 48% de Cl en poids dans le mélange. La composition exacte des différents aroclors n'est pas connue pour chaque aroclors mais on peut avoir une idée pour certains d'entre eux (Tableau A.2, l'annexe A). Selon ce tableau, l'aroclors 1248 contient 76 % de tétra et de pentachlorobiphényle. Le 1254 contient environ 75 % de penta et d'hexachlorobiphényle. Finalement, l'aroclors 1260 contient 79 % d'hexa et d'heptachlorobiphényle. Les quantités de furrannes présentes sont de l'ordre du ppm. Les principaux aroclors ayant été utilisés au Canada sont les suivants: 1221, 1232, 1242, 1248, 1254, 1260, 1262 et le 1268. Il faut également mentionner que l'askarel est une autre terminologie utilisée pour identifier les BPC. L'askarel est en fait un mélange de différents aroclors (40 à 70 %) et d'autres produits (30 à 60 %) retrouvé surtout dans les transformateurs.

L'aroclors 1248 est le principal aroclors présent sur la propriété Domtar ainsi que le 1260, de façon plus marginale. Une des difficultés du projet a été de mettre la main sur l'aroclors 1248 pour faire les essais de laboratoire puisque les BPC ne sont plus fabriqués aujourd'hui et que ceux encore existants sont soumis à un réglementation environnementale très sévère les rendant difficile d'accès. Une petite quantité d'aroclors a pu être obtenue, malgré tout, pour faire les essais de solubilité avec les solutions tensioactives.

2.1.4 Les propriétés physico-chimiques des BPC

Les propriétés physico-chimiques des BPC sont des données de base extrêmement importantes dans un projet de *lavage de sol* puisqu'elles ont une influence sur le choix des

solutions tensioactives. En effet, selon que le contaminant est plus ou moins dense, visqueux ou soluble, il sera plus ou moins difficile à solubiliser et les solutions tensioactives doivent être développées en conséquence. La solubilisation des produits est régie par les propriétés chimiques alors que l'interaction avec le milieu par les propriétés physiques. Les propriétés chimiques qui ont été considérées pour les besoins de l'étude sont : la masse moléculaire (M_{mol}), la solubilité (S) et la pression de vapeur (P_v). Les propriétés physiques importantes sont : la constante de Henry (H), la température d'ébullition ($T_{éb}$), la densité (ρ), la viscosité (μ), le coefficient de partition octanol-eau (K_{ow}) et le coefficient de partition carbone organique-eau (K_{oc}). Le Tableau A.3 à l'annexe A présente une compilation des principales propriétés physico-chimiques de différents aroclors des BPC. Elle est basée notamment sur des banques de données toxicologiques récentes et des livres de chimie spécialisés.

Certaines conclusions peuvent être tirées à partir des données du Tableau A.3 quant aux caractéristiques des différents aroclors. D'abord, ce tableau présente les aroclors par ordre croissant de proportion en chlore, c'est-à-dire de l'aroclor 1221 au 1260. L'augmentation en chlore ne semble pas avoir une influence très marquée sur certaines propriétés telles que : $T_{éb}$, P_v , H et $\log K_{ow}$. Par contre, l'augmentation de la quantité de Cl se traduit par une augmentation de la masse moléculaire (M_{mol}), de la densité (ρ) et de la viscosité (μ) ainsi qu'une diminution de la solubilité (S) des aroclors.

Par ailleurs, les aroclors présentés ont des températures d'ébullition ($T_{éb}$) élevées et des coefficients de partage octanol-eau ($\log K_{ow}$ et K_{ow}) très élevés par rapport aux produits organiques ne contenant pas de chlore. Les valeurs de K_{ow} élevées indiquent que les aroclors sont plus solubles dans l'octanol que dans l'eau. De plus, si on compare la solubilité des aroclors à celle de produits comme les hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM) (S de l'ordre de 10 à 1000 mg/L) et les substances phénoliques (S de l'ordre de 1000 à 10 000 mg/L) les aroclors sont considérés très peu solubles dans l'eau (S de l'ordre de 0,1 à 0,001 mg/L). Par contre, ils sont plus solubles que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) (S de l'ordre de 0,01 à 0,0001 mg/L) (Howard, 1989). Plusieurs auteurs ont de plus mentionné que les BPC sont solubles dans la plupart des solvants (Trépanier, 1984 ; CCME, 1986 ; Howard, 1989).

En ce qui concerne l'adsorption sur les particules de sol, cette propriété est importante pour connaître l'affinité des BPC à adhérer ou pas aux solides. Les essais en colonnes réalisés en amont dans le projet (Figure 1.3) peuvent donner une idée de cette affinité. Les solutions tensioactives sont alors testées sur des sols contaminés provenant du site étudié. L'adsorption se définit comme l'attraction d'un liquide à adhérer à la surface d'un solide et dépend de la minéralogie du sol et des liens chimiques du fluide. Cette propriété est évaluée à l'aide du coefficient de distribution K_d défini comme la mesure de la partition d'un composé entre un solide (les grains du sol) et l'eau. Plusieurs études ont montré que le coefficient de distribution est influencé par la quantité de carbone organique présent dans le sol de façon proportionnelle avec le coefficient de partition entre le carbone organique et l'eau (K_{oc}). Plus le K_{oc} est élevé, plus le composé s'adsorbe facilement.

Domenico et Schwartz (1990) proposent d'évaluer le K_{oc} à partir du K_{ow} et de S selon des équations de régression linéaire développées par différents auteurs. Une évaluation du K_{oc} pour l'aroclor 1248 a été faite au Tableau A.4 à l'annexe A et montre des valeurs variant de 21 727 à 794 328 selon les différentes équations. Les valeurs élevées du K_{oc} de l'aroclor 1248 indiquent que ce BPC aurait une grande tendance à s'adsorber.

2.2 LES PRINCIPES DU GÉNIE PÉTROLIER ET LA RESTAURATION D'AQUIFÈRES CONTAMINÉS

En génie pétrolier, la récupération optimale du pétrole est un objectif visé dans une perspective de rentabilité. On appelle récupération assistée, l'ensemble des techniques physico-chimiques qui permettent justement d'augmenter les taux de récupération du pétrole. À partir des similitudes relevées entre l'exploitation pétrolière et la restauration d'aquifères contaminés, les possibilités d'application de la récupération assistée dans le domaine de l'environnement ont été étudiées notamment par Bear (1972) et plus tard par de Marsily (1986). La réalisation de projets de restauration par récupération assistée date, quant à elle, des années quatre-vingt-dix. Le cas de la restauration de l'aquifère

contaminé de la Sablière Thouin dans la région de Montréal est parmi les plus connus au Québec (Martel, R. et al., 1993, 1996, 1997).

La technique de restauration *in situ* à l'aide de solutions tensioactives utilisée dans le présent projet est une méthode de récupération assistée qui fut d'ailleurs utilisée dans le projet de la sablière Thouin. La présente section définit la problématique de la récupération assistée et de l'écoulement de plusieurs fluides immiscibles en relation avec le projet "Domtar".

2.2.1 La contamination par des fluides immiscibles

Les BPC présents dans l'aquifère devant faire l'objet d'une restauration sur la propriété Domtar sont essentiellement immiscibles dans l'eau. Ils peuvent cependant se retrouver sous différentes formes tel que le montre la Figure 2.3.

1. le contaminant est immiscible dans l'eau ;
2. le contaminant est solubilisé dans l'eau ;
3. le contaminant est volatilisé dans l'air ; ou
4. le contaminant est adsorbé sur le solide.

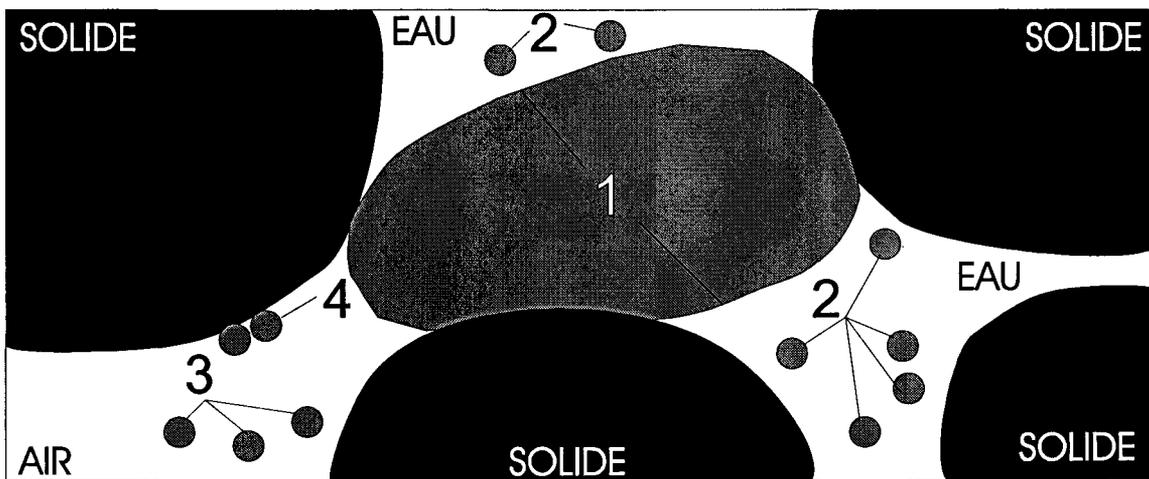


Figure 2.3 : Le comportement général d'un système à phase mixte

Un produit organique est considéré immiscible lorsqu'il a une très faible solubilité dans l'eau de sorte qu'à des concentrations appréciables il forme une phase unique. Par opposition, un composé miscible est soluble dans l'eau. Les produits immiscibles ayant une densité plus faible que celle de l'eau sont appelés "*Liquides organiques Immiscibles plus Légers que l'eau (LIL)*" désignés aussi "*LNAPL (Light Non Aqueous Phase Liquid)*". Ce type de liquide flottera à la surface de l'eau ; l'essence est un exemple typique de LIL. À l'opposé, ceux qui ont une densité supérieure à celle de l'eau sont appelés "*Liquides organiques Immiscibles plus Denses que l'eau (LID)*" ou "*DNAPL (Dense Non Aqueous Phase Liquid)*". Ce type de produit aura tendance à couler à travers la zone saturée et à se retrouver à la base d'un aquifère. Les BPC, comme la plupart des produits organochlorés sont des LID. Rappelons que l'aroclor 1248, type de BPC retrouvé sur le terrain Domtar, est immiscible en raison de sa faible solubilité (0,054 mg/L à 25°C) et est plus dense que l'eau (1,405 à 1,415 g/cm³) (voir section 2.1). Sa tendance à être adsorbé et sa grande viscosité contribueraient cependant à réduire l'effet de la densité et à limiter sa mobilité.

À la lumière des informations mentionnées précédemment, il appert que les propriétés physico-chimiques des contaminants organiques contrôlent leur comportement dans un aquifère quant au mode de migration, à la mobilité et à la partition entre les liquides et les solides. La densité, la solubilité et l'adsorption sont des exemples de propriétés qui influencent respectivement le mode de migration, la mobilité et la partition des contaminants dans l'eau souterraine. La connaissance des propriétés et du comportement des contaminants constitue de ce fait la première étape de la caractérisation d'aquifères contaminés par des fluides immiscibles. Par ailleurs, compte tenu de la complexité du comportement de ces produits dans un aquifère, il apparaît évident que la restauration ne peut se faire à l'aide d'un simple pompage et doit plutôt être aidée par les techniques de récupération assistée.

2.2.2 Les principes de la récupération assistée de fluides immiscibles

Comme il a été mentionné précédemment, les principes de la récupération assistée sont issus du génie pétrolier et sont repris par Lefebvre (1996) et Martel K.E. (1995). En génie pétrolier, on identifie deux principes qui permettent de décrire le comportement des fluides immiscibles : l'hydrostatique et l'hydrodynamique. L'hydrostatique fait référence au comportement des fluides alors qu'ils sont immobiles et l'hydrodynamique lorsqu'ils sont en condition d'écoulement. Le Tableau 2.3 présente les propriétés et les mécanismes caractéristiques des conditions hydrostatiques et hydrodynamiques.

Tableau 2.3 : Les propriétés et les mécanismes spécifiques aux conditions hydrostatiques et hydrodynamiques

HYDROSTATIQUE	HYDRODYNAMIQUE
Tension interfaciale (σ)	Perméabilité relative (κ_r) : - saturation résiduelle (S_r) - écoulement fractionnel (f_w)
Mouillabilité : - angle de contact (θ_c)	Déplacement immiscible : - efficacité de récupération (E_r) - efficacité de déplacement (E_d) - efficacité de balayage (E_b)
Capillarité : - pression capillaire (P_c)	

2.2.2.1 Les propriétés des fluides dans des conditions hydrostatiques

A) La tension interfaciale

La tension interfaciale (σ) est le travail requis pour créer une nouvelle unité de surface à l'interface entre deux fluides immiscibles : l'eau et les BPC dans le cas présent. Elle est représentée par l'équation 2.1.

$$\sigma = \frac{\text{Travail}}{\text{Aire}} = F \frac{dx}{dA} \text{ en N/m} \quad (\text{éq. 2.1})$$

Ainsi, plus un système a une valeur de tension interfaciale élevée plus la force doit être grande entre les fluides pour créer une unité d'aire (voir éq. 2.1). Comme un système tend vers une énergie minimale, ceci signifie que plus la tension interfaciale d'un système est élevée, moins il aura de facilité à se créer. La tension interfaciale du système BPC-eau n'est pas connue mais, on retrouve en ordre croissant de tension interfaciale, le système air-huile (20×10^{-3} à 50×10^{-3} N/m), le système air-eau (70×10^{-3} N/m) alors que la valeur pour l'air et le mercure est de 500×10^{-3} N/m. Ainsi, le système air-huile aura plus de facilité à se créer que le système air-eau par exemple. Cette affinité d'un fluide à s'établir sur un solide fait appel à la propriété de mouillabilité.

B) La mouillabilité

La mouillabilité est définie comme la tendance relative d'un fluide à adhérer à une surface solide en présence d'un autre fluide immiscible. Cette propriété existe lorsqu'il y a un système composé d'au moins deux fluides immiscibles et d'un solide. La mouillabilité est représentée quantitativement à l'aide de la valeur de l'angle de contact (θ_c). L'équation de Young-Dupré permet de déterminer cette valeur en relation avec la tension interfaciale (σ) pour un système huile (h)-eau (e)-solide (s).

$$\sigma_{hs} - \sigma_{es} = \sigma_{he} \cos \theta_c \quad (\text{éq. 2.2})$$

La valeur de l'angle de contact est déterminante pour savoir quel fluide mouillera préférentiellement le solide. La Figure 2.4 présente le lien entre les angles de contact, la tension interfaciale et le type de mouillabilité.

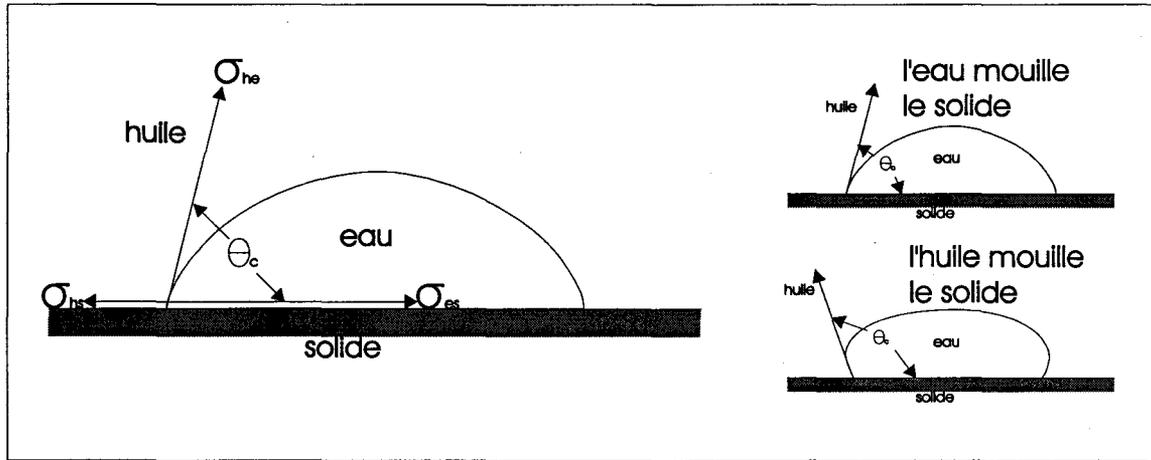


Figure 2.4 : L'angle de contact et le type de mouillabilité associé

Dans un projet de restauration par récupération assistée tel que le *lavage de sol*, il est important de savoir si le contaminant que l'on veut déloger se mouille à l'eau s'il se comporte de façon contraire. Les exemples donnés à la Figure 2.4 représentent le premier type de mouillabilité, soit la mouillabilité à l'eau (θ_c de l'eau avec le solide est aigu), à l'huile (θ_c de l'eau avec le solide est obtus). Le type de mouillabilité est influencé également par la minéralogie et la charge des surfaces solides ainsi que par les propriétés chimiques des fluides. La Figure 2.5 montre un exemple lorsque l'eau ou l'huile est le liquide mouillant.

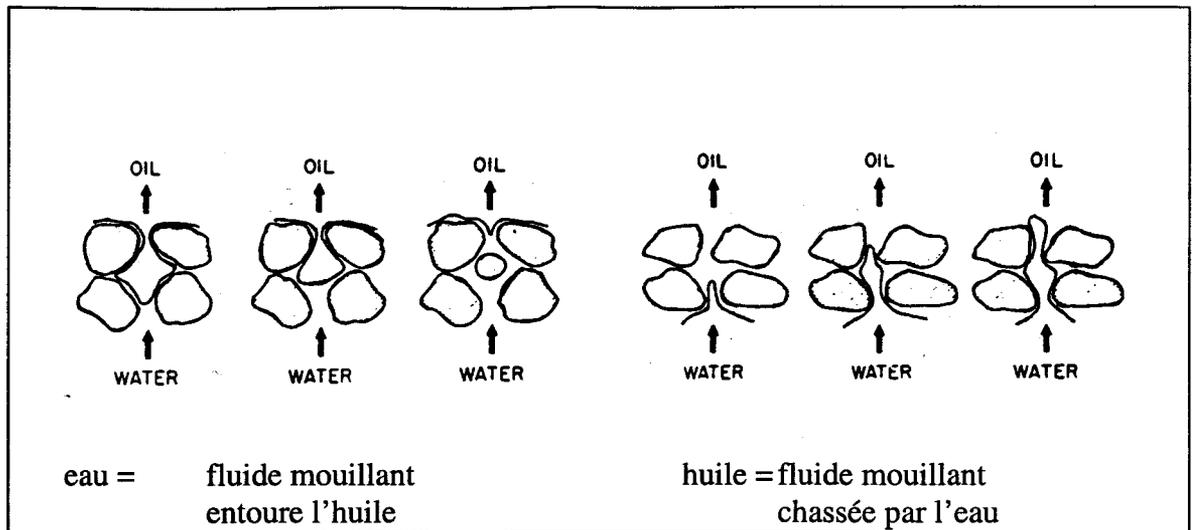


Figure 2.5 : Le comportement dynamique de fluides immiscibles lorsque l'eau ou l'huile est le liquide mouillant (Craig, 1971)

Le liquide mouillant aura tendance à adhérer plus facilement aux solides et à se loger dans les pores de faible dimension. La récupération de l'huile est plus efficace lorsque l'eau est le fluide mouillant. Il est donc souhaitable que le contaminant soit non mouillant dans le cas de la restauration d'aquifères.

C) La capillarité

La capillarité joue également un rôle en récupération assistée parce qu'elle est liée notamment aux caractéristiques du milieu (dimension et distribution des pores) et des fluides. La capillarité est un concept représenté par la pression capillaire (P_c) qui est la différence de pression à l'interface entre deux fluides immiscibles. Elle est décrite par l'équation de Young-Laplace (éq. 2.3) en fonction de la tension interfaciale (σ) et du rayon de courbure de l'interface (R). Dans le milieu poreux, on utilise plutôt l'équation de Bernouilli (éq. 2.4) pour décrire la pression capillaire (P_c) en fonction de la différence de densité entre les fluides ($\Delta\rho$), l'accélération gravitationnelle (g) et la charge hydraulique (h).

$$P_c = \frac{2\sigma}{R} \quad (\text{éq. 2.3})$$

$$P_c = \Delta\rho g h \quad (\text{éq. 2.4})$$

2.2.2.2 Les propriétés des fluides dans des conditions hydrodynamiques

A) La perméabilité relative

La perméabilité relative (k_r) est la capacité d'un milieu à déplacer plusieurs fluides en même temps. Ce qu'il faut retenir de ce concept c'est que la perméabilité d'un milieu composé de plusieurs fluides est plus faible que celle d'un système présentant une phase liquide unique. C'est d'ailleurs le cas de l'aquifère contaminé sur la propriété Domtar où on observe la présence d'au moins deux fluides, les BPC et l'eau. La perméabilité relative (κ_r) est définie comme le rapport entre la perméabilité effective à un des fluides (κ_f) et une perméabilité de base (κ_b) souvent représentée par la perméabilité intrinsèque (κ) (éq. 2.5). La perméabilité intrinsèque est liée à la conductivité hydraulique, la viscosité et la densité du fluide.

$$\kappa_r = \frac{\kappa_f}{\kappa} \quad (\text{éq. 2.5})$$

$$\text{avec } \kappa = \frac{K\mu}{\rho g} \quad (\text{éq. 2.6})$$

où K = conductivité hydraulique de l'aquifère

Comme nous le verrons à la section 5.3, l'équation 2.6 reliant la conductivité hydraulique à la viscosité sera d'une grande utilité pour modéliser la présence de différents fluides (eau, BPC, solutions tensioactives...) lors de la conception de l'essai pilote de restauration par *lavage de sol*.

B) Le déplacement immiscible

Trois concepts caractérisent le déplacement immiscible : l'efficacité de récupération (E_r), l'efficacité de déplacement (E_d) et l'efficacité de balayage (E_b). Comme son nom l'indique, l'efficacité de récupération est la quantité de produit organique récupérée lors de la restauration d'un aquifère par rapport à la quantité initiale. Le succès de la

récupération est fortement lié aux propriétés capillaires des fluides immiscibles (tension interfaciale, mouillabilité, pression capillaire, saturation résiduelle).

$$E_r = \frac{\text{volume de produit récupéré}}{\text{volume de produit en place}} \quad (\text{éq. 2.9})$$

L'efficacité de déplacement (E_d), quant à elle, est un phénomène à l'échelle microscopique qui représente la proportion de produit organique mobilisable lorsqu'il est mis en contact avec le fluide de déplacement (eau). Elle est reliée à la saturation résiduelle en huile ($S_{hrés}$) et irréductible en eau (S_{ie}).

$$E_d = \frac{1 - S_{ie} - S_{hrés}}{1 - S_{ie}} \quad (\text{éq. 2.10})$$

L'efficacité de balayage (E_b) est l'équivalent de l'efficacité de déplacement mais à l'échelle macroscopique. Il s'agit de la portion de l'aquifère mise en contact par le fluide de déplacement (eau). Le balayage peut être évalué sur les plans horizontal (E_{bh}) ou vertical (E_{bv}). Sur le plan horizontal, l'efficacité de balayage dépend du patron d'injection et de pompage alors qu'à la verticale, elle est fonction de l'hétérogénéité des couches de dépôts meubles.

$$E_b = \frac{\text{volume de l'aquifère atteint par le fluide déplaçant}}{\text{volume total de l'aquifère}} \quad (\text{éq. 2.11})$$

Enfin, l'efficacité de récupération (E_r) peut aussi être calculée à l'aide du produit de l'efficacité de déplacement (E_d) et de l'efficacité de balayage (E_b).

$$E_r = E_d \times E_b \quad (\text{éq. 2.12})$$

2.2.3 Les types de récupération assistée

La récupération assistée est définie comme l'utilisation de méthodes visant à améliorer la récupération des produits organiques immiscibles en augmentant les efficacités de

déplacement ou de balayage. Trois modes de récupération de produits organiques sont définis en génie pétrolier.

1. **La récupération primaire** : méthode conventionnelle de pompage des produits organiques qui permet l'extraction des produits à partir de l'énergie du réservoir. Environ 15 % des produits organiques sont récupérés de cette façon.
2. **La récupération secondaire** : récupération utilisant un liquide déplaçant (généralement de l'eau), permettant d'augmenter l'efficacité de déplacement et de balayage. Une proportion supplémentaire de 15 % de produit est récupérée.
3. **La récupération tertiaire ou assistée** : récupération de la portion de produits organiques toujours présents dans le réservoir après la réalisation des phases primaire et secondaire. Elle consiste à injecter des produits qui favorisent la mobilité et la solubilisation des produits organiques à saturation résiduelle (S_r) qui sont généralement adsorbés ou piégés dans les pores. Les objectifs de cette phase sont d'améliorer l'efficacité de balayage (E_b) et de déplacement (E_d) en diminuant la tension interfaciale (σ) ou la viscosité (μ). La technique de *lavage de sol* est une récupération de type tertiaire. Une proportion élevée de produits est généralement récupérée.

Il existe différentes méthodes (physico-chimique, thermique et autres) pour réduire la tension interfaciale et faciliter la solubilisation et la mobilisation des contaminants. La technologie utilisée dans le projet "Domtar" développée par l'Université Laval est une méthode physico-chimique basée sur l'injection de solutions tensioactives et de polymères dans un aquifère contaminé. La solution tensioactive a pour effet de solubiliser les contaminants sous forme d'émulsions et de réduire leur tension interfaciale afin de les rendre plus mobiles. Les polymères quant à eux, sont introduits avant et après les solutions tensioactives et ont pour but d'augmenter la viscosité de l'eau. Ils constituent en fait un piston hydraulique qui uniformise les viscosités des différents fluides évitant ainsi le phénomène d'interdigitation et favorisant un balayage uniforme de la formation.

Le contrôle hydraulique dont il est question ci-après est l'étape de terrain qui consiste ensuite à mettre en œuvre la récupération assistée.

2.3 LES PRINCIPES DU CONTRÔLE HYDRAULIQUE

La théorie décrite dans cette section est tirée de Driscoll (1986) et de Domenico et Schwartz (1990). Driscoll (1986) présente un cas très intéressant de contrôle hydraulique qui a servi d'inspiration dans le développement de patrons d'injection et de pompage en hydrogéologie. Il s'agit d'une technique d'exploitation minière *in situ* qui a été utilisée notamment pour des gisements d'uranium. Le puits d'injection est utilisé pour introduire un liquide avec un pH acide permettant la dissolution du minerai. Une fois en phase aqueuse, la solution est récupérée à l'aide des puits de pompage périphériques et, une fois rendu à la surface, le minerai est séparé de l'eau. Compte tenu de la nécessité d'une récupération optimale du minerai pour assurer la rentabilité de l'exploitation minière ainsi que du caractère corrosif des liquides injectés, le patron d'injection et de pompage se doit d'éviter les fuites à l'extérieur de la zone du gisement exploitée. L'auteur propose différents patrons d'injection et de pompage à la figure qui suit.

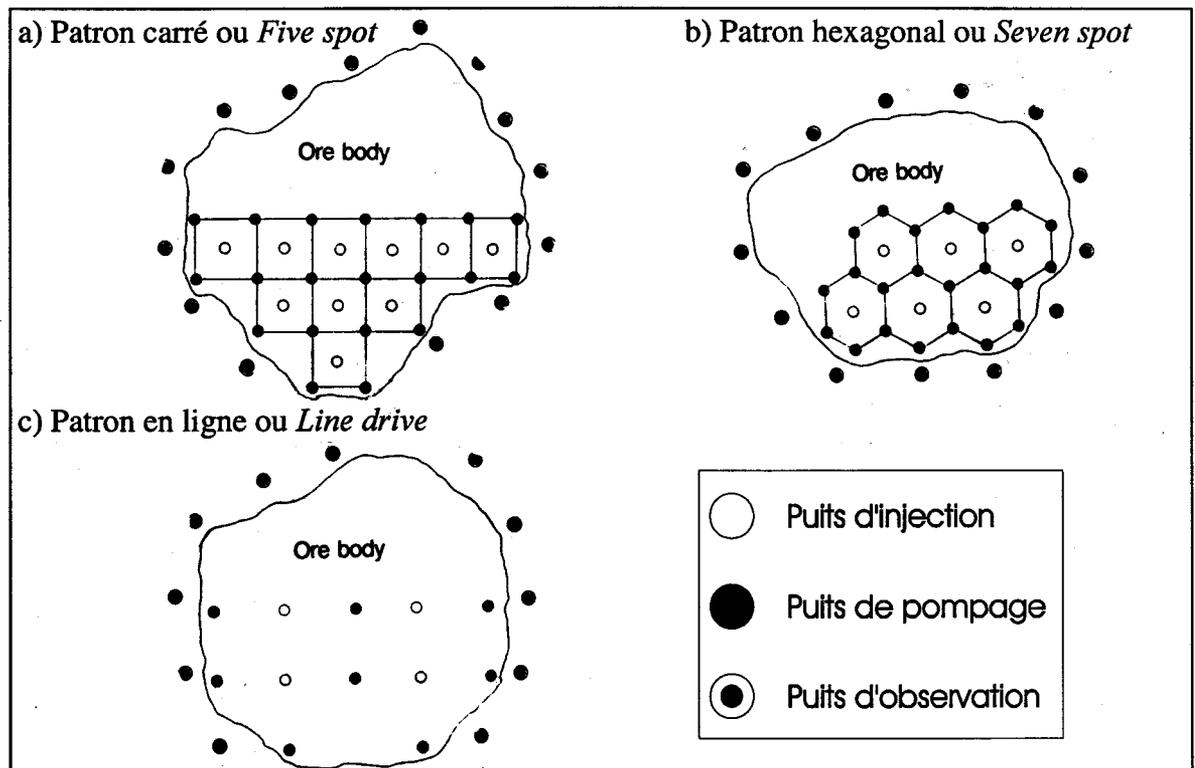


Figure 2.6 : Les patrons d'injection et de pompage (Driscoll, 1986)

Le **patron carré** appelé aussi *Five spot* possède un injecteur au centre et quatre puits de pompage (producteurs) en périphérie de la cellule. Puisque l'écoulement est radial en condition d'injection et de pompage, ce patron a le désavantage de ne pas couvrir toute la surface carrée. Le **patron hexagonal** ou *Seven spot*, a une forme quasi circulaire de sorte que, à l'opposé du patron carré, le balayage permettra d'atteindre la quasi totalité de la cellule. Le **patron en ligne** ou *Line drive*, consiste en un alignement de puits. L'exemple de la Figure 2.6 montre une séquence d'un injecteur entre deux producteurs mais elle peut consister également en une ligne complète d'injecteurs comprise entre deux lignes complètes de producteurs. Le patron en ligne a l'avantage de permettre facilement l'interversion des puits d'injection et de production et de bénéficier du gradient d'écoulement naturel. Cependant, de par sa forme, il présente le désavantage d'un balayage incomplet lorsqu'un écoulement radial est induit.

Domenico et Schwartz (1990) ont étudié les principes de contrôle hydraulique pour la décontamination d'aquifères. Ils se sont penchés particulièrement sur la problématique des contaminants organiques et proposent différentes méthodes de contrôle hydraulique qui tiennent compte de la miscibilité des produits dans l'eau.

Pour les contaminants miscibles dans l'eau, comme par exemple les composés phénoliques (Howard, 1989), la méthode de contrôle usuelle consiste à pomper l'aquifère pour extraire les contaminants. Cette méthode appelée aussi *pump and treat* est très efficace pour ce type de produits et peut parfois résulter en une restauration complète de l'aquifère. En ce qui a trait aux contaminants immiscibles, ils peuvent être insolubles et plus légers (LIL, *LNAPL*) ou plus denses que l'eau (LID, *DNAPL*). La phase légère appelée aussi phase flottante peut être contrôlée à l'aide du pompage. La Figure 2.7 montre un exemple de récupération d'une phase flottante d'hydrocarbures.

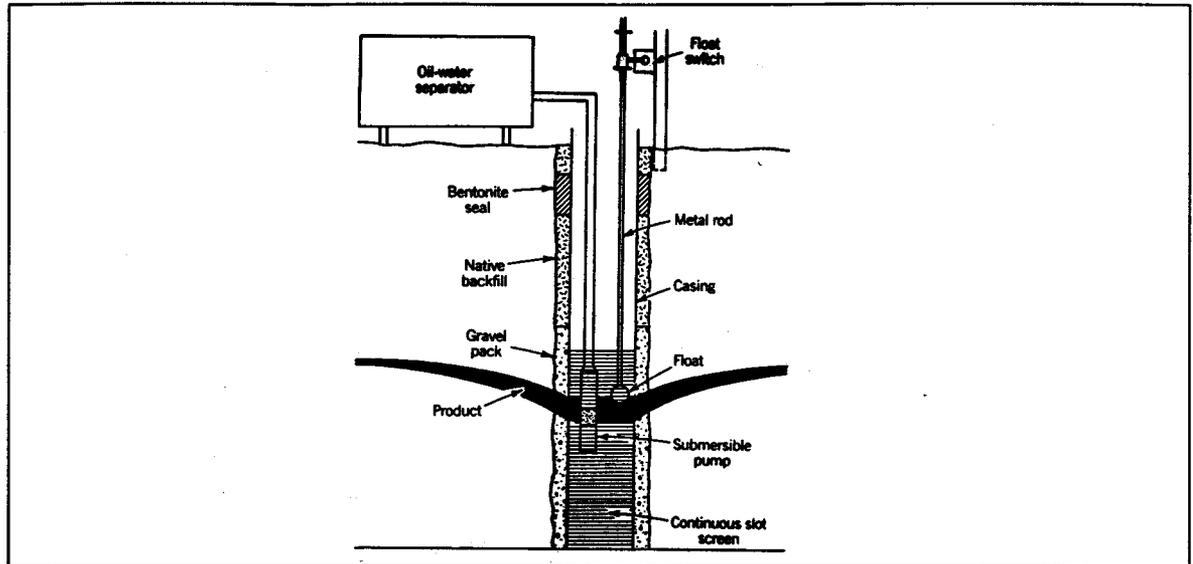


Figure 2.7 : Un exemple de récupération d'une phase flottante d'hydrocarbures (Domenico et Schwartz, 1990)

Comme le montre cette figure, la phase flottante (en noir) se retrouve à la surface de la nappe. Comme cette phase est plus légère que l'eau, la méthode usuelle pour récupérer la contamination de ce type consiste à placer un puits à l'interface entre l'eau et la phase flottante. Une variante peut être apportée à ce système avec l'utilisation d'une pompe submersible placée dans la phase libre et d'une autre placée dans l'eau, ce qui permet de limiter encore plus le pompage de grandes quantités d'eau. Javandel et al (1984), présentent une méthodologie permettant de faire la conception optimale d'un tel système de pompage comprenant un ou plusieurs puits.

En ce qui concerne les contaminants plus denses que l'eau, l'installation du puits sera complètement différente. En effet, puisque ce type de fluide a tendance à migrer vers le bas, il s'écoulera jusqu'à l'atteinte d'un horizon imperméable. Pour pouvoir capter cette phase lourde, le puits doit être crépiné jusqu'au contact de l'aquifère contaminé et d'une couche imperméable. Dans la mesure du possible, une pompe submersible devrait être installée à la base du puits dans la phase organique dense.

La récupération assistée utilisant l'injection de solutions tensioactives est également considérée comme un type de contrôle hydraulique puisque qu'il s'agit d'une technique d'injection et de pompage. Il existe aussi d'autres méthodes de contrôle hydraulique qui

ne s'appliquent cependant pas au présent projet comme la construction de tranchées d'interception, la construction de murs de confinement. Dans tous les cas de contrôle hydraulique, un des outils utilisé pour choisir et optimiser la méthode de décontamination choisie est la modélisation numérique. Ce sujet fait l'objet des discussions de la prochaine section.

2.4 LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE

Les éléments abordés dans cette section sont tirés principalement d'Anderson et Woessner (1992).

2.4.1 La définition d'un modèle

En hydrogéologie, un modèle est une représentation simplifiée des caractéristiques physiques et hydrauliques d'un terrain (Figure 1.3). Il existe trois types de modèles : physique, mathématique et conceptuel.

Un exemple de modèle physique est la réalisation d'essais en colonne au laboratoire pour évaluer les propriétés physiques d'un terrain. Le modèle mathématique, pour sa part, peut être soit de type analytique ou numérique. La loi de Darcy, l'équation de Theis seraient des exemples de modèles mathématiques analytiques alors que les programmes informatiques tel que le logiciel MODFLOW© (McDonnald, Harbaugh, 1988 ; Prudic, 1989) font partie des modèles mathématiques numériques utilisés en hydrogéologie. Enfin, le modèle conceptuel est un modèle schématique permettant de représenter de façon visuelle le terrain à l'étude. Le modèle numérique est l'outil qui a été retenu pour connaître les caractéristiques hydrauliques et l'écoulement des eaux souterraines sur le terrain étudié. Par ailleurs, les modèles analytique et conceptuel ont également été utilisés pour connaître certaines caractéristiques physiques du terrain.

Les modèles numériques aident à la prédiction, l'interprétation et la compréhension des conditions hydrogéologiques d'un terrain. La modélisation numérique est un outil très important en hydrogéologie et elle doit être utilisée avec rigueur afin d'obtenir des réponses réalistes. Pour ce faire, Anderson et Woessner (1992) proposent une méthodologie reposant sur plusieurs étapes qui sera d'ailleurs reprise pour la conception de l'essai pilote de restauration (chapitres 4 et 5).

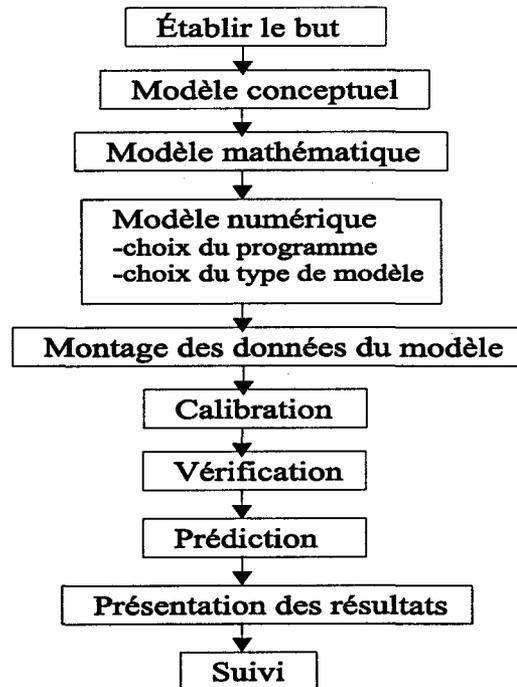


Figure 2.8 : Les étapes de la méthodologie utilisée pour la modélisation numérique (Anderson et Woessner, 1992)

2.4.2 Les équations de base de la modélisation numérique

2.4.2.1 Les équations de base

Anderson et Woessner (1992) indiquent que les équations de base qui régissent le comportement d'un système hydrogéologique peuvent être regardées sous deux angles différents, soit à l'échelle de l'aquifère ou de l'écoulement.

À l'échelle de l'aquifère, la notion de nappe libre ou captive en deux dimensions (2D) est prédominante. Les solutions analytiques de Thiem, Theis et Jacob ou la simulation d'un écoulement horizontal dans des aquifères à nappe libre ou captive sont des exemples de modèles à l'échelle de l'aquifère. Il en est de même pour les aquifères semi-captifs qui peuvent être représentés par un modèle quasi tridimensionnel où la couche confinante de l'aquifère est remplacée par la drainance. La drainance représente l'écoulement vertical à travers la couche qui recharge la nappe semi-captive sous-jacente. L'équation d'écoulement qui représente la modélisation à l'échelle de l'aquifère est :

$$\frac{\partial\left(T_x \frac{\partial h}{\partial x}\right)}{\partial x} + \frac{\partial\left(T_y \frac{\partial h}{\partial y}\right)}{\partial y} = S \frac{\partial h}{\partial t} - R + L \quad (\text{éq. 2.13})$$

où T = transmissivité
 h = charge hydraulique
 S = emmagasinement
 R = recharge
 L = drainance (leakage factor)
 avec $L = -K'_z (h_{\text{source}} - h/b')$
 b = épaisseur saturée de l'aquifère

Pour une nappe captive, $T = Kb$. Pour une nappe libre, $T = Kh$, $L = 0$ et $S = S_y$, soit la porosité de drainage. Il s'agit alors de l'équation de Boussinesq lorsque ces valeurs (L, S_y) sont intégrées à l'équation 2.13.

Une forme simplifiée de l'équation 2.13 considère des conductivités hydrauliques égales en x et en y ainsi que le terme de droite de l'équation 2.13 égal à 0. Cet dernier postulat signifie que la somme des intrants (R et L) et des extrants (S) sont égaux ou en d'autres termes qu'il n'y a pas de variation de charge dans le système. Ainsi simplifiée, l'équation 2.13 prend la forme d'une équation de Laplace qui s'écrit :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{éq. 2.14})$$

En ce qui a trait aux aquifères étudiés du point de vue de l'écoulement ou en trois dimensions (3D), toutes les couches stratigraphiques sont représentées par le modèle. Par exemple, les couches confinantes seront modélisées et non remplacées par une drainance et la conductivité hydraulique verticale (K_z) sera utilisée. L'équation d'écoulement de ce type de modèle est :

$$\frac{\partial\left(K_x \frac{\partial h}{\partial x}\right)}{\partial x} + \frac{\partial\left(K_y \frac{\partial h}{\partial y}\right)}{\partial y} + \frac{\partial\left(K_z \frac{\partial h}{\partial z}\right)}{\partial z} = S \frac{\partial h}{\partial t} - R \quad (\text{éq. 2.15})$$

Anderson et Woessner (1992) indiquent que les équations 2.13 et 2.15 peuvent être présentées sous une forme plus générale pour tenir compte des différences de densité et de viscosités des fluides à l'aide de la relation $K = k \rho g / \mu$ et $h = z + p / \rho g$. Les équations 2.13 et 2.15 telles que présentées sont simplifiées et s'appliquent au cas d'une seule phase liquide dans un aquifère. Comme l'aquifère qui doit faire l'objet d'une décontamination sur la propriété Domtar présente plus d'un fluides (eau, BPC, solutions tensioactives etc), nous utiliserons l'équation générale qui tient compte de la viscosité pour faire la conception de l'essai pilote de restauration (sections 4.2.1 et 5.3.2).

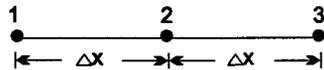
2.4.2.2 Les méthodes numériques

En général, les modèles analytiques sont privilégiés par les spécialistes en hydrogéologie parce qu'ils sont rapides et simples d'utilisation. L'hydraulique des puits est l'exemple le plus courant d'utilisation des solutions analytiques (Theis, Jacob ou Neuman). Les solutions analytiques ont cependant le désavantage de simplifier et d'éloigner le modèle des conditions prévalant sur le terrain. Un exemple de cela est la détermination de l'écoulement des eaux souterraines. La dynamique des eaux souterraines est complexe à évaluer par des solutions analytiques et s'avère mieux représentée à l'aide de la modélisation numérique. C'est une des raisons qui a motivé le choix de cet outil pour faire la conception de l'essai pilote de restauration.

Le principe de la modélisation numérique consiste d'abord à discrétiser le domaine étudié, c'est-à-dire à le diviser en plan et en coupe afin d'obtenir un grand nombre de subdivisions finies appelées mailles et dont l'intersection commune avec une autre maille s'appelle noeud. Une fois le domaine discrétisé, une équation aux dérivées partielles est attribuée à chacune des mailles ou à chaque noeud selon que le modèle numérique est par différences finies ou éléments finis. La charge hydraulique (h) est ensuite calculée à chaque maille ou noeud pour obtenir le réseau d'écoulement du domaine. Les équations simplifiées d'écoulement (2.13, 2.14 ou 2.15) peuvent être utilisées pour trouver la charge hydraulique à chacun des points. La combinaison des équations aux dérivées partielles mène à la création d'un système matriciel d'équations qui peut être résolu soit de façon algébrique (" n " équations et " n " inconnues) soit par itération (méthode de Gauss-Seidel par exemple) ou par une combinaison des deux, à l'aide d'un programme informatique. Les deux méthodes de discrétisation les plus utilisées en modélisation numérique sont les **différences finies (DF)** et les **éléments finis (EF)**. Dans les deux cas, elles consistent à substituer une valeur finie à une dérivée partielle afin de calculer la charge hydraulique.

La plupart des modèles numériques par différences finies calculeront la charge hydraulique au centre d'une maille. La dérivée partielle qui proviendrait de l'équation d'écoulement simplifiée de Laplace (éq. 2.14) peut être approximée de la façon suivante :

Exemple 1 : Noeuds (1, 2, 3)



$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}\right)_2 = \frac{h_1 + h_3 - 2h_2}{\Delta x^2} \quad (\text{éq. 2.16})$$

Selon la définition de l'équation de Laplace en une dimension on obtient :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0 = \frac{h_1 + h_3 - 2h_2}{\Delta x^2} \quad (\text{éq. 2.17})$$

$$\text{d'où : } h_2 = \frac{h_1 + h_3}{2} \quad (\text{éq. 2.18})$$

Cette simplification montre que la charge en un point est la moyenne de la charge des points adjacents. Sans entrer dans le détail de la démonstration complète, Anderson et Woessner (1992) arrivent, à partir de l'équation de Laplace, aux équations algébriques simplifiées de l'écoulement au point "i" en une, deux et trois dimensions.

$$1 \text{ D : } h_i = \frac{(h_{i-1} + h_{i+1})}{2} \quad (\text{éq. 2.19})$$

$$2 \text{ D : } h_i = \frac{(h_{i+1,j} + h_{i-1,j}) + (h_{i,j+1} + h_{i,j-1})}{4} \quad (\text{éq. 2.20})$$

$$3 \text{ D : } h_i = \frac{(h_{i+1,j,k} + h_{i-1,j,k}) + (h_{i,j+1,k} + h_{i,j-1,k}) + (h_{i,j,k+1} + h_{i,j,k-1})}{6} \quad (\text{éq. 2.21})$$

Le logiciel MODFLOW© (McDonnald, Harbaugh, 1988 ; Prudic, 1989) est un exemple de modèle en trois dimensions qui utilise la méthode de calcul par différences finies avec les équations générales non simplifiées. En ce qui concerne la méthode des éléments finis, elle agit selon le même principe que celle des différences finies sauf que la charge hydraulique est calculée au noeud plutôt qu'au centre d'une maille. La principale différence entre les deux types de discrétisation est que l'endroit où la charge est calculée peut correspondre ou pas à celui où le flux est calculé. Enfin, que ce soit en différences ou en éléments finis, un système est toujours composé de plusieurs équations algébriques (matrice de "n" équations à "n" inconnues) résolues selon les méthodes matricielle ou par itération.

2.4.3 Le modèle conceptuel

La première étape d'une modélisation analytique ou numérique est de représenter le système étudié de façon schématique. Ce type de représentation graphique constitue le modèle conceptuel et a pour but la représentation des conditions d'un milieu le plus

justement et le plus simplement possible pour permettre l'étude de son comportement hydrogéologique. Certaines informations générales sont nécessaires pour l'établissement du modèle conceptuel. Il s'agit de la définition des unités hydrostratigraphiques, du calcul du bilan de masse des fluides (zones de recharge, de décharge...) et enfin de la définition du réseau d'écoulement. Le Tableau 2.4 présente certains outils aidant à colliger les informations nécessaire pour établir le modèle.

Tableau 2.4 : Les outils servant à l'établissement d'un modèle conceptuel

Unités hydrostratigraphiques	Bilan de masse	Réseau d'écoulement
Cartes topographiques	Cartes topographiques avec les cours d'eau et les lacs	Cartes topographiques avec les cours d'eau et les lacs
Cartes géologiques et coupes stratigraphiques	Hydrographes des fluctuations du niveau des cours d'eau et des lacs	Cartes piézométriques des différentes unités hydrostratigraphiques
Cartes d'isocontours montrant l'épaisseur des unités géologiques	Intrants au système : recharge, précipitations	Cartes d'isocontours montrant l'épaisseur des unités géologiques
	Extrants au système : évapotranspiration, résurgence	Données de conductivités hydrauliques
		Données sur les activités anthropiques (pompage, puits domestiques, géochimie...)

Le modèle conceptuel peut être représenté de différentes façons en fonction de la complexité du système et selon qu'on l'étudie du point de vue de l'aquifère ou de l'écoulement (section 2.4.2.1). Les modèles en deux dimensions (2D) en plan ou en coupe sont caractéristiques d'un examen basé sur l'aquifère alors que ceux en trois (3D) ou quasi trois dimensions sont typiques d'une référence à l'écoulement. Les discussions qui

suivent portent sur l'impact du choix de la représentation dimensionnelle (1D, 2D...) pour différents aquifères (captif, semi-captif avec une couche confinante, libre et mixte).

Modèle 2D en plan

La particularité d'un modèle 2D en plan est que le système est monocouche. À cet égard, un seul aquifère à la fois peut être étudié et les autres unités sont représentées soit par une limite imperméable ou de toute autre façon qui permet de tenir compte du flux qui caractérise la couche.

Pour un aquifère captif, ce type de modèle implique l'assignation de la transmissivité (T) et de l'emmagasinement (S) pour chaque cellule. Comme il a été vu précédemment, $T = Kb$ avec K et b mesurés et $S = S_s b$ avec S_s représentant l'emmagasinement spécifique.

Un aquifère semi-captif est caractérisé par la présence d'une couche semi-confinante sus-jacente. Cette couche a une faible conductivité hydraulique mais, est suffisamment perméable pour transmettre de l'eau à cet aquifère. Comme l'écoulement vertical n'est pas représenté en 2D, la couche confinante sera caractérisée par un facteur de drainance.

Un aquifère à nappe libre est défini non pas par son emmagasinement mais par sa porosité de drainage (n_D) appelée aussi "specific yield" (S_y).

Modèles 3D et quasi 3D

Le modèle 3D est multicouches contrairement à celui en 2D. Chacune des couches peut être représentée de façon spécifique. Le meilleur exemple de ceci est la couche semi-confinante qui, en 2D, est remplacée par un facteur de drainance alors qu'en 3D elle possède sa géométrie (épaisseur) et ses propriétés hydrogéologiques (K , T ...) propres.

Modèle 2D en coupe

Ce type de modèle est très utile dans les systèmes où intervient une forte composante d'écoulement vertical. C'est le cas par exemple des nappes libres ou des couches d'argile dont on voudrait vérifier la vitesse de migration de l'eau. Dans ce type de modèle, il faut porter une attention particulière aux paramètres qui s'appliquent ordinairement à une surface horizontale, comme la recharge par exemple, et convertir ces paramètres pour qu'ils soient ajustés à un système en coupe. Anderson et Woessner (1992) présentent les méthodes permettant de réaliser les conversions nécessaires pour modéliser en coupe.

2.4.4 Le montage des données du modèle : le maillage et les paramètres de base

2.4.4.1 Le maillage

En analyse par différences finies, il existe deux types de maillage soit centré ou nodal. Le maillage centré est le plus utilisé et c'est d'ailleurs celui qui est intégré au logiciel MODFLOW®. Dans ce cas, le flux est appliqué aux parois alors que la conductivité hydraulique s'exerce au centre d'une cellule. Le maillage nodal touche simultanément le flux et la conductivité hydraulique aux parois d'une cellule. La Figure 2.9 montre un exemple de ces deux types de maillage.

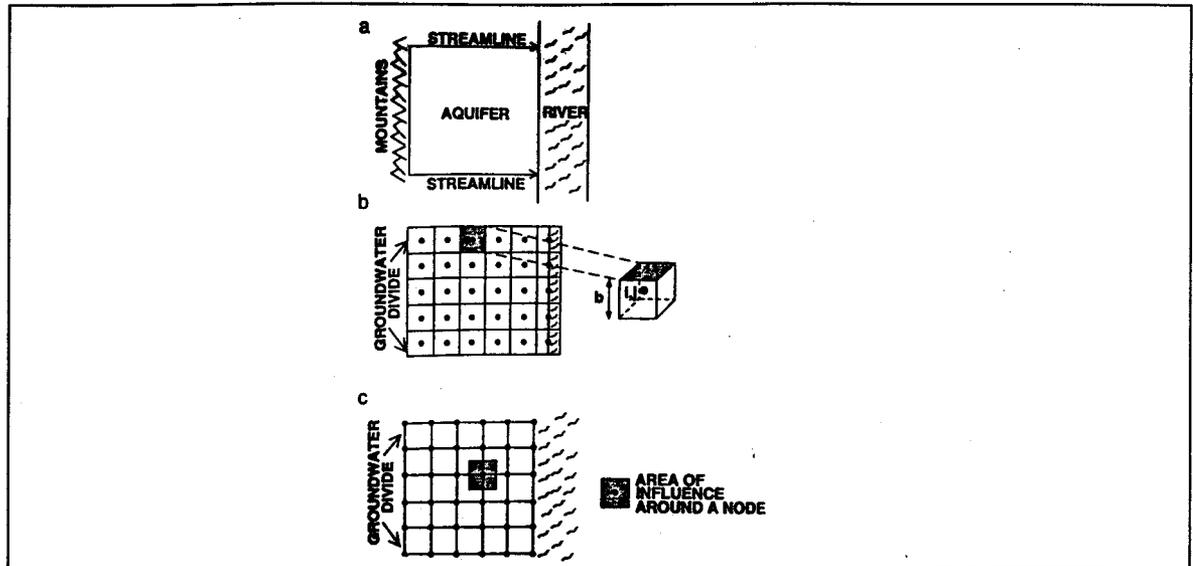


Figure 2.9 : Deux types de maillages en modélisation numérique (Anderson et Woessner, 1992)

L'élément principal à considérer lors de l'établissement d'un maillage est son orientation dans l'espace. Anderson et Woessner (1992) font plusieurs suggestions pour orienter le maillage de façon à rendre le modèle le plus représentatif possible de la réalité. Dans le cas des différences finies, les auteurs suggèrent que les conductivités hydrauliques soient le plus possible colinéaires avec les axes du maillage, c'est-à-dire K_x , K_y et K_z parallèles avec les axes x , y et z respectivement. Le choix d'un maillage carré est en général recommandé, quoique moins pratique dans le cas de l'hydraulique des puits où on doit raffiner le domaine.

2.4.4.2 Les paramètres de base

Les paramètres d'un modèle réfèrent à la géométrie et à l'hydrogéologie d'un milieu. La géométrie inclut des paramètres tels que l'épaisseur et l'étendue latérale des unités géologiques. La conductivité hydraulique (K) est le principal paramètre hydrogéologique à considérer. Elle est liée à la perméabilité (k) et la transmissivité (T). Les autres propriétés hydrogéologiques importantes sont l'emmagasinement (S), l'emmagasinement spécifique (S_s), la porosité de drainage (n_D ou S_y), la porosité (n), la charge hydraulique (h), la recharge (R) et le flux (q).

Dans le cas où les propriétés d'un milieu ne sont pas connues sur toute l'étendue du domaine étudié, elles peuvent être déterminées par interpolation. La recharge et la conductivité hydraulique sont des paramètres qui font régulièrement l'objet d'interpolation. Dans ses travaux de modélisation de l'écoulement de l'eau souterraine dans le roc sur l'Île de Montréal, Lepage (1996) a d'ailleurs utilisé une méthode d'interpolation pour fixer la recharge.

Anderson et Woessner (1992) font mention d'une méthode très fiable d'interpolation qui est celle du krigeage. Cette méthode est utilisée depuis déjà plusieurs années dans le domaine de l'exploitation minière pour faire des prédictions sur l'étendue d'un gisement et a trouvé des applications en hydrogéologie. En résumé, le krigeage est une méthode statistique d'interpolation qui permet de choisir le meilleur estimé linéaire (*best linear unbiased estimate, BLUE*) à l'aide d'un variogramme. Le krigeage a la particularité de considérer la structure spatiale de la variable interpolée et procure également un estimé de l'erreur d'interpolation sous la forme d'un écart type en préservant les valeurs initiales.

2.4.5 Les conditions aux limites

Les limites d'un domaine constituent la considération la plus importante dans l'établissement d'un modèle. En effet, ce sont elles qui régissent le comportement de la charge hydraulique tout au cours du processus de modélisation et servent de base aux calculs du modèle. Anderson et Woessner (1992) proposent de choisir la grandeur du domaine à l'aide d'une solution analytique pour déterminer si les limites fixées peuvent être influencées par les changements qui surviendraient en cours de simulation. Ils proposent également d'utiliser les limites hydrauliques d'une carte piézométrique fiable obtenue à partir de données étalées sur plusieurs années.

Une fois la dimension et l'orientation du domaine déterminées, les conditions aux limites peuvent être établies en tenant compte des éléments physiques et hydrauliques rencontrés au site étudié. Le Tableau 2.5 décrit différents types de limites physiques et hydrauliques.

Tableau 2.5 : Les types de limites et de conditions aux limites d'un modèle numérique

Limites physiques		Limites hydrauliques	
Description	Condition	Description	Condition
Horizon imperméable	Limite imperméable	Ligne de partage des eaux	Limite imperméable
Faïlle	Limite imperméable	Ligne d'écoulement	Limite imperméable
Interface eau salée eau douce	Limite imperméable	Ligne équipotentielle	Limite à charge imposée
Rivières, lacs	Limite à charge imposée ou variable	Différence de K d'au moins deux ordres de grandeur	Limite imperméable
		Unité stratigraphique avec un très faible gradient hydraulique	Limite imperméable

Le logiciel MODFLOW© définit les différentes limites de la façon suivante :

- | | |
|---|---|
| 1. Limite à charge ou flux imposés | Charge ou flux constants durant toute la modélisation |
| 2. Limite à charge ou à flux variables | Charge ou flux calculés par itération et qui changent durant toute la modélisation |
| 3. Limite imperméable | Flux nul, cellule inactive |

Une limite à charge imposée est similaire à un apport d'eau "inépuisable" ou à une perte d'eau selon le cas, ce qui peut signifier une recharge ou une décharge homogène dans le temps. Tel qu'il est montré au Tableau 2.5, une rivière est un type de limite hydraulique pouvant être représenté par une charge imposée. Une limite à charge variable signifie que la charge variera dans le temps au cours de la simulation. Généralement, l'ensemble du domaine, à l'exclusion des limites, ont cette assignation. Il faut mentionner qu'en régime permanent, le modèle MODFLOW© nécessite la présence d'au moins une cellule à charge imposée pour être opérationnel. En ce qui a trait aux limites reliées au flux, Anderson et Woessner (1992) mentionnent qu'elles sont généralement utilisées pour

décrire la présence d'un puits d'injection ou bien la recharge et la décharge. Lorsque le flux est imposé et non nul, il peut représenter la recharge ou une rivière par exemple. Par contre, lorsqu'il a une valeur imposée à zéro, cela signifie qu'il n'y a pas d'écoulement représentant ainsi une limite imperméable. Une ligne de courant ou de partage des eaux sont des exemples de limites hydrauliques imperméables (Tableau 2.5). Dans ce cas, la cellule est considérée inactive et sera exclue du calcul itératif.

2.4.6 La calibration et la précision du modèle

La calibration est cette étape qui permet de valider les données du modèle numériques obtenues lors des simulations. Une façon de valider ces données consiste à évaluer l'erreur rattachée à la modélisation. Anderson et Woessner (1992) présentent quelques méthodes pour évaluer cette erreur.

A) Les erreurs liées à la modélisation numérique

1. **Bilan de masse** : une comparaison entre les intrants et les extrants en terme de flux peut être faite aux limites du modèle calibré. Le bilan de masse donne l'information sur les taux de recharge et de décharge d'un aquifère. Idéalement cette erreur devrait être de 1 % ou moins (recharge - décharge / recharge).
2. **Erreur de résolution numérique** : en différences finies, l'utilisation d'une résolution par itération génère une erreur résiduelle d'itération. Dans ce cas, il est nécessaire de spécifier un critère de convergence suffisamment précis pour assurer un bilan de masse adéquat. L'itération arrête lorsque le critère de convergence fixé est atteint.

B) Les erreurs calculées en cours de calibration

La calibration est un processus long et fastidieux. Elle consiste à tester différents paramètres (conditions aux limites, conductivité hydraulique, recharge, géométrie...) qui permettent d'obtenir des charges et des flux les plus rapprochés des celles mesurées sur le

terrain à l'intérieur d'une certaine marge d'erreur. Certains programmes permettent de réaliser la calibration de façon automatisée mais, la méthode par essais et erreurs est encore la plus utilisée à ce jour.

Anderson et Woessner (1992) indiquent que la qualité de la calibration par essais et erreurs peut être évaluée de deux façons. La première façon consiste à comparer la carte piézométrique obtenue à partir de données réelles aux isoncontours obtenus avec le modèle numérique. Ceci donne une première idée générale des erreurs possibles mais n'indique pas la précision de cette erreur. C'est la raison pour laquelle ils proposent d'évaluer statistiquement les erreurs à l'aide de trois critères de calibration qui sont :

1. Erreur moyenne (*mean error ME*) $= 1/n \sum (h_{\text{mesuré}} - h_{\text{simulé}})$
2. Erreur moyenne absolue (*mean absolute error MAE*) $= 1/n \sum \text{abs} (h_{\text{mesuré}} - h_{\text{simulé}})$
3. Écart type (*root mean square RMS*) $= [1/n \sum (h_{\text{mesuré}} - h_{\text{simulé}})^2]^{0,5}$

En général, la simulation qui présentera les trois plus petites erreurs (*ME, MAE et RMS*) sera retenu comme modèle calibré. L'erreur *RMS* est cependant considérée la plus fiable des trois évaluations. Pour compléter l'évaluation de la calibration, les erreurs peuvent être représentées graphiquement ou en plan comme l'a d'ailleurs fait Lepage (1996) dans la modélisation de l'écoulement de l'eau souterraine dans le roc sur l'île de Montréal.

Le dernier aspect de la calibration est l'analyse de sensibilité. Le but de l'analyse est de quantifier l'incertitude de l'estimation des paramètres dans le modèle calibré. À partir des données calibrées, les valeurs de conductivité hydraulique (*K*), d'emmagasinement (*S_s*), de recharge (*R*) ainsi que les conditions aux limites sont changées selon une plage plausible et les variations d'erreurs *ME, MAE et RMS* sont analysées. Les variations dans les erreurs donnent un indice de la fiabilité des postulats de départ et de la calibration.

2.4.7 Les étapes postcalibration

Selon la Figure 2.8, les étapes postérieures à la calibration sont : la vérification du modèle, la prédiction, la présentation des résultats et le postaudit.

La vérification du modèle consiste tout simplement à le mettre en pratique dans des cas concrets. Par exemple, les solutions analytiques de Neuman ou de Thiem portant sur l'hydraulique d'un puits peuvent être simulées. La vérification introduit habituellement des conditions de régime transitoire.

La prédiction est un élément important de la modélisation numérique qui la distingue d'ailleurs avantageusement de la modélisation analytique particulièrement dans la résolution de cas à géométrie complexe. Les objectifs visés par la prédiction sont d'aider à visualiser l'écoulement futur et à connaître le devenir des particules dans le milieu par exemple. Les logiciels actuels sont performants pour prédire le transport des contaminants par advection³. Pour le transport par advection-dispersion-réaction chimique, ils ne le sont pas autant parce qu'il s'agit de processus complexes à évaluer avec les solutions analytiques et encore plus de façon numérique.

Enfin, la présentation des résultats et le postaudit sont deux étapes importantes pour permettre un suivi de la validité du modèle dans le temps. En effet, le suivi des résultats permet d'ajuster le modèle initial afin de le coller aux conditions réelles du terrain qui deviennent de mieux en mieux définies avec l'acquisition de données.

³advection = Loi de Darcy i.e. $v = K \text{ grad } h / n_e$ avec n_e = porosité effective

CHAPITRE 3

LA CARACTÉRISATION DU SITE

3.1 LE CONTEXTE GÉNÉRAL

La modélisation numérique nécessite l'acquisition de données de terrain fiables afin d'avoir un modèle numérique le plus représentatif possible de la réalité. Une partie importante de mon projet de recherche a donc porté sur la réalisation de travaux de terrain et la revue des informations provenant d'études antérieures.

En juin 1996, une caractérisation exhaustive des sols et de l'eau souterraine a été réalisée à l'endroit des salles de fournaies, où doit se dérouler l'essai pilote. En décembre 1996, un essai de pompage ainsi que des travaux préparatoires à l'essai pilote ont été effectués au même endroit. L'ensemble de ces travaux font l'objet d'un rapport distinct (Roy, 1997). Des travaux ont également été réalisés avant 1996 pour le compte de la compagnie Domtar par des consultants en environnement. Le présent chapitre résume les principales données qui serviront à monter le modèle numérique au chapitre 4. La liste des différents travaux ayant eu lieu sur la propriété Domtar est donnée au Tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Description des travaux de caractérisation environnementale réalisés sur la propriété Domtar

	Auteurs des travaux	Description
1	Environmental Strategies Limited (ESL), 1990	Caractérisation de la propriété Domtar à Longford Mills, Ontario et du terrain adjacent
2	ESL, 1992	Caractérisation complémentaire de la propriété Domtar
3	ESL, 1994	Suivi de la qualité de l'eau souterraine sur la propriété Domtar sud
4	Decommissioning consulting services limited (DCS), 1995	Enlèvement de la couche superficielle de sols contaminés dans la salle de fournaies <i>Hot Oil Furnace Room</i>
5	Geophysics GPR International inc., 1996	Levé géoradar pour la détection d'infrastructures dans les salles de fournaies et certains bâtiments sur la propriété Domtar
6 ¹	INRS, Université Laval et Gartner Lee Limited, juin 1996	Caractérisation exhaustive des sols et de l'eau souterraine dans les salles de fournaies sur la propriété Domtar
7 ¹	INRS, Université Laval, décembre 1996	Essai de pompage dans la Hot Oil Furnace Room-HOFR

1 : Travaux réalisés dans le cadre de mon projet de recherche

Les salles de fournaies décrites aux sections 1.1 et 1.2 et appelées Hot Oil Furnace Room (HOFR) et Hot Room (HR) sont les endroits jugés les plus contaminés par les BPC sur la propriété Domtar. La partie de terrain qui fait l'objet d'un essai pilote de restauration *in situ* est située dans la HOFR (Figure 3.1). La localisation des sondages réalisés avant 1996 est montrée à la Figure 1.2. L'annexe B présente la stratigraphie et la conception des puits installés lors des travaux de l'INRS-Géoressources et de l'Université Laval en juin et décembre 1996. Mentionnons qu'un puits supplémentaire (20) a été réalisé dans la parcelle à décontaminer en 1997, soit juste avant la réalisation de l'essai pilote.

Les prochaines sections de ce chapitre porteront sur la stratigraphie, l'hydrogéologie et la contamination du site à l'étude. D'autres travaux non inclus dans mon projet de recherche ont été réalisés en 1997 après la conception de l'essai pilote par le groupe de recherche de l'INRS et de l'Université Laval. Ils ont consisté en une caractérisation complémentaire des sols et de l'eau souterraine sous les bâtiments pour les besoins d'un essai pleine grandeur éventuel.

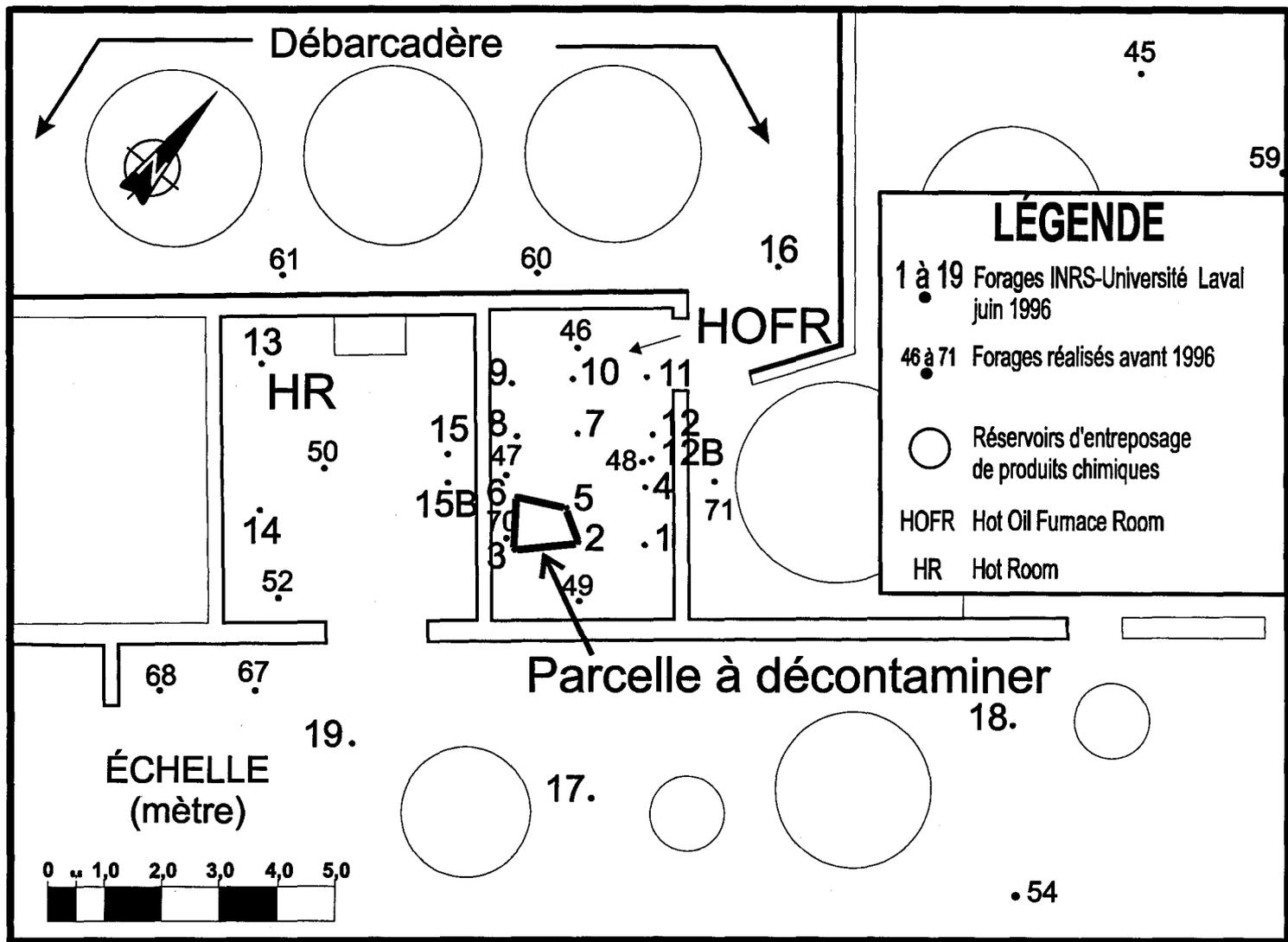


Figure 3.1 : La localisation de l'essai pilote de restauration (HOFR et HR)

3.2 LA STRATIGRAPHIE

La propriété Domtar présente une stratigraphie bien différente selon qu'on se situe à l'extérieur ou sous les bâtiments. La Figure 3.2 représente cette hétérogénéité dans trois secteurs : à l'échelle de la propriété, dans la HOFR et dans la HR. L'annexe B présente la stratigraphie détaillée des sondages réalisés en 1996. Les données stratigraphiques à l'échelle de la propriété proviennent des études 1, 2 et 4 (Tableau 3.1) tandis que celles dans les salles de fournaies, des travaux réalisés par l'INRS et l'Université Laval en 1996 (études 6 et 7). Mentionnons que sous les bâtiments, de nombreuses infrastructures telles que des rails de chemin de fer, des anciennes fondations, des tuyaux ont été interceptées.

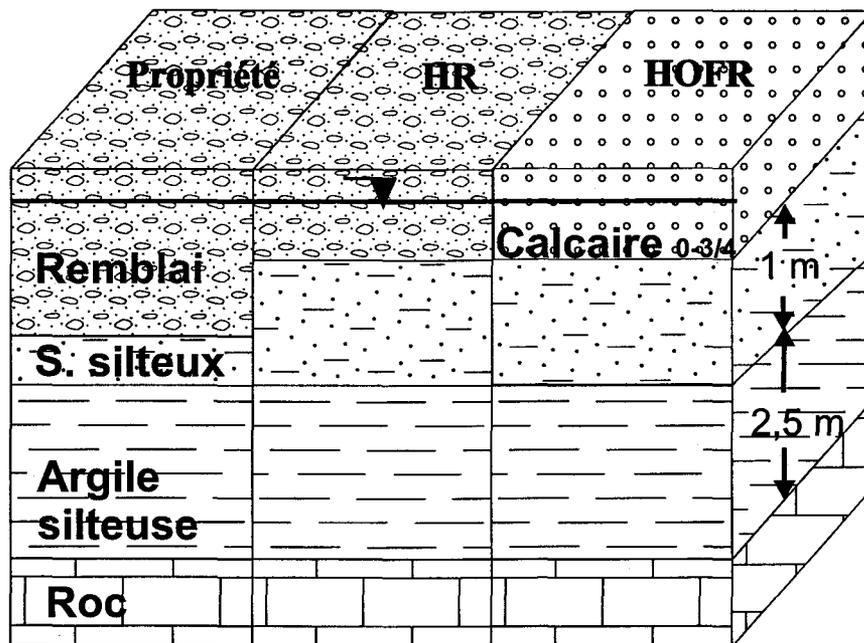


Figure 3.2 : Le modèle conceptuel de la stratigraphie sur la propriété Domtar

3.2.1 L'asphalte et le béton

La propriété est asphaltée sur sa presque totalité sauf à l'endroit des emprises de chemin de fer représentées sur la Figure 1.2. Les bâtiments sont plutôt caractérisés par la présence de béton en surface. Cette information est importante à connaître pour la modélisation numérique puisque la présence d'asphalte a une influence sur la recharge. Nous reviendrons sur cet aspect au chapitre 4. L'épaisseur d'asphalte ou de béton est en moyenne de 0,30 m mais varie de 0 à 2,6 m en général sur la propriété et sous les bâtiments. Dans la **HOFR**, il n'y a plus de dalle de béton depuis la réalisation des travaux d'excavation de 1995 (étude 4, Tableau 3.1).

3.2.2 Le remblai

Un remblai hétérogène est présent sur l'ensemble de la propriété. En dehors des bâtiments, il se compose de sable avec silt, gravier et fragments, indices d'un remaniement des sols lors des nombreux remblayages. Son épaisseur moyenne est d'environ 1 mètre mais peut atteindre jusqu'à 2,1 m de profondeur en certains endroits.

Dans la **HR**, le remblai est constitué d'un mélange de sable silteux avec du gravier, des cailloux, des morceaux de brique et de bois. Son épaisseur moyenne est de 1,05 m. Dans la **HOFR**, la partie superficielle ce remblai a été excavée lors des travaux de restauration réalisés en 1995 (étude 4, Tableau 3.1). La dalle de béton a été enlevée complètement sauf aux coins au sud de la **HOFR**. Les sols contaminés ont été excavés jusqu'à la base de la semelle (footing) soit jusqu'à une profondeur de 1,2 m où un remblai calcaire 0-¾ a été mis en place. La Figure 3.2 montre cette différence de stratigraphie dans la **HOFR** et dans la **HR**.

3.2.3 Le sable silteux

Cette unité peu remaniée serait la plus affectée par la contamination. À l'échelle de la propriété, elle est retrouvée dans presque tous les forages sous le remblai. Son épaisseur est variable mais se situe autour de 1,5 m en moyenne. Contrairement à l'unité sus-jacente, le

sable silteux est généralement saturé en eau. C'est l'unité à travers laquelle se fait principalement l'écoulement de l'eau souterraine.

Dans la **HOFR**, cette unité a une épaisseur d'environ un mètre alors que dans la **HR**, elle varie de 0,56 m à 1,61 m. La topographie du sommet et de la base de cette unité est très variable. L'unité est également caractérisée par la présence d'un mince horizon organique de moins de dix centimètres à la base de l'unité. Il s'agit de bois décomposé probablement d'origine naturelle dont l'aspect rappelle le milieu des tourbières.

3.2.4 L'argile silteuse

Le contraste stratigraphique entre l'argile silteuse et la couche de sable silteux sus-jacente est très marqué tant sur le plan de la granulométrie que de l'aspect physique. En effet, l'argile est très compacte et de couleur grise. L'unité a une épaisseur moyenne de 2,5 m et présente des caractéristiques similaires sur l'ensemble de la propriété et dans les salles de fournaies.

3.2.5 Le roc

Le roc se situe en moyenne à 5 m de profondeur et se compose d'une calcarénite altérée au contact avec l'argile silteuse.

3.3 L'HYDROGÉOLOGIE

3.3.1 Données hydrologiques

Les intrants en eau sur la propriété Domtar viennent de la recharge laquelle est liée aux précipitations, à l'infiltration et au ruissellement ainsi qu'à l'apport des drains de l'usine. Les extrants sont représentés par l'évapotranspiration et la décharge naturelle (lac par exemple). Les études de caractérisation antérieures à 1996 réalisées sur la propriété Domtar

(1, 2, 3 et 4) font un bilan des données hydrologiques régionales. La moyenne des **précipitations** annuelles est de 907 mm basée sur des relevés mensuels de 1951 à 1980 à une station météorologique située à environ 20 km à l'ouest de la propriété. La moyenne annuelle d'**évapotranspiration** est de 505 mm et la **recharge** régionale moyenne annuelle est de 402 mm. Certains auteurs évaluent l'**infiltration** annuelle à 200 mm (étude 2).

Toujours selon ces études, l'évaluation des données hydrologiques de la propriété Domtar indiquent que la recharge locale est inférieure à la recharge régionale anticipée puisque le site est en majeure partie asphalté. Cependant, comme nous expliquerons à la section 3.3.2, l'écoulement souterrain radial à partir du centre de la propriété montre qu'il y a quand même une recharge qui s'effectue. La recharge se ferait vraisemblablement dans les secteurs non asphaltés, notamment les deux voies ferrées situées au centre du terrain et de façon plus locale par les drains d'usine présents un peu partout sur le site. Cet aspect est de première importance pour la modélisation numérique du site et sera repris ultérieurement.

3.3.2 L'hydrogéologie

L'hydrogéologie à l'échelle de la propriété est fortement influencée par la présence de deux lacs importants situés de part et d'autre du site (Figures 1.2 et 1.3). Ces lacs représentent deux zones de décharge reflétées d'ailleurs par un écoulement radial dans les dépôts meubles sur la propriété (Figure 3.3).

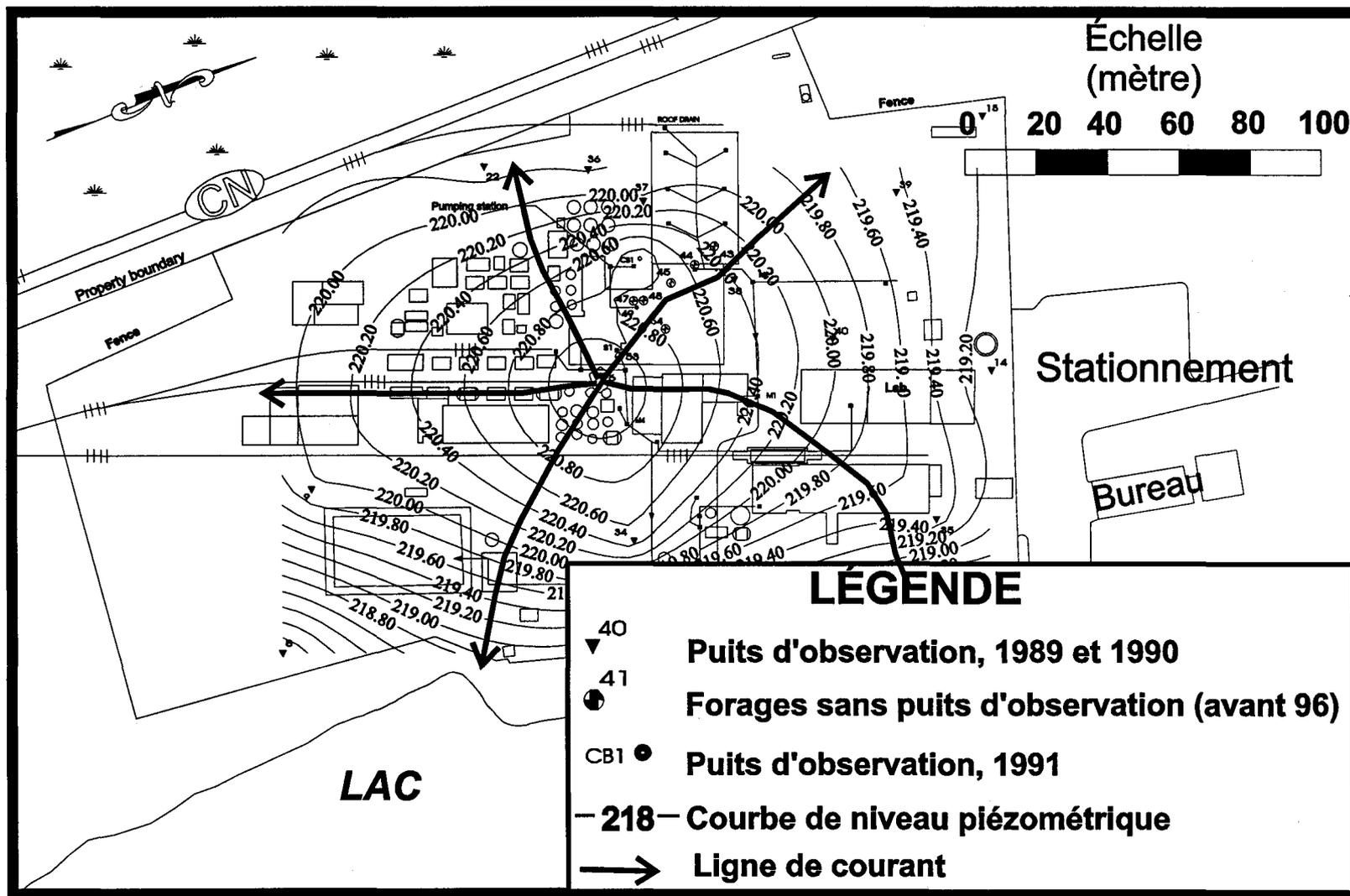


Figure 3.3 : L'écoulement de l'eau souterraine dans les dépôts meubles sur la propriété Domtar

Toujours selon les études antérieures à 1996, une *nappe libre peu profonde* est présente dans le remblai ou au contact avec le sable silteux à des profondeurs variant de 0,5 à 2,8 m. L'écoulement se fait de façon radiale à partir d'un point haut localisé au centre de la propriété à l'endroit du **Puits 6** foré par ESL en 1992 (Figures 1.2 et 3.3). Une emprise ferroviaire constitue la zone de recharge en cet endroit. Les données de niveaux d'eau tirées de l'étude 3 (Tableau 3.1) ont servi à l'élaboration de la carte piézométrique présentée à la Figure 3.3. Les gradients hydrauliques horizontaux calculés dans les dépôts meubles sont de **0,015 m/m à l'ouest** et de **0,01 à 0,02 m/m** avec un maximum de **0,035 m/m à l'est**.

Le secteur de la **HOFR** et de la **HR**, a été étudié plus particulièrement par le groupe de recherche de l'INRS et l'Université Laval en juin et décembre 1996. Le Tableau 3.2 donne les niveaux d'eau enregistrés en juin 1996 qui ont servi à concevoir la carte piézométrique détaillée dans la HOFR (Figure 3.4).

Tableau 3.2 : Les niveaux d'eau et les valeurs de conductivité hydraulique obtenus lors des travaux de juin et de décembre 1996 par l'INRS et l'Université Laval

Puits	Élévation du niveau d'eau statique ¹ (m)	Conductivité hydraulique ² (K) (m/s)
1		
2	220,62	2,41E-06
3	220,74 (31 mai 96)	4,38E-06
4	220,54	2,19E-07
5	220,66	1,66E-06
6	220,69	3,70E-07*
7	220,73	4,20E-07*
8	220,68	1,45E-06
9	220,75	1,89E-06
10	220,79	1,36E-06
11	220,54	3,54E-06
12	220,52	1,27E-06

1 : Par rapport au niveau moyen de la mer (NMM) en juin 1996 sauf indication entre parenthèses.

2 : Les données proviennent des résultats du test hydraulique le plus cohérent (*slug test*, essai de pompage ou remontée). La plupart proviennent du *slug test* sauf celles avec une astérisque (essai de pompage).

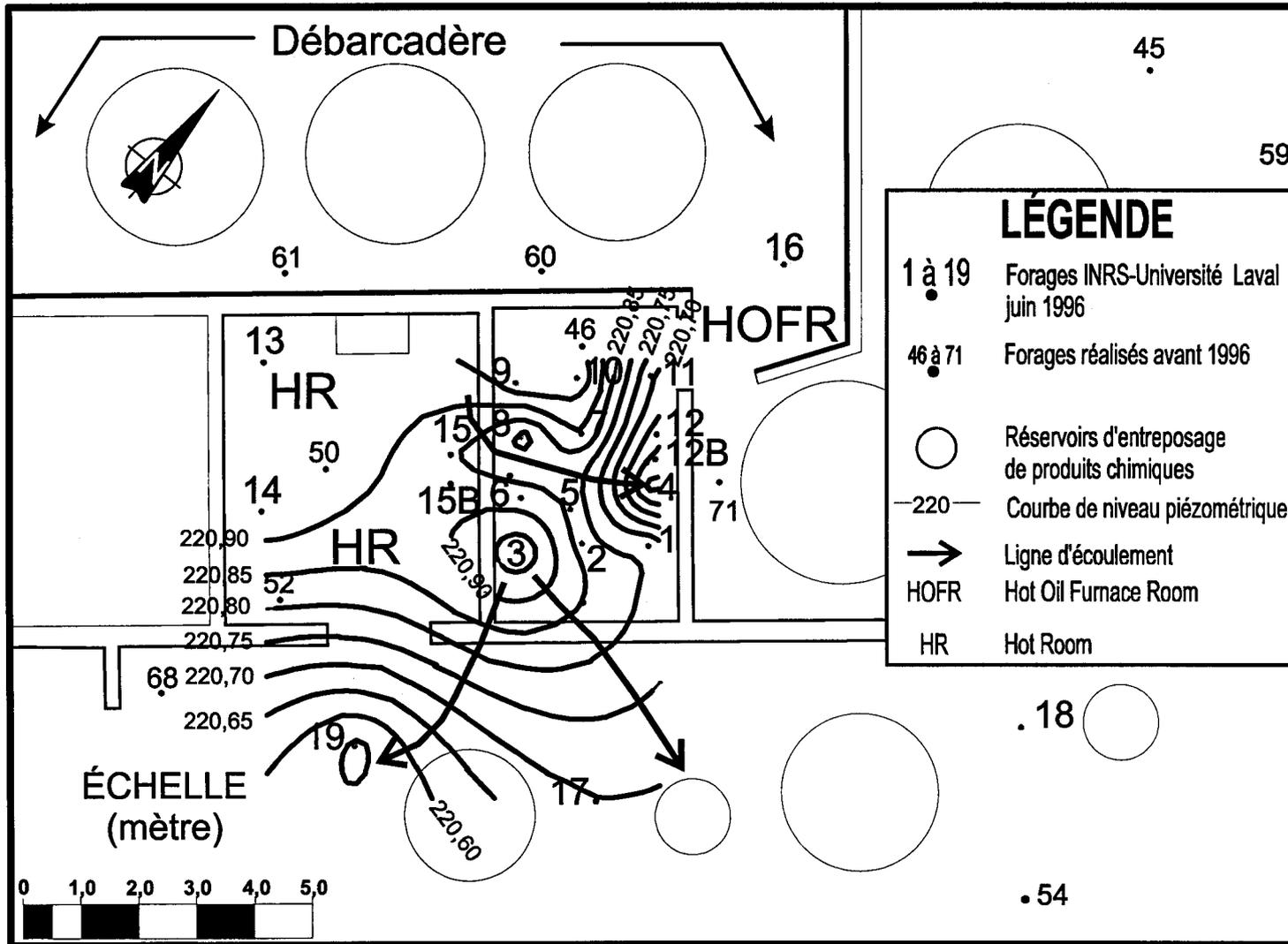


Figure 3.4 : L'écoulement de l'eau souterraine dans l'unité de sable silteux dans le secteur de la HOFR et de la HR

Comme le montre la Figure 3.4, la piézométrie locale présente un comportement bien différent de l'écoulement à l'échelle de la propriété. La complexité de l'écoulement dans le secteur de la **HOFR** et de la **HR** est probablement imputable à la présence de drains et d'anciennes fondations observables sous les bâtiments durant les forages ainsi qu'à une forte variation de la topographie de la base de l'unité de sable silteux. Dans la HOFR, deux points hauts localisés aux puits 3 et 8 et un point bas au puits 4 font converger les eaux souterraines vers ce puits indiquant un écoulement vers l'est. Dans le secteur de la HR, l'écoulement se ferait du point haut 3 vers les points bas aux puits 19 et 15 c'est-à-dire vers le sud et l'ouest respectivement. Cette piézométrie doit être utilisée à titre indicatif compte tenu de la présence de structures souterraines.

Les études 1 à 4 ont permis de connaître les caractéristiques hydrauliques à l'échelle de la propriété et les deux campagnes de juin et de décembre 1996, celles dans le secteur de la HOFR et de la HR. Le Tableau 3.2 présente les valeurs de conductivité hydraulique obtenues soit à partir des essais en bout de tubage (*slugtest*) de juin 96 ou de l'essai de pompage de décembre 96⁴. Le Tableau 3.3 donne un résumé des valeurs de conductivités hydrauliques moyennes obtenues dans différentes unités stratigraphiques sur la propriété.

Tableau 3.3 : Les conductivités hydrauliques moyennes à l'échelle de la propriété et dans le secteur de la HR et de la HOFR

Localisation	Unité stratigraphique	Conductivité hydraulique (K en m/s)
Échelle de la propriété ¹	remblai-sable silteux	$1,15 \times 10^{-5}$
	sable silteux-argile silteuse	7×10^{-7}
	roc	6×10^{-6} à 6×10^{-9}
HOFR et HR ²	sable silteux	$1,6 \times 10^{-6}$

1 : Études 2 et 3, Tableau 3.1 ; 2 : Études 6 et 7, Tableau 3.1

Dans le cas des valeurs à l'échelle de la propriété, il faut mentionner que les crépines des puits interceptaient deux unités stratigraphiques à la fois. Pour cette raison, les conductivités hydrauliques sont plutôt représentatives d'une moyenne entre le remblai et le sable silteux ($K_{\text{remblai-silteux}}$) ou entre le sable silteux et l'argile ($K_{\text{s. silteux-argile}}$).

⁴ Les données des essais en bout de tubage et de pompage ont été interprétées à l'aide du logiciel AQTESOLV© (Duffield G.M., Geraghty and Miller inc., Aquifer test Solver version 2.01, 1995)

3.4 LA CONTAMINATION DES SOLS ET DE L'EAU SOUTERRAINE

Le critère de contamination des sols du ministère de l'Environnement de l'Ontario pour les BPC est de 50 mg/kg ou 0,005 %. Les études de caractérisation ont permis de déceler la présence de contamination en composés phénoliques mais surtout en BPC sous la salle des fournaies où des concentrations allant jusqu'à 3,76 % (37 600 mg/kg) ont été détectées. Des BPC ont également été retrouvés à l'extérieur des bâtiments à l'endroit de structures souterraines.

La Figure 3.5 montre la contamination dans les sols au-delà du critère de 50 mg/kg dans la HOFR et la FR (études 6 et 7). La contamination se retrouve principalement dans l'horizon de sable silteux, sur une épaisseur de 1 mètre aux endroits suivants : dans tous les sondages de la HOFR (1 à 12 et 12B, 46 à 48) et dans certains sondages de la HR (50, 52 et 15 et 15B). Il en est de même pour les anciens sondages 60, 61 et 70. Les deux sondages du côté ouest de la HR (13 et 14) ainsi que les sondages 17 à 19 ont montré des concentrations en BPC inférieures à 50 mg/kg.

La concentration maximale observée est de 37 600 mg/kg (3,76 %) dans le sondage 2 soit environ 1000 fois plus que le critère du ministère de l'Environnement ontarien. Le volume de sols contaminés au-delà de 50 ppm de BPC serait d'environ 25 m³ et comprendrait toute la superficie de la HOFR plus environ un tiers de la HR et ce, sur toute l'épaisseur de l'unité de sable silteux (1 m). La parcelle de sol à décontaminer est localisée dans la zone la plus fortement contaminée.

En ce qui a trait à la qualité de l'eau souterraine, tous les puits échantillonnés en 1996 montrent des teneurs de l'ordre de 80 à 1000 µg/l en BPC soit au-delà du critère du ministère de l'Environnement de l'Ontario.

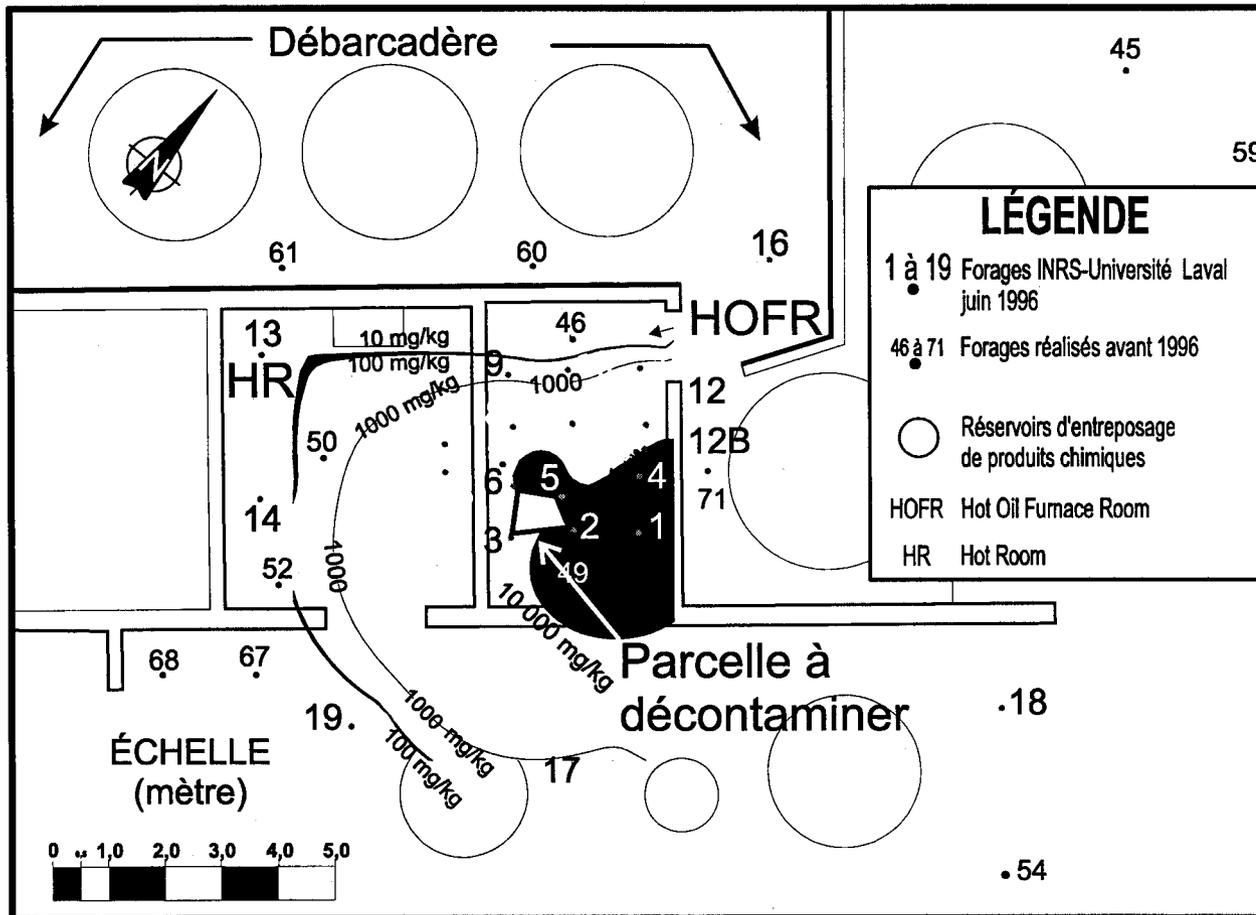


Figure 3.5 : La contamination des sols dans le secteur de la HOFR et de la HR

CHAPITRE 4

LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE DE L'ÉCOULEMENT

Mon projet a porté sur plusieurs volets de recherche dont l'objet principal est la conception d'un essai pilote de restauration par *lavage de sol*. L'outil qui a été privilégié pour la conception de l'essai pilote est la modélisation numérique, à l'aide du logiciel MODFLOW© (McDonnald, Harbaugh, 1988 ; Prudic, 1989). Cet essai est réalisé dans la HOFR en tenant compte de la présence de fluides immiscibles. Les objectifs spécifiques de la conception par modélisation numérique sont de :

1. Déterminer l'écoulement de l'eau souterraine à l'échelle de la propriété ;
2. Modéliser numériquement l'essai pilote de restauration par *lavage de sol* en tenant compte de la présence de fluides immiscibles de viscosités différentes.

Ce chapitre présente la modélisation numérique de l'écoulement de l'eau souterraine à l'échelle de la propriété Domtar basée sur les étapes proposées par Anderson et Woessner (1992) (Figure 2.8). La détermination de l'écoulement souterrain est l'étape préalable à la conception de l'essai pilote qui elle est présentée au chapitre 5.

4.1 LE MODÈLE CONCEPTUEL

La première étape de la modélisation numérique est l'établissement du modèle conceptuel permettant d'obtenir une représentation simplifiée du milieu étudié. Le modèle conceptuel de la stratigraphie à l'échelle de la propriété est présenté à la Figure 3.2. Selon cette figure, la propriété est caractérisée par 4 unités stratigraphiques qui sont, de la

surface en profondeur, un remblai, un sable silteux, une argile silteuse et le roc. La nappe libre se retrouve parfois au niveau du remblai ou du sable silteux. L'épaisseur des unités stratigraphiques est variable sur la propriété.

4.2 LE MODÈLE NUMÉRIQUE

4.2.1 Le choix du modèle

Le choix du modèle numérique dépend des objectifs visés par un projet. Pour ce qui est de déterminer l'écoulement de l'eau souterraine à l'échelle de la propriété, un modèle numérique simple s'avère un choix judicieux.

Le modèle numérique choisi est MODFLOW© (McDonnald, Harbaugh, 1988 ; Prudic, 1989) utilisable sur micro-ordinateur compatible IBM. À l'origine, le programme MODFLOW© a été développé par la U.S. Geological survey pour l'étude d'un projet de restauration d'un lieu d'enfouissement en Allemagne. Par la suite, un pré-processeur, Processing Modflow© (Chiang, Kinzelbach, 1996), a été ajouté au programme d'origine. La récente amélioration au programme permet la compatibilité avec l'interface Windows© pour donner PMWIN©. À PMWIN© se greffe les options de traçage de particules appelées PMPATH (Chiang, 1994) et MODPATH (Pollock 1988, 1989, 1994), le programme de transport MT3D (Zheng, 1990) ainsi que le programme d'estimation des paramètres PEST (Doherty et al., 1994).

Pour ce qui est de l'objectif de la modélisation de la restauration à l'aide de solutions tensioactives, il faut considérer la présence de plusieurs fluides de viscosités différentes (écoulement multiphase) et leur transport dans le milieu. Or, les équations mathématiques qui régissent l'écoulement et le transport multiphase sont très complexes et les modèles numériques conçus pour ce type d'écoulement nécessitent l'introduction de plusieurs paramètres hydrauliques difficiles à évaluer. C'est le cas notamment de la dispersivité du milieu, la densité des fluides, la perméabilité intrinsèque du milieu et la saturation

résiduelle de chacun des fluides (Anderson et Woessner, 1992). En raison de ces contraintes, nous avons décidé d'utiliser un modèle numérique simple d'écoulement et de transport par advection et d'utiliser d'un artifice qui permet de tenir compte de la présence de fluides de viscosités différentes. Ainsi, le logiciel MODFLOW© a également été retenu pour faire la conception par modélisation numérique de l'essai pilote de restauration. La présence de plusieurs fluides a été intégrée à la modélisation en faisant varier les viscosités et les conductivités hydrauliques dans la parcelle à l'aide de la relation suivante : $(K=k \rho g / \mu)$ (éq. 2.6). Enfin, nous avons choisi d'utiliser un modèle en 3D compte tenu que l'écoulement vertical et horizontal est important dans le cas présent.

4.2.2 Le choix du maillage

4.2.2.1 L'orientation du maillage

Selon les données de caractérisation recueillies au cours du projet (chapitre 3), la piézométrie à l'échelle de la propriété s'est révélée l'outil idéal pour déterminer l'orientation du maillage (Figure 3.3). Anderson et Woessner (1992) mentionnent d'ailleurs que les lignes d'écoulement et équipotentiels d'une carte piézométrique peuvent constituer des limites hydrauliques (section 2.4.5). Comme le montre la Figure 4.1, le maillage est orienté de façon à obtenir deux côtés perpendiculaires aux lignes équipotentiels ou parallèles à une ligne de courant. Le **Puits 6** réalisé par ESL (1992) est le point central de l'écoulement radial et se situe au coin sud-est du maillage. De plus, tel que le maillage est disposé et compte tenu que l'écoulement est radial, trois autres blocs identiques pourraient être ajoutés au domaine présenté à la Figure 4.1 pour former un grand domaine carré. Aux fins de rendre les calculs moins fastidieux et de cibler la zone étudiée, un seul bloc a été modélisé. Il serait donc toujours possible d'agrandir le domaine de la Figure 4.1 au besoin.

4.2.2.2 Les dimensions du maillage

La section 2.4.5 indiquait qu'il est possible d'évaluer les limites à partir de solutions mathématiques de l'écoulement radial. Dans la présente section, on se servira des solutions mathématiques de Neumann pour une nappe libre afin de déterminer les dimensions du domaine. Pour ce faire, on évaluera le rayon d'influence d'un puits de pompage fictif placé au puits 7 dans la HOFR afin de déterminer jusqu'où les limites du domaine seraient affectées par le pompage.

Les équations de Neumann (Kruseman et de Ridder, 1990) sont :

$$T = (Q/4\pi s) W(\mu_A, \Gamma) \quad (\text{éq. 4.1})$$

$$S = \mu_A 4Tt/r^2 \quad (\text{éq. 4.2})$$

T	Transmissivité	8,06 x 10 ⁻⁶ m ² /s	T = Kb avec K et b tirés des études 1 à 6 décrites au chapitre 3
Q	Débit	200 l/j	Trouvé à partir de l'équation simplifiée de Jacob T=2,3 Q/4πs
s	Rabatement	0,02 m	Valeur maximum désirée en régime permanent
S	Emmagasinement	0,297	S = S _s b avec S _s égal à la porosité
t	Temps	5 jours	Temps fixé arbitrairement pour atteindre le RP
W	Fonction des puits	0,750	Tiré de l'éq. 4.1
μ _A	argument de W(μ _A , Γ)	variant entre 0,25 et 4	Tiré de tables (Kruseman, de Ridder, 1990)
Γ	argument de W(μ _B , Γ)	0,13	Tiré de tables (Kruseman, de Ridder, 1990)
r	Rayon d'influence	?	Tiré de l'éq. 4.2

Considérant que pour l'essai pilote, il y aura injection et pompage, un débit de pompage résiduel de 200 l/j a été choisi pour évaluer la grandeur du domaine. Après calcul, le rayon d'influence du puits de pompage fictif est d'environ 3 m. Ainsi, les limites du domaine doivent être supérieures à un rayon de 3 m autour du puits 7 pour ne pas être affectées par un pompage éventuel.

Le maillage retenu est carré, a une dimension de 53 m par 53 m en plan, inclut le secteur de la HOFR et la HR et tient compte de la contrainte du rayon d'influence entre les puits dans la HOFR et les limites du domaine.

4.2.2.3 Les conditions aux limites

La Figure 4.2 présente les conditions aux limites du domaine étudié. Le Puits 6 réalisé par ESL (1992) est un point haut à charge hydraulique constante de 221,27 m (ESL, 1994). Les côtés est et sud passent par des lignes de courant et constituent, de ce fait, des limites imperméables. Le domaine se ferme au nord-est par une limite à charge constante qui correspond à la ligne équipotentielle 220,20 tirée de la carte piézométrique (Figure 4.1). À la verticale, le remblai de surface et le sable silteux sont les deux seules couches considérées pour les fins de la modélisation pour éviter d'alourdir les calculs. Chacune des couches a été divisée en deux pour contrer l'effet d'assèchement des couches lors de la modélisation. Par ailleurs, le sable silteux est l'unité qui doit faire l'objet d'une décontamination et l'unité d'argile silteuse sous-jacente est considérée limite imperméable.

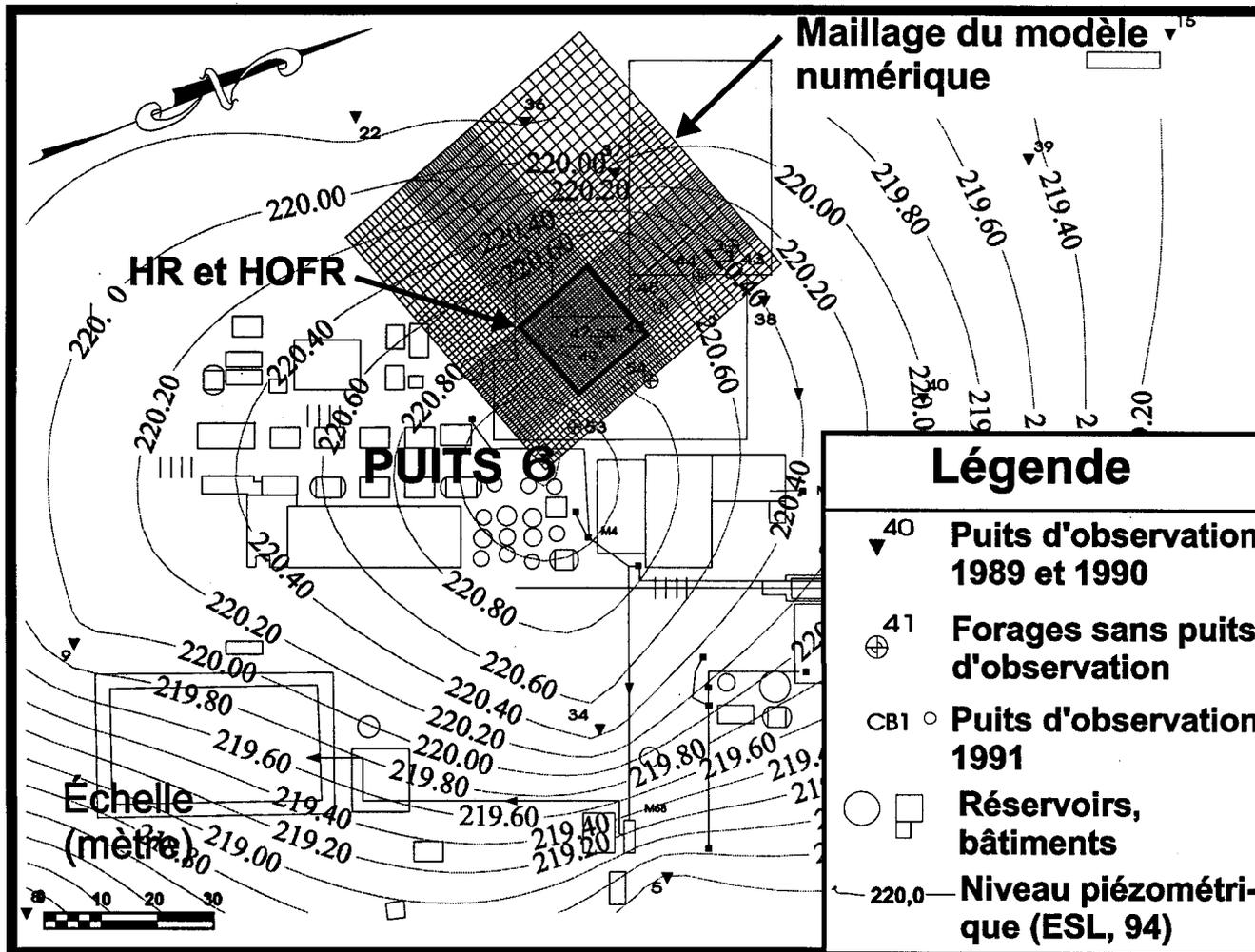


Figure 4.1 : Le maillage du domaine à l'échelle de la propriété Domtar

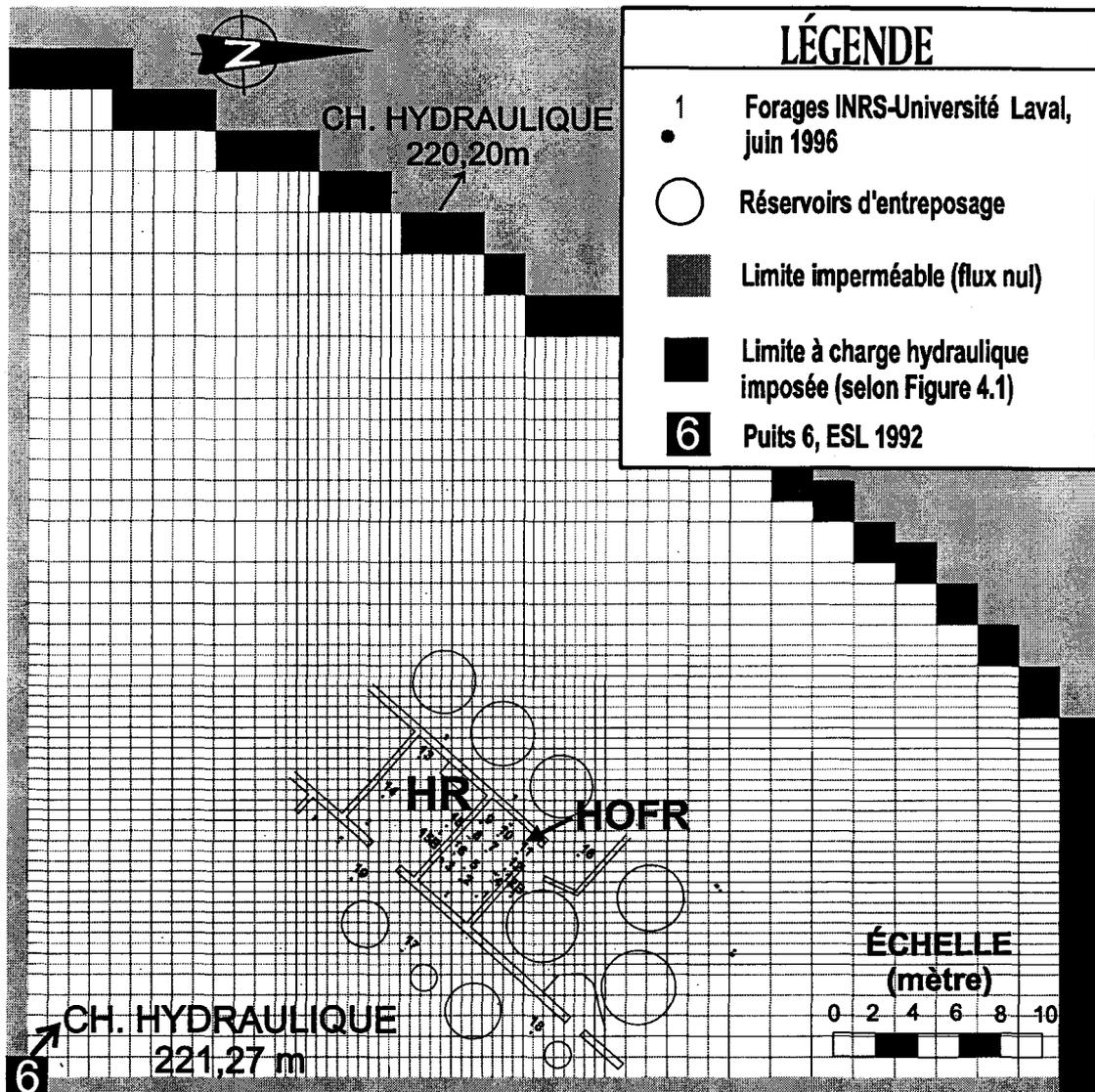


Figure 4.2 : Les conditions aux limites du domaine à l'échelle de la propriété

4.2.3 Le choix des paramètres physiques et hydrauliques des simulations

Les principaux paramètres sont l'épaisseur des unités stratigraphiques, la conductivité hydraulique, la recharge, la porosité, la transmissivité, la drainance et l'emmagasinement. Les valeurs des différents paramètres, présentées ci-après, sont tirées des données de caractérisation du chapitre 3 et sont présentées à l'Annexe C pour chacune des simulations réalisées.

L'épaisseur des unités stratigraphiques est variable sur la propriété, ce qui est d'ailleurs reflété par le modèle conceptuel (Figure 3.2). Dans le secteur de la HOFR en particulier, l'horizon d'argile a une topographie variable par rapport au reste de la propriété ce qui fait que l'unité hydrostratigraphique de sable silteux est plus mince en cet endroit (environ 1 m d'épaisseur). Les données d'épaisseur influencent la transmissivité ($T=Kb$).

Les conductivités hydrauliques horizontales moyennes du sable silteux sur la propriété et dans le secteur de la HOFR sont de $1,15 \times 10^{-5}$ et $1,6 \times 10^{-6}$ respectivement (Tableau 3.3). Pour tenir compte de cette hétérogénéité, deux valeurs distinctes de conductivité hydraulique ont été attribuées à ces deux secteurs. Le Tableau C.1 à l'annexe C présente les données détaillées des simulations ayant servi à faire la calibration. Les conductivités hydrauliques ont varié de +2 à -2 ordres de grandeur pendant la calibration. La conductivité hydraulique verticale est établie à partir de la conductivité hydraulique horizontale en faisant varier le rapport d'anisotropie de 0,1 à 10.

En ce qui concerne la recharge, il faut considérer que le terrain à l'étude est recouvert d'asphalte ou confiné par des bâtiments, ce qui limite grandement l'infiltration d'eau. Les intrants sur la propriété Domtar proviennent donc principalement de deux sources : d'abord l'infiltration par l'emprise ferroviaire et ensuite l'apport d'eau par les drains de l'usine. À la section 3.3.1, la recharge annuelle régionale a été évaluée à 200 mm. L'apport d'eau dû aux drains de l'usine provient du lavage des planchers de l'usine et est très difficile à évaluer compte tenu que le nombre et l'emplacement de ces infrastructures

n'est pas connu précisément. Les drains de l'usine ont plutôt une influence locale si on se réfère par exemple à la carte piézométrique du secteur de la HOFR et la HR (Figure 3.4). Nous pouvons déduire que cet intrant est négligeable à l'échelle de la propriété par rapport à la recharge de l'emprise ferroviaire qui elle, est de dimension plus importante.

La zone de recharge principale est l'emprise ferroviaire localisée au centre de la propriété (Figure 1.2) et se traduit par un point haut hydraulique à l'endroit du Puits 6 réalisé par ESL (1992). Le Puits 6 est le point central de l'écoulement radial défini par la piézométrie sur la propriété (Figure 3.3). Rappelons que le domaine est orienté selon la piézométrie et que les limites du domaine correspondent à des charges correspondant à des lignes d'écoulement ou équipotentielles (sections 4.2.2.1 et 4.2.2.2.3). Comme il a été vu à la section 2.4.5, lorsqu'on utilise des charges imposées pour fixer les limites d'un domaine, l'effet de la recharge est inclus implicitement. L'attribution d'une recharge supplémentaire ne s'avère donc pas nécessaire dans le présent cas.

Finalement, les autres paramètres (la porosité, la drainance et l'emmagasinement) ont été établis selon les valeurs typiques pour une nappe libre. En condition de nappe libre la drainance n'est pas une valeur pertinente et l'emmagasinement s'exprime plutôt par la porosité de drainage (Anderson et Woessner, 1992).

4.2.4 La calibration

Plus de vingt simulations ont été nécessaires pour calibrer le modèle numérique. Les dix-sept simulations les plus pertinentes ont été retenues et sont présentées au Tableau C.1 à l'annexe C. La calibration s'est déroulée sur une période d'environ deux mois et demi, ce qui est relativement rapide si on tient compte des possibilités d'application que procure un modèle numérique une fois cette étape franchie.

Chacune des simulations est évaluée au fur et à mesure de la calibration de façon à choisir laquelle est optimale. Pour faire cette évaluation, différents outils décrits à la section 2.4.6

sont utilisés dont le calcul des erreurs, le bilan de masse et la comparaison avec les modèles mathématiques.

4.2.4.1 Le calcul des erreurs

Le calcul des erreurs moyenne (ME), moyenne absolue (MAE) et d'écart type (RMS) permet de déterminer quelle simulation est la plus représentative. Le Tableau 4.1 présente une compilation des erreurs pour chacune d'elles.

Tableau 4.1 : Les erreurs ME, MAE et RMS des différentes simulations à l'échelle de la propriété Domtar

Simulation	Erreur ME	Erreur MAE	Erreur RMS
1	0,3911	0,3911	0,4239
2	0,4294	0,4294	0,4585
3	0,4767	0,4767	0,5032
4	0,3747	0,3747	0,4126
5	0,3747	0,3747	0,4126
6	0,3717	0,3717	0,4104
7	0,5376	0,5376	0,5603
8	0,3717	0,3717	0,4104
9	0,3977	0,3977	0,4335
10¹	0,5616	0,5616	0,5831
11	0,3999	0,3999	0,4368
12	0,3558	0,3571	0,392
13	0,2703	0,2785	0,3230
14²	0,2403	0,2694	0,3024
15	0,3622	0,3622	0,3981
16	0,3971	0,3971	0,4281
17³	0,3430	0,3453	0,3803

1. Simulation 10 : celle ayant entraîné les plus fortes erreurs; 2. Simulation 14 : celle ayant entraîné les plus faibles erreurs; 3. Simulation 17 : simulation retenue

La simulation 17 est celle retenue pour l'écoulement de l'eau souterraine à l'échelle de la propriété. La sélection de la meilleure simulation calibrée s'est faite à partir d'une évaluation multicritères.

Les critères de sélection sont :

1. Le faible nombre d'unités stratigraphiques selon la verticale et nombre de mailles selon l'horizontale ;
2. Les valeurs de K_{hor} le plus près possible de celles de terrain (Tableau 3.3) ;
3. L'attribution d'un rapport d'anisotropie entre 1 et 10. De préférence un rapport d'anisotropie de 10 est recommandé dans le programme PMWIN© ;
4. Les trois erreurs (ME, MAE et RMS) sont le plus faible possible, soit en-deçà de 0,5 m, le critère fixé préalablement à la calibration.

Le Tableau qui suit présente le comportement des simulations selon ces critères.

Tableau 4.2 : Les critères de sélection pour le choix du modèle calibré

Simulations ¹	Nombre de couches	Valeur de K_{hor} représentative	Rapport d'anisotropie entre 1 et 10	Grandeur de l'erreur	Cote des simulations 1= Excellente 2 = Bonne 3 = Moyenne
1 à 3	5 ou plus	Non	Non	Moyenne à élevée	3
4	4	Non	Non	Moyenne	2
5, 6, 8, 9, 10, 11	4	Oui	Non	Moyenne à élevée	3
7	4	Oui et non	Non	Élevée	3
12, 13, 14, 15	4	Oui	Oui	Faible	2
16	4	Oui	Non	Moyenne	2
17	4	Oui	Oui	Faible	1

1. Tableaux C.1 et 4.1

Comme le montre le Tableau 4.2, la simulation 17 est celle qui répond le mieux aux critères de sélection. Cette simulation montre les erreurs parmi les plus faibles et possède des paramètres représentant bien les valeurs de terrain. Pour toutes ces raisons, elle a été retenue pour représenter le modèle calibré. La simulation 14 semblait intéressante à première vue mais, les conductivités hydrauliques n'étaient pas représentatives du terrain pour la couche 4 et le rapport d'anisotropie était de 1 plutôt que de 10.

4.2.4.2 Le bilan de masse

Le bilan de masse a été effectué pour le domaine en entier. Le bilan de masse ou *Water budget* consiste à évaluer tous les intrants et les extrants hydrauliques du système. Les paramètres considérés dans un bilan de masse sont l'emmagasinement, le flux (horizontal, vertical ascendant et descendant), la charge hydraulique imposée, les puits, les drains, la recharge, l'évapotranspiration, le facteur de drainance d'une rivière, les charges hydrauliques variables, la drainance d'un ruisseau et l'emmagasinement spécifique.

Le Tableau C.2 à l'annexe C présente le bilan de masse détaillé pour tout le domaine. Il indique que les intrants contribuent à $+9,870 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, les extrants à $-9,838 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ pour une différence de $+3.2 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$.

À la section 2.4.6, Anderson et Woessner (1992) suggéraient d'évaluer la précision du modèle à l'aide du facteur d'erreur sur le bilan de masse appelé *discrepancy* dans le Tableau C.2. Ce facteur se calcule de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \text{Facteur d'erreur sur le bilan de masse} &= \frac{[\text{Recharge (IN)} - \text{Décharge (OUT)}]}{\text{Recharge}} \\ &= \frac{[9,870 \times 10^{-6} - 9,838 \times 10^{-6}]}{9,870 \times 10^{-6}} \end{aligned}$$

$$\text{Facteur d'erreur sur le bilan de masse} = 0,0032 \text{ ou } 0,32 \%$$

Selon Anderson et Woessner (1992), lorsque le facteur d'erreur est égal ou inférieur à 1 %, la modélisation numérique est jugée très fiable et représentative du système étudié. Par conséquent le résultat de 0,32 % obtenu par notre calibration est excellent et montre que le modèle est précis et fiable.

4.2.4.3 La comparaison avec les modèles mathématiques

À la section 4.1, la solution de Neumann a été utilisée pour évaluer le rayon d'influence d'un puits de pompage fictif placé au puits 7 dans la HOFR. Pour vérifier si les prédictions du modèle mathématique seraient les mêmes qu'avec le modèle numérique, une modélisation du pompage à l'endroit de ce puits est réalisée à partir du modèle calibré (simulation 17). Rappelons qu'un débit (Q) de 200 l/j ($2,3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$) est attribué au système (voir 4.1) et donne un rayon d'influence d'environ 3 m.

Comme le montre la Figure 4.3, le rayon d'influence du pompage pour un débit de 200 l/j n'affecte pas les limites du domaine puisqu'il y a une distance de quelque 8 m entre le rayon d'influence du puits 7 et la limite la plus proche. Par ailleurs, l'influence du pompage semble se faire sentir jusqu'à un rayon situé entre 3 et 4 m ce qui est similaire à la prédiction du modèle mathématique. Cette comparaison est donc concluante quant à la fiabilité du modèle numérique.

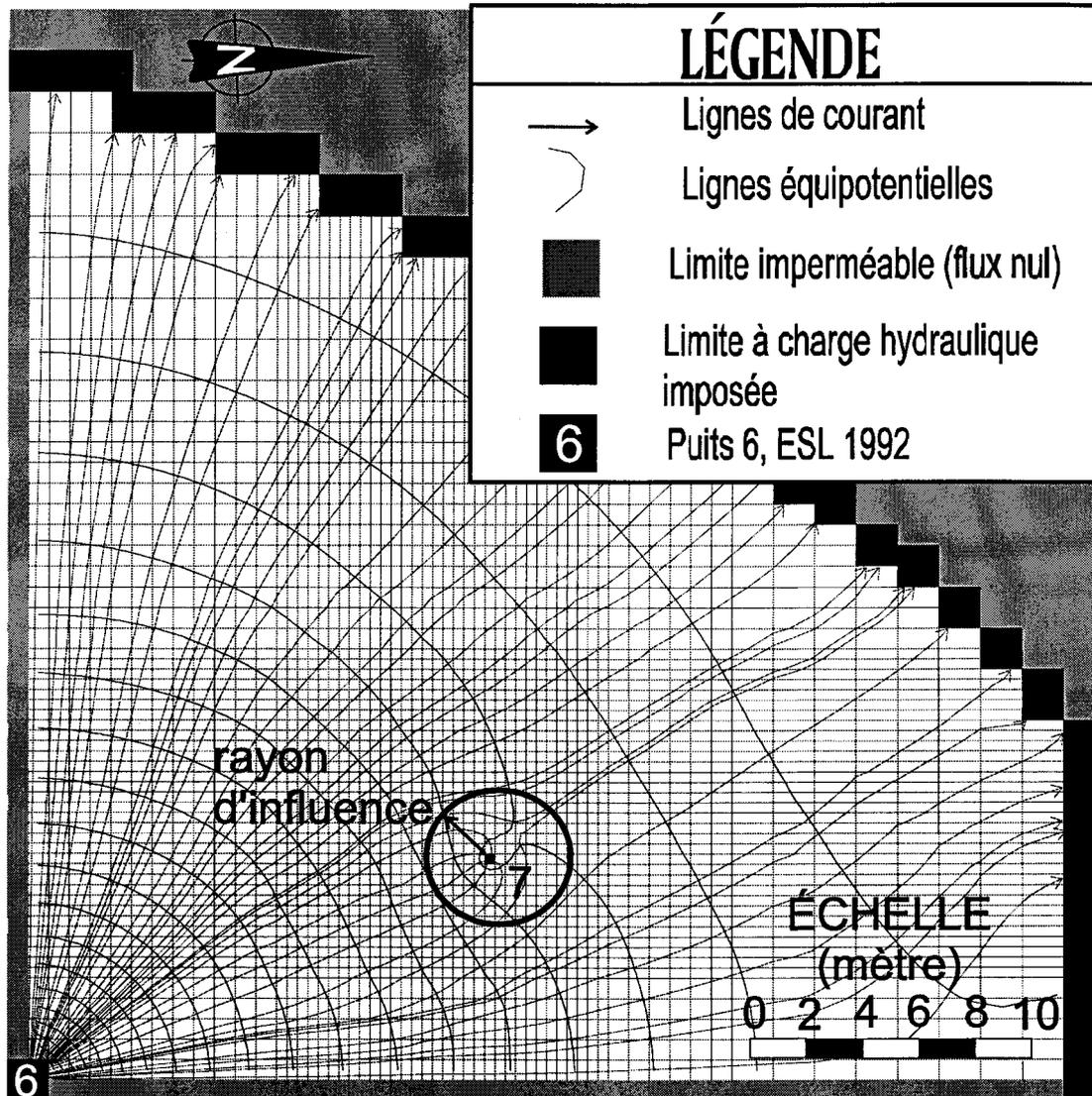


Figure 4.3 : La validation du modèle numérique à l'aide du modèle mathématique de Neumann pour un essai de pompage fictif

4.2.5 L'écoulement à l'échelle de la propriété

La Figure 4.4 présente le patron d'écoulement à l'échelle de la propriété dans l'horizon de sable silteux issu de la meilleure simulation calibrée, soit la simulation 17.

Tel qu'on pouvait s'y attendre, l'écoulement de l'eau souterraine obtenu à l'aide de la modélisation numérique est radial. L'amont hydraulique est situé au Puits 6 (ESL, 1992) et l'écoulement se fait vers la HOFR et la HR. Le gradient hydraulique (i) et la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine (v) de ce domaine ont été évalués et comparés aux valeurs obtenues au chapitre 3. Le domaine modélisé donne un gradient hydraulique de 0,01 m/m et une vitesse d'écoulement de 21 m/an. Ces valeurs ont été calculées à partir des équations suivantes et des données de la conductivité hydraulique moyenne donnée au Tableau 3.3:

$$i = \Delta h / \Delta l = 0,05 \text{ m} / 5 \text{ m} = 0,01 \text{ m/m}$$

$$v = Ki/n = (1,66 \times 10^{-5} \text{ m/s} \times 0,01) / 0,25 = 6,64 \times 10^{-7} \text{ m/s} \text{ ou } 21 \text{ m/an}$$

Rappelons qu'au chapitre 3, les valeurs de gradient hydraulique et de vitesse d'écoulement minimum et maximum variaient respectivement de 0,01 à 0,035 et de 21 m/an à 70 m/an. Ces valeurs de gradient et de vitesse se rapprochent de celles évaluées à partir du modèle numérique.

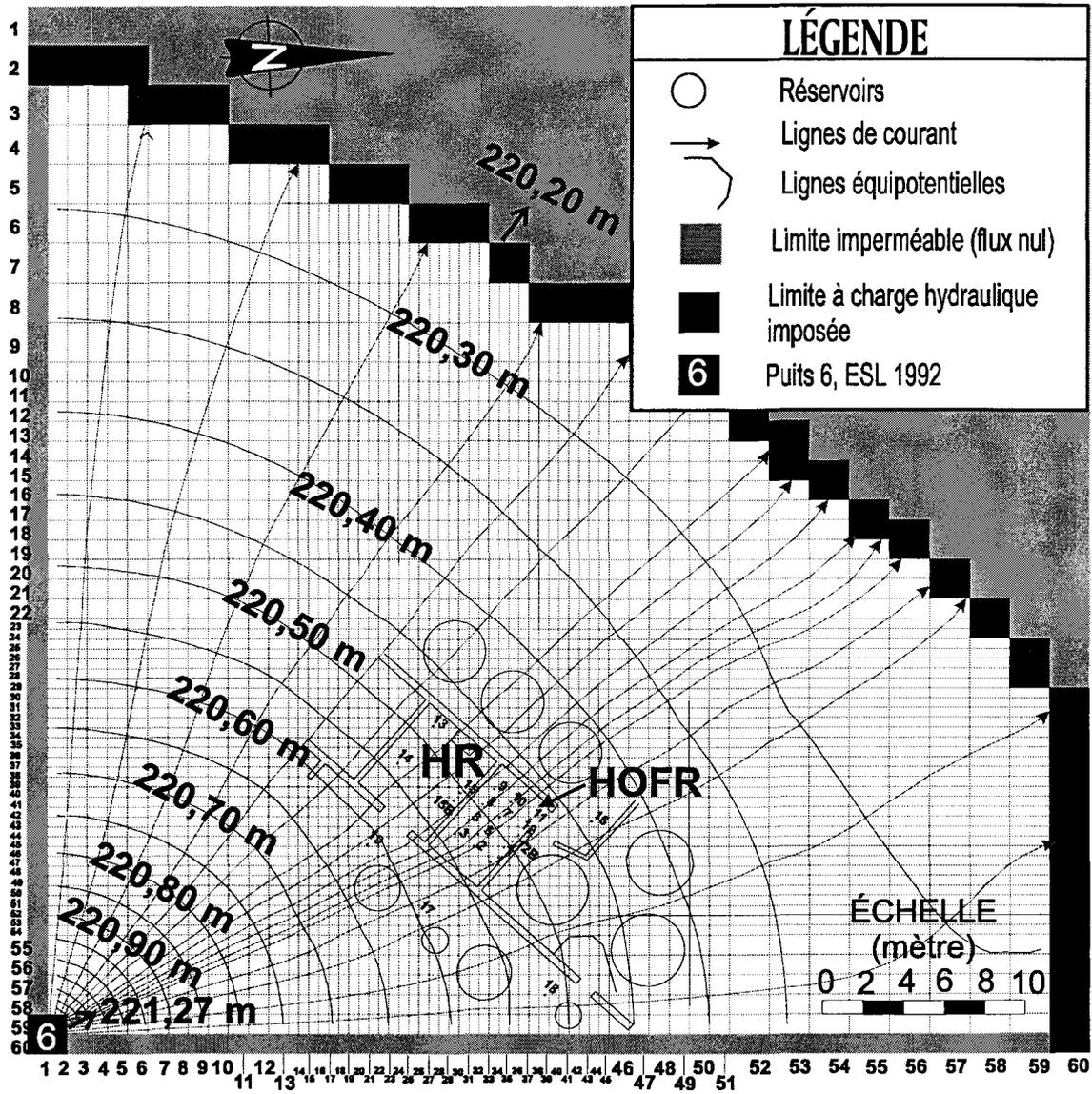


Figure 4.4 : Le patron d'écoulement de l'eau souterraine à l'échelle de la propriété (simulation 17)

4.2.6 Le raffinement du domaine à l'échelle de la parcelle à décontaminer

Le domaine calibré à l'échelle de la propriété (simulation 17) a été réduit dans le but d'alléger le modèle et de circonscrire plus précisément le secteur de la HOFR et de la HR. Ce nouveau domaine à l'échelle de la HOFR est utilisé pour tester différents patrons d'injection et de pompage. Ainsi, le nouveau domaine à l'échelle de la HOFR fait 28 m par 21 m et a été défini avec les valeurs de charges hydrauliques obtenues à l'échelle de la propriété (simulation 17). La grandeur du domaine a été fixée en s'assurant que les nouvelles limites respectent toujours le rayon d'influence de pompage fictif déterminé antérieurement et ne soient pas touchées par un essai d'injection-pompage éventuel. Outre la dimension du domaine, les changements apportés au nouveau modèle comprennent l'imposition des charges aux 4 côtés du domaine et le raffinement du maillage dans la zone de la parcelle à décontaminer. Les autres paramètres hydrauliques (K, S, R...) de la simulation 17 n'ont pas été modifiés.

Le Tableau 4.3 et la Figure 4.5 présentent les différents domaines. Un troisième domaine réduit correspondant à l'échelle de la parcelle à décontaminer a été utilisé pour la simulation de l'essai pilote de restauration (section 5.3).

Tableau 4.3 : Les caractéristiques des différents domaines discrétisés

	Domaine à l'échelle de la propriété	Domaine à l'échelle de la HOFR	Domaine à l'échelle de la parcelle
Utilité	Écoulement à l'échelle de la propriété	Choix des patrons d'injection-pompage	Essai pilote de restauration de la parcelle
Nombre de mailles¹	60 x 60	69 x 69	53 x 53
Dimension¹	53 m x 53 m	28 m x 21 m	17 m x 16,5 m
Dimension des mailles dans la parcelle	0,5 m	0,25 m	0,125 m

1. nombre de colonnes x nombre de lignes

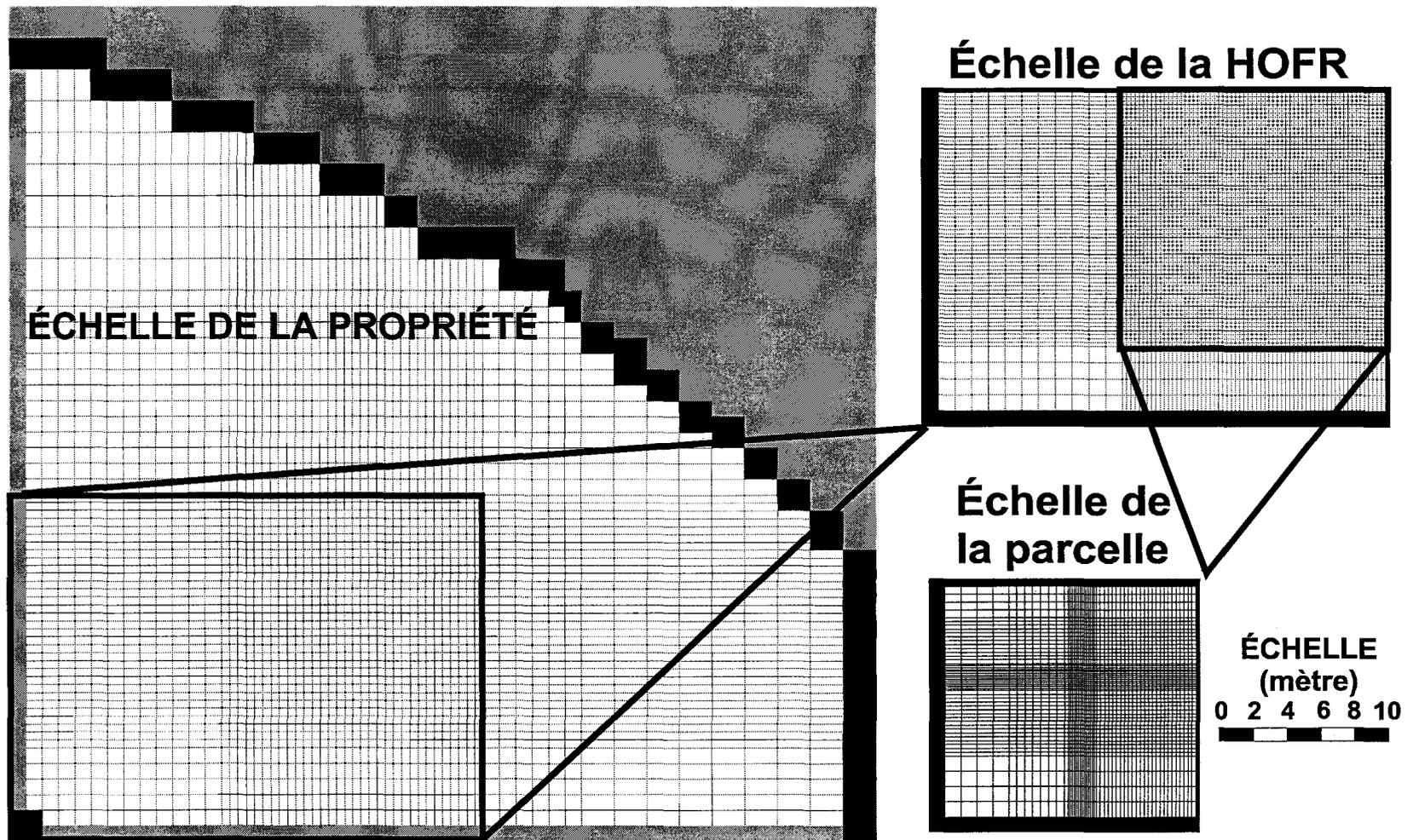


Figure 4.5 : Les différents domaines discrétisés

CHAPITRE 5

LA CONCEPTION ET LA MISE EN ŒUVRE DE L'ESSAI PILOTE DE RESTAURATION

Cette section présente la démarche ayant mené à la conception de l'essai pilote de restauration selon les étapes suivantes : le choix du patron d'injection et de pompage (section 5.1), l'établissement des séquences d'injection et de pompage (section 5.2), la modélisation numérique de l'essai pilote de restauration (section 5.3), la mise en œuvre et la logistique de l'essai pilote de restauration (section 5.4) et enfin la comparaison entre le modèle numérique et les résultats de l'essai pilote (section 5.5).

5.1 Le choix du patron d'injection et de pompage

Tel qu'il a été vu au chapitre 2 (section 2.3), les principaux patrons d'injection et de pompage sont le patron carré (5 spot), le patron hexagonal (7 spot), le patron en ligne (line drive) ou une variante des trois. Dans le cas présent, deux patrons ont été testés soit carré et en trois points.

Si on se réfère à la Figure 5.1, le patron carré a un puits d'injection central (no 20) et 4 puits de pompage (2, 3, 5 et 6) placés aux coins de la parcelle. Le patron en trois points a un puits d'injection dans un coin de la cellule (no 3) et trois puits de pompage périphériques placés aux puits 2, 5 et 6 (Figure 5.2). Les deux types de patrons nécessitent l'installation de puits de pompage d'appoint en aval hydraulique pour capter les fuites potentielles de liquides et le patron en trois points a même bénéficié d'un puits en amont hydraulique. Plusieurs simulations en régime permanent ont été effectuées afin de

déterminer l'agencement qui assure le meilleur confinement du système. La simulation qui, avec les débits les plus faibles, présentait un écoulement empêchant les fuites de liquides au-delà de la parcelle était privilégiée. Le Tableau 5.1 présente les débits d'injection et de pompage obtenus pour chaque patron.

Tableau 5.1 : Les débits utilisés pour les simulations de l'injection et du pompage avec le patron carré et le patron en trois points

Puits	Patron carré avec variante Débit ou volume (l/j) ¹	Patron carré Débit ou volume (l/j) ¹
2	- 346	- 173
3	+ 780	- 173
5	- 346	- 259
6	- 346	- 259
20	----	+ 780
7 ²	----	- 46
8 ²	- 43	- 46
17 ²	- 173	----
19 ²	----	----
Volume pompé	- 1254	- 956
Volume injecté	+780	+ 780

1. Le signe positif indique un puits d'injection, le signe négatif un puits de pompage (producteur); 2. Puits de pompage d'appoint.

Les débits d'injection ont été fixés en considérant un temps d'injection de 6 jours et demi et un volume pompé de 5000 litres ($5000 \text{ l/j} \div 6,5 \text{ j} = 780 \text{ l/j}$). La période et le volume étant des objectifs préliminaires de durée de l'essai et de capacité d'entreposage de liquides contaminés sur le site.

Le Tableau 5.1 montre que les volumes d'eau pompés sont supérieurs à ceux injectés pour les deux types de patron. Une des raisons de cette situation est que le terrain a un fort gradient hydraulique naturel que les puits de pompage doivent contrer par le biais de débits élevés afin d'avoir un patron stable. Les Figures 5.1 et 5.2 présentent l'écoulement de l'eau souterraine pour chacun des patrons.

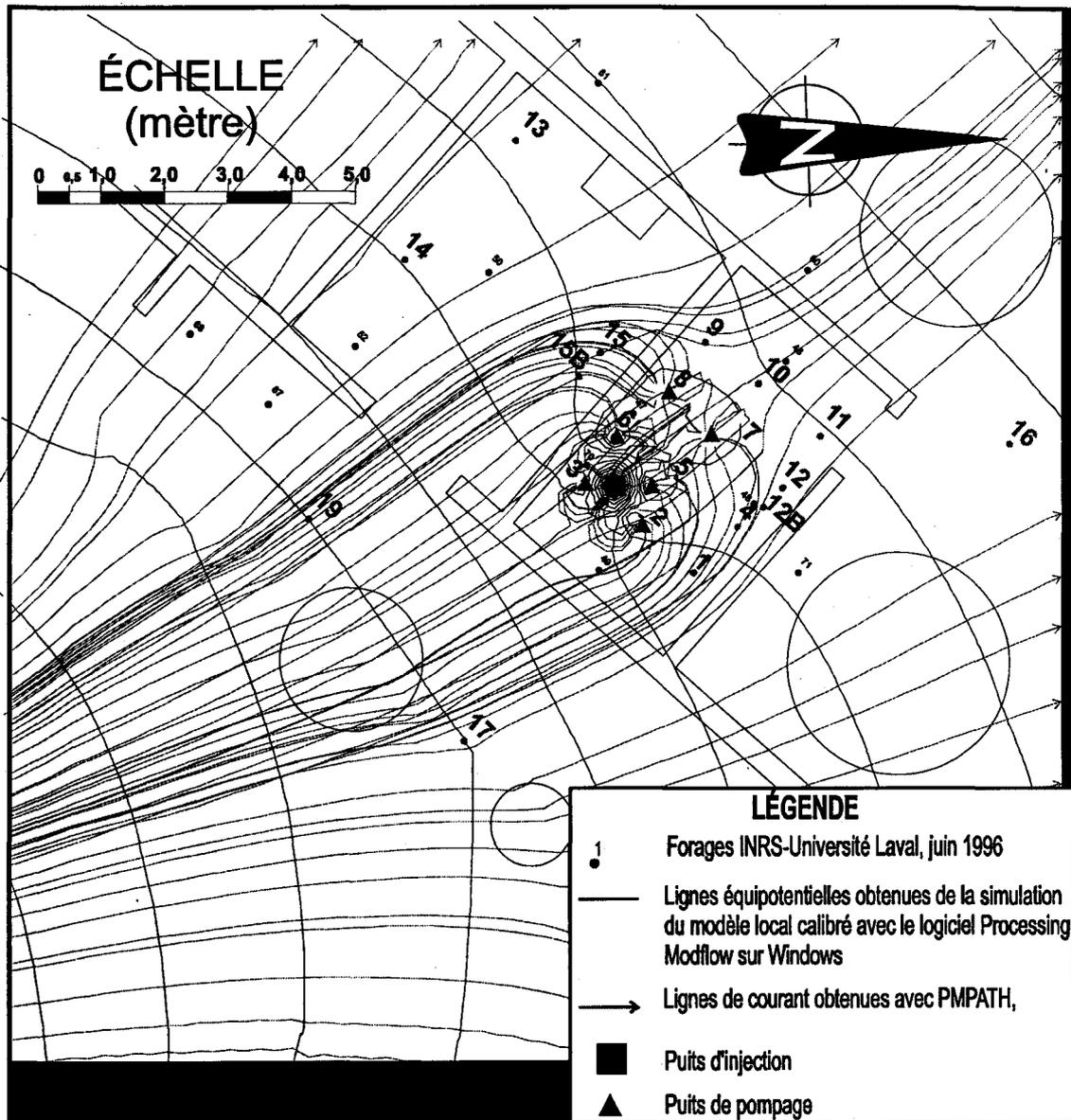


Figure 5.1 : La piézométrie selon le patron d'injection et de pompage carré

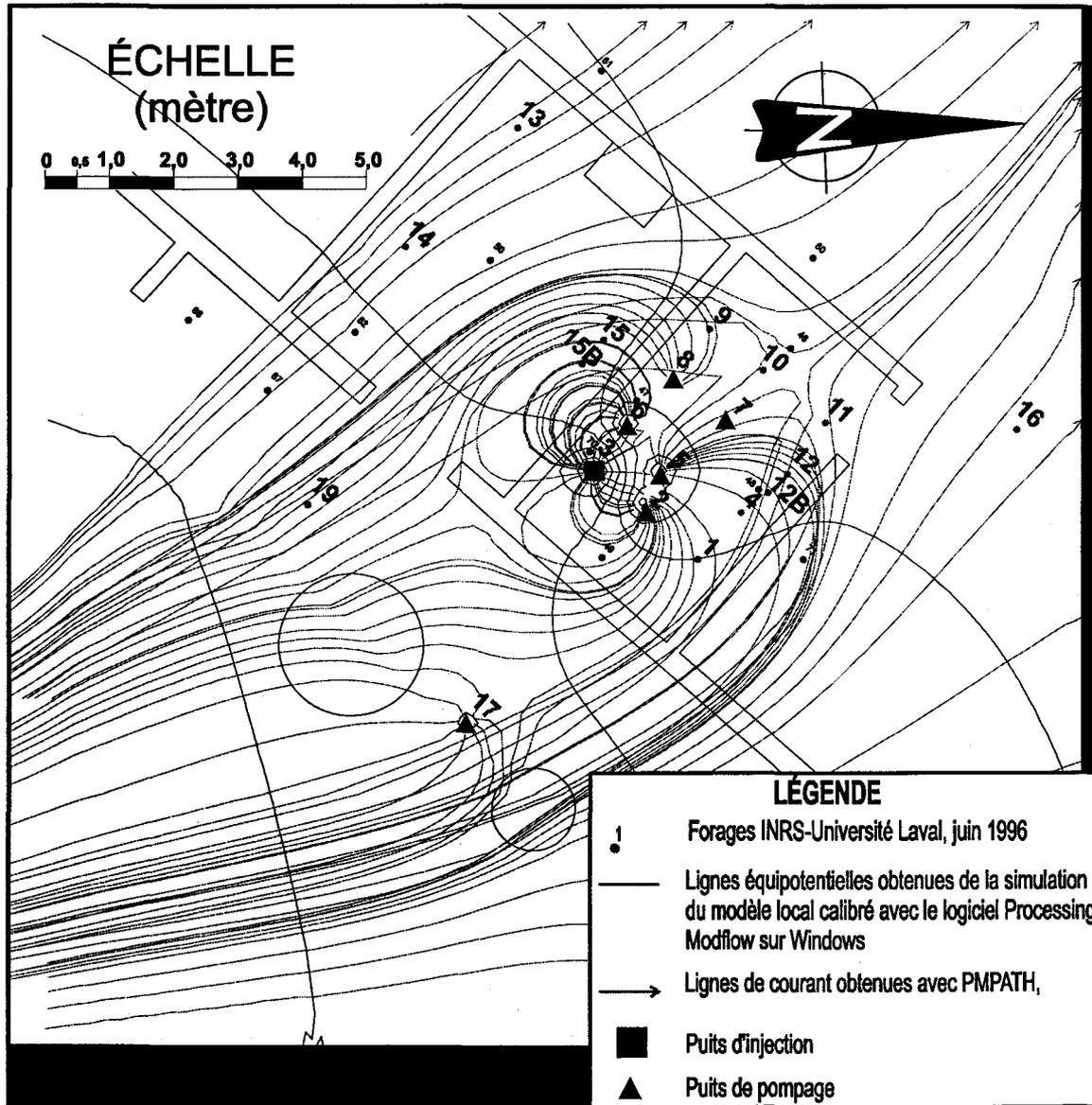


Figure 5.2 : La piézométrie selon le patron d'injection et de pompage en trois points

La Figure 5.2, montre que le patron en trois points couvre une superficie plus grande que la parcelle à décontaminer, ce qui entraîne le pompage de quantités élevées de liquides provenant de l'extérieur. Cette situation est d'ailleurs confirmée par le bilan présenté au Tableau 5.1 alors que les volumes pompés sont près du double de ceux injectés et ce, même si un puits d'appoint (17) en amont hydraulique avait été ajouté au patron initial pour limiter les volumes à pomper de l'extérieur de la parcelle. De plus, du fait que le puits d'injection 3 n'est pas complètement confiné hydrauliquement, il est très difficile d'effectuer un bon contrôle hydraulique sur les liquides injectés qui ont alors tendance à sortir du système. Ce patron a été testé parce que le gradient hydraulique naturel pouvait l'avantager et qu'il ne nécessitait l'installation d'aucun puits supplémentaire au centre de la cellule. Cependant, compte tenu des résultats peu concluants et du contrôle hydraulique difficile, ce patron n'est pas retenu.

Le patron carré montre un meilleur confinement (Figure 5.2) des liquides à l'intérieur de la parcelle et un écart plus faible entre les quantités d'eau pompées et injectées. Par conséquent, le patron carré est retenu pour effectuer les simulations des scénarios de l'essai pilote de restauration.

5.2 Les séquences d'injection et de pompage de l'essai pilote de restauration

L'essai pilote a été réalisé dans la HOFR sur une parcelle de terrain de 1 m^2 de superficie circonscrite par les sondages 2, 3, 5 et 6 (Figure 3.1). L'unité stratigraphique faisant l'objet de la décontamination est le sable silteux. L'épaisseur de cette unité est de 1 m, ce qui correspond à une cellule de 1 m^3 de volume.

Une notion très importante rattachée à ce type d'essai est celle de volume des pores (VP) (Martel, Gélinas, Desnoyers, 1997). Il représente un volume de liquide remplissant les pores d'une portion donnée d'un aquifère et est utilisé pour le calcul des débits et des volumes injectés et pompés. Pour les fins de l'essai pilote et sur la base des résultats des essais en colonne réalisés par le laboratoire d'hydrogéologie de l'Université Laval, une porosité de 50 % est utilisée (Foy et Saumure, communication personnelle). Compte tenu

que le volume de la parcelle de sol à décontaminer est de 1 m^3 , un volume des pores (1 VP) représentera alors $0,5 \text{ m}^3$ ou 500 litres (1 VP = 500 litres).

Les séquences d'injection et de pompage typiques d'un essai de *lavage de sol* telles que décrites dans les travaux de Martel (1996, 1997) sont :

1. l'atteinte du régime permanent et le pré-lavage à l'eau (avec ou sans polymère) ;
2. l'injection de la solution de lavage (viscosité différente de celle l'eau) ;
3. l'injection de polymères (viscosités différentes de celle l'eau) ;
4. le rinçage final à l'eau.

L'objectif de la modélisation numérique de l'essai pilote est d'obtenir les débits d'injection et de pompage "optimaux" pour chaque séquence, c'est-à-dire permettant un nettoyage de la parcelle sans occasionner de fuites de liquides à l'extérieur de la cellule. La viscosité (μ) des liquides à injecter diffère d'une séquence à l'autre et doit être spécifiée pour chacune d'elles.

Le nombre final de volume des pores a été déterminé au laboratoire un peu avant la réalisation de l'essai pilote de sorte que, pour chaque séquence, l'injection d'un volume des pores (1 VP) a été simulée dans l'attente du nombre de VP définitif. Le choix du nombre de VP est déterminé à l'aide d'essais de solubilité et de diagrammes de phase (section 1.2) et dépend de l'efficacité des solutions de lavage à récupérer les BPC. Les solutions ont été optimisées au laboratoire jusqu'à l'atteinte d'une efficacité supérieure à 90 %, ce qui fut obtenu environ trois mois avant l'essai pilote (Martel, Saumure, communication personnelle). Le nombre de VP final a été intégré aux séquences d'injection et de pompage réelles lors de l'essai de terrain (section 5.5).

5.3 La modélisation numérique de l'essai pilote de restauration

La parcelle à restaurer étant de petite dimension (1 m^2), le domaine à l'échelle de la HOFR a été réduit à son tour afin d'avoir une plus grande précision de la zone à décontaminer. Pour la simulation de l'essai pilote de restauration, un nouveau domaine à l'échelle de la parcelle de 17 m par 16,5 m est utilisé (Figure 4.5). Les mailles à l'intérieur de la parcelle sont carrées et font de 12,5 cm de côté (tableau 4.3 et Figure 4.5).

De plus, il faut mentionner un changement notable de stratigraphie survenu à l'intérieur de la parcelle quelques jours avant la réalisation de l'essai. Il s'agit de l'enlèvement de la couche de calcaire 0-¾ sus-jacente à l'unité de sable silteux et son remplacement par une couche de bentonite faisant toute la superficie de la parcelle (1m^2) et de même épaisseur que le remblai calcaire soit environ 1,4 m. Les conductivités hydrauliques horizontale et verticale de la bentonite ont été ajustées au modèle numérique et fixées respectivement à $1,66 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ et $1,66 \times 10^{-8} \text{ m/s}$. Le patron d'injection et de pompage demeure de type carré avec deux puits d'appoint en 7 et 8.

5.3.1 Séquence 1 : le régime permanent et le prélavage à l'eau

Une simulation du régime permanent est effectuée pour déterminer les débits d'injection et de pompage optimaux et le temps nécessaire au système pour atteindre l'équilibre. Les débits obtenus de cette simulation sont présentés au Tableau 5.2 et l'écoulement dans la parcelle est présenté à la Figure 5.3.

Tableau 5.2 : Séquence 1 : les débits théoriques lors du régime permanent et du prélavage à l'eau

Puits	20	2	3	5	6	7	8	Total
Débit ¹ (l/j)	+ 900	- 300	- 300	- 370	- 350	- 40	- 40	- 500

1. signe positif = injection, signe négatif = pompage

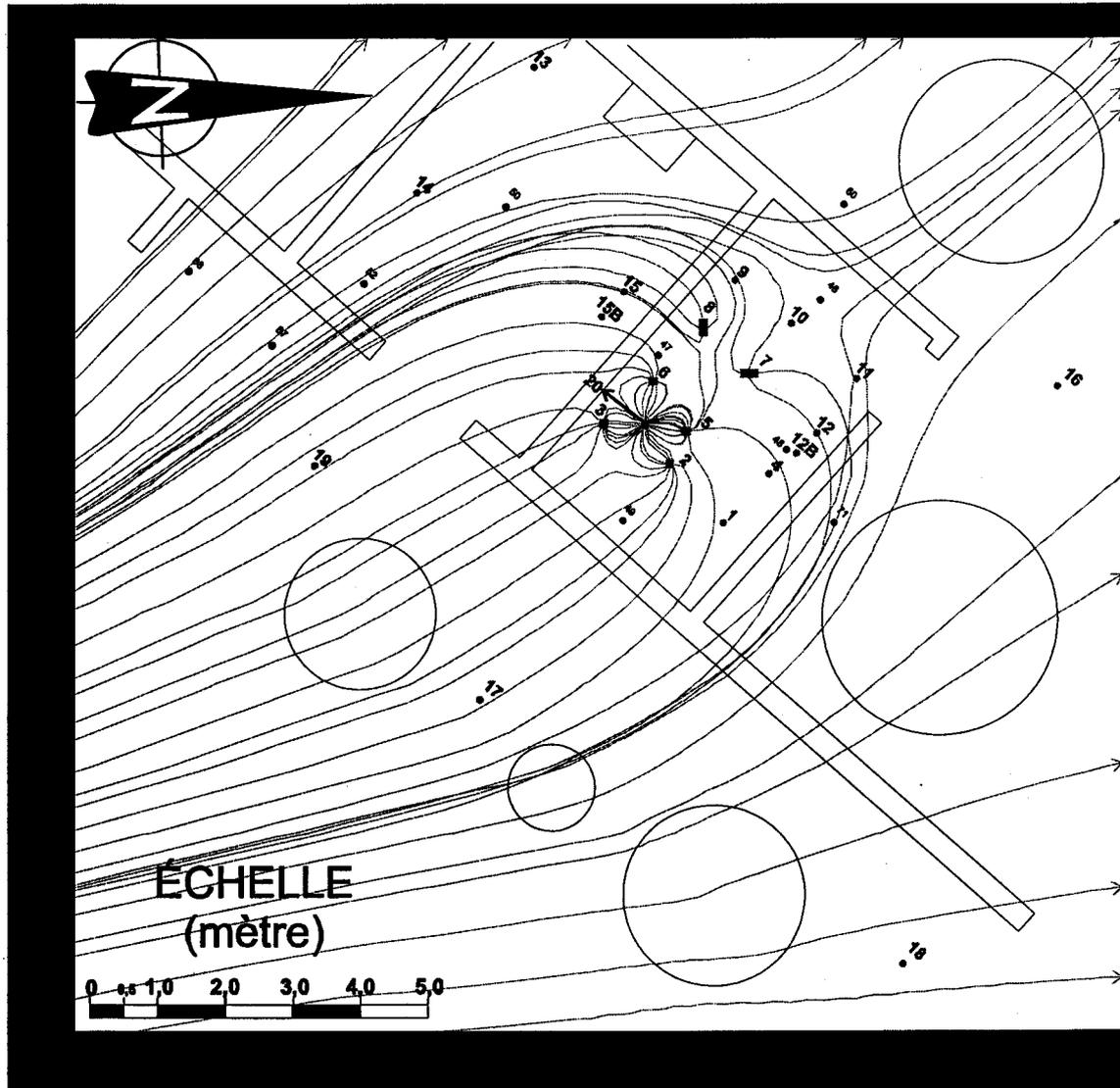


Figure 5.3 : Séquence 1 : le patron d'écoulement lors du régime permanent et du prélavage à l'eau

L'autre objectif de cette séquence consiste à déterminer le temps nécessaire au système pour atteindre le régime permanent (RP). Une façon simple de le déterminer consiste à faire une simulation en régime transitoire (RT) et à observer les variations de charge hydraulique dans le temps. Lorsque les charges montrent une faible différence ou ne varient plus, le régime permanent est atteint. De plus, les charges hydrauliques obtenues en régime transitoire peuvent être comparées à une simulation du régime permanent avec un seul pas de temps. Le régime permanent est atteint lorsque les valeurs en régime permanent et transitoire sont similaires. Le Tableau 5.3 présente les données ayant permis de connaître le temps nécessaire au système pour atteindre ce régime.

La simulation en régime transitoire a été effectuée en utilisant les débits donnés au Tableau 5.2 et avec des pas de temps variant de 3 à 6 heures. Après chaque intervalle de temps, les valeurs de charge sont vérifiées et comparées avec celles obtenues en régime permanent.

Tableau 5.3 : Les valeurs de charge hydraulique de l'essai d'injection et de pompage en régime transitoire

Puits d'observation	Charges hydrauliques (m) en fonction du nombre de pas de temps () et du nombre d'heures []					Régime permanent 1 pas de temps
	(1) [6h]	(4) [24h]	(5) [30h]	(10) [48h]	(12) [52h]	
1	220,460	220,473	220,469	220,459	220,457	220,43
4	220,431	220,445	220,443	220,436	220,434	220,41
7	220,393	220,408	220,408	220,404	220,403	220,38
8	220,398	220,412	220,412	220,410	220,409	220,39
9	220,415	220,425	220,426	220,424	220,423	220,41
10	220,409	220,420	220,421	220,418	220,417	220,40
11	220,416	220,426	220,426	220,422	220,421	220,41
12	220,423	220,435	220,435	220,429	220,428	220,41

Ce tableau montre que durant les 4 premiers pas de temps, soit pendant 24 heures, les niveaux d'eau montent dans les puits d'observation. Les valeurs de charges hydrauliques du 5^e pas de temps (30 heures) commencent à diminuer et convergent ensuite vers la valeur obtenue par le régime permanent. Le régime permanent pourrait être considéré atteint lorsque les niveaux d'eau commencent à converger vers la valeur du régime

permanent, soit entre 24 et 30 heures après le début de l'injection et du pompage. À ce moment, la différence de charge hydraulique entre le régime permanent avec un pas de temps et le régime transitoire est d'environ 2 cm, ce qui est une erreur très acceptable.

L'injection d'eau de prélavage peut se faire en même temps que l'atteinte du régime permanent en autant que le temps avant d'atteindre l'équilibre soit suffisamment long pour permettre le passage d'un volume des pores d'eau. Il faut donc évaluer le temps pour qu'une quantité d'eau de 500 litres, équivalente à un volume des pores, soit complètement injectée. Le temps d'injection (t_{inj}) d'un volume des pores de 500 litres est déterminé à l'aide du débit d'injection (+900 l/j) donné dans le Tableau 5.2. Le temps d'injection est le volume des pores divisé par le débit d'injection du puits 20 ($500 \text{ l} / 900 \text{ l/j} = 13 \text{ heures}$). Il faut dire que ce temps d'injection est un minimum qui considère que toute la cellule a été balayée par les liquides injectés.

Considérations pratiques

Sur le terrain, il existe différentes variantes à l'étape du prélavage. La réalisation d'un essai de traceurs et l'ajout d'un polymère faiblement visqueux à l'eau de prélavage en sont deux exemples. L'essai de traceurs est facultatif à l'échelle de l'essai pilote, mais peut quand même être réalisé lors de l'étape du prélavage. Le but d'un tel essai est de vérifier la connexion hydraulique et les chemins préférentiels de migration des produits injectés. Le traceur choisi, en général un ion (Cl^- , Br^-), est incorporé à l'eau pour former une solution concentrée de viscosité et de densité identiques à celle de l'eau (Martel, Gélinas, Saumure, 1997).

L'ajout de polymères faiblement visqueux (jusqu'à 3 fois plus visqueux) est également une autre variante de l'essai. Les polymères ont pour effet d'uniformiser les propriétés de la formation aquifère et de limiter la formation de chemins préférentiels d'écoulement (Martel, Gélinas, Saumure, 1997). Lors de l'essai de terrain, un polymère de viscosité 3 fois plus élevée que celle de l'eau a été incorporé à l'eau de prélavage. L'injection de ce polymère peut être représentée par la séquence 2.

Enfin, il est important de mentionner que les liquides pompés lors de la séquence 1 ne contiennent pas de contaminants étant donné que le prélavage se fait avant l'étape de l'injection des solutions de lavage visant à déloger les contaminants. Il est préférable d'avoir le moins de liquides contaminés possible à traiter et ceux qui ne le sont pas ne doivent pas être mélangés avec d'autres qui proviennent des séquences ultérieures. Les techniques de traitement d'eaux contaminées peuvent parfois être difficiles à réaliser ou encore très coûteuses, comme c'est le cas pour les BPC.

5.3.2 Séquence 2 : l'injection de la solution de lavage de viscosité 3 fois supérieure à celle de l'eau

Cette séquence est la première à faire intervenir la différence de viscosité entre les fluides. La solution de lavage a une densité identique (Foy et Saumure, communication personnelle) mais une viscosité trois fois supérieure à celle de l'eau. Comme il a été mentionné aux chapitres précédents, la simulation d'un liquide de viscosité différente de celle de l'eau est obtenue de façon simplifiée avec la relation mathématique suivante :

$\kappa = \frac{K\mu}{\rho g}$ (éq. 2.6). Compte tenu que MODFLOW© n'est pas un programme

d'écoulement multiphase, cette simplification mathématique est utilisée pour tenir compte justement, de la présence de fluides immiscibles.

Il existe des modèles numériques conçus pour l'écoulement multiphase (section 4.2.1). Cependant, ils sont très complexes et nécessitent l'utilisation de paramètres hydrauliques notamment, la dispersivité du milieu, la perméabilité intrinsèque du milieu et la saturation résiduelle des fluides (Anderson et Woessner, 1992) difficiles à évaluer ou obtenus par des estimations seulement. C'est principalement pour des raisons de complexité des modèles d'écoulement multiphase et de difficulté à évaluer les paramètres hydrauliques qu'un modèle éprouvé pour l'écoulement et le transport par advection tel que MODFLOW© a été choisi.

Si on revient à la simplification mathématique décrite précédemment (éq. 2.6), une viscosité trois fois supérieure à celle de l'eau donnera : $K = \frac{\kappa \rho g}{3\mu}$. Cela signifie que dans la parcelle de 1 m^3 , les conductivités hydrauliques horizontale et verticale doivent être diminuées tiers du pour tenir compte de la différence de viscosités. À part les conductivités hydrauliques, les autres paramètres de la simulation restent inchangés par rapport à la séquence de prélavage. Le Tableau 5.4 présente la variation des valeurs de conductivité hydraulique en fonction des viscosités pour chacune des séquences.

Tableau 5.4 : Les valeurs de conductivité hydraulique dans la parcelle lors de l'injection de produits à viscosité variable

Couche	$K_{1\mu}$ (séquence 1) (m/s)	$K_{3\mu}$ (séquence 2) (m/s)	$K_{7\mu}$ (séquence 3) (m/s)	$K_{10\mu}$ (séquence 4) (m/s)
Horizontale				
1	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}
2 (bentonite)	$1,66 \times 10^{-7}$	$1,66 \times 10^{-7}$	$1,66 \times 10^{-7}$	$1,66 \times 10^{-7}$
3	$1,66 \times 10^{-5}$	$5,53 \times 10^{-6}$	$2,37 \times 10^{-6}$	$1,66 \times 10^{-6}$
4	$1,66 \times 10^{-5}$	$5,53 \times 10^{-6}$	$2,37 \times 10^{-6}$	$1,66 \times 10^{-5}$
Verticale				
1	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}
2 (bentonite)	$1,66 \times 10^{-8}$	$1,66 \times 10^{-8}$	$1,66 \times 10^{-8}$	$1,66 \times 10^{-8}$
3	$1,66 \times 10^{-6}$	$5,53 \times 10^{-7}$	$2,37 \times 10^{-7}$	$1,66 \times 10^{-7}$
4	$1,66 \times 10^{-6}$	$5,53 \times 10^{-7}$	$5,53 \times 10^{-7}$	$1,66 \times 10^{-7}$

Comme c'était le cas pour la séquence 1, une simulation a été effectuée pour déterminer les débits d'injection et de pompage optimaux. Le Tableau 5.5 présente ces débits et la Figure 5.4 l'écoulement qui en résulte. Par ailleurs, selon le Tableau 5.5, la somme des débits des 4 puits de pompage dans la parcelle est de 1400 l/j et le temps d'injection (t_{inj}) est de 24 heures (500 l / 500 l/j).

Tableau 5.5 : Séquence 2 : les débits théoriques lors de l'injection de la solution de lavage de viscosité 3 fois supérieure à celle de l'eau

Puits	20	2	3	5	6	7	8	Total
Débit ¹ (l/j)	+ 500	- 350	- 350	- 300	- 400	- 35	- 80	- 1115

1. signe positif = injection, signe négatif = pompage

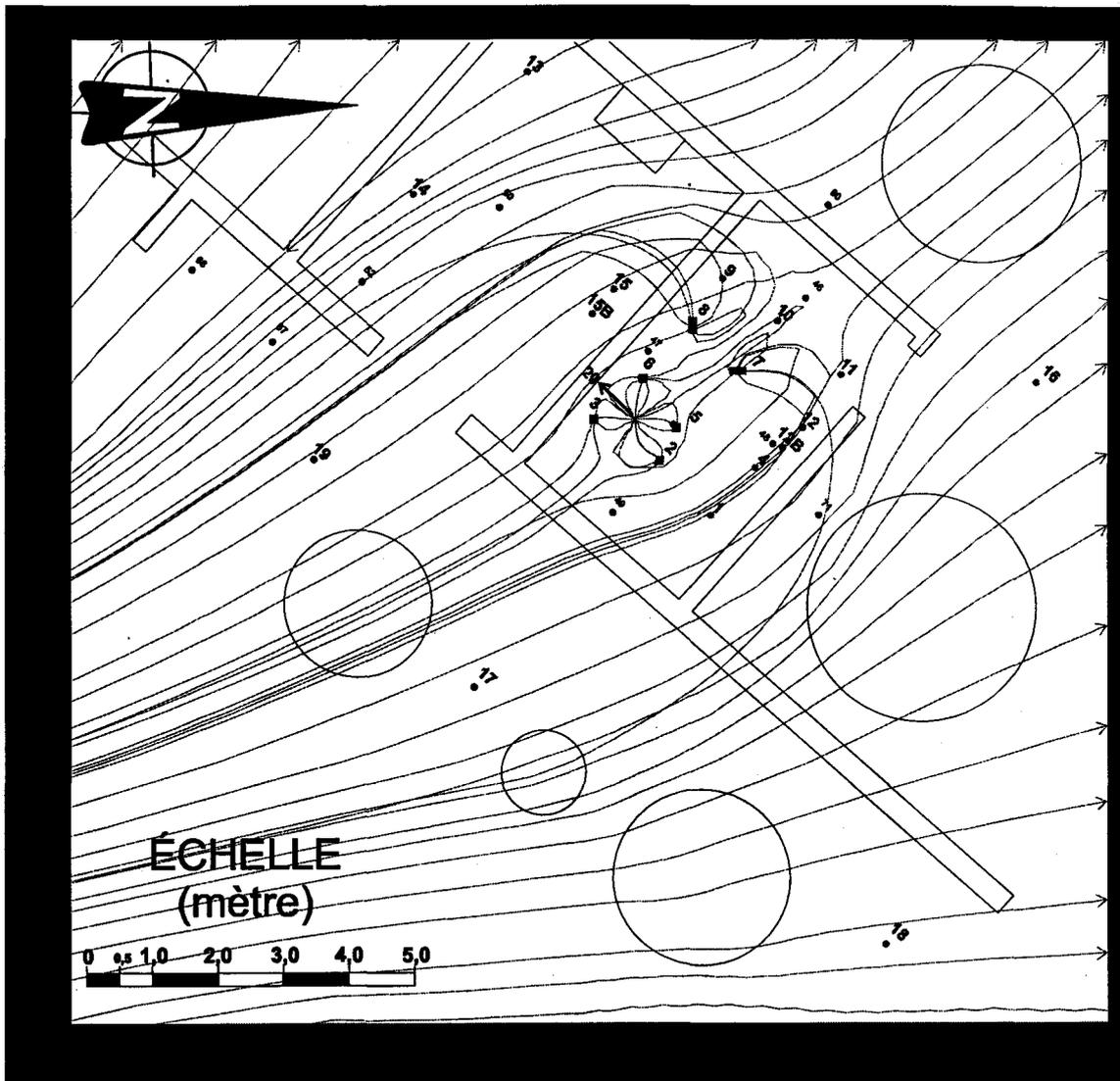


Figure 5.4 : Séquence 2 : Le patron d'écoulement lors de l'injection de la solution de lavage de viscosité 3 fois supérieure à celle de l'eau

Considérations pratiques

Il faut mentionner que la viscosité retenue pour la solution de lavage, soit 3 fois celle de l'eau, représente une moyenne escomptée pour l'ensemble de la séquence. Il s'agit d'une approximation utilisée pour faciliter la modélisation numérique. La solution de lavage choisie est composée d'un mélange d'alcool, de produit tensioactif, de polymère et d'eau. Par ailleurs, à cette étape, des BPC sont solubilisés et mobilisés de sorte que les liquides pompés doivent être entreposés et gérés distinctement de ceux recueillis lors de la séquence 1.

5.3.3 Les séquences 3 et 4 : l'injection de polymères de viscosités variables

Les séquences 3 et 4 correspondent à l'injection de polymères de viscosité 7 et 10 fois supérieures à celle de l'eau respectivement. La démarche utilisée pour déterminer les débits optimaux, le patron d'écoulement ainsi que les temps de passage d'un volume des pores de chacun des polymères est la même que pour les séquences 1 et 2. Cette section présente donc seulement les résultats obtenus. Les conductivités hydrauliques pour chacun des polymères sont données au Tableau 5.4.

Pour un polymère d'une viscosité 3 fois supérieure à celle de l'eau, les temps de passage d'un VP sont :

$$t_{inj} = 24 \text{ heures}$$

Pour une viscosité 7 fois supérieure à celle de l'eau (Tableau 5.6 et Figure 5.5), les temps de passage d'un VP sont :

$$t_{inj} = 40 \text{ heures}$$

Pour une viscosité 10 fois supérieure à celle de l'eau (Tableau 5.7 et Figure 5.6), les temps de passage d'un VP sont :

$$t_{inj} = 80 \text{ heures}$$

Considérations pratiques

Comme il a été mentionné précédemment, l'injection de polymères a pour effet d'uniformiser les propriétés de la formation. Elle permet également de favoriser le balayage horizontal et vertical des solutions de lavage à l'intérieur de la parcelle et agit comme un piston hydraulique poussant sur la solution de lavage et les contaminants. Le polymère retenu est le xanthane de qualité alimentaire. Les liquides pompés à cette étape contiennent des polymères, de la solution de lavage et des BPC.

Tableau 5.6 : Séquence 3 : les débits théoriques lors de l'injection du polymère de viscosité 7 fois supérieure à celle de l'eau

Puits	20	2	3	5	6	7	8	Total
Débit ¹ (l/j)	+ 300	- 300	- 300	- 370	- 350	- 40	- 40	- 1130

1. signe positif = injection, signe négatif = pompage

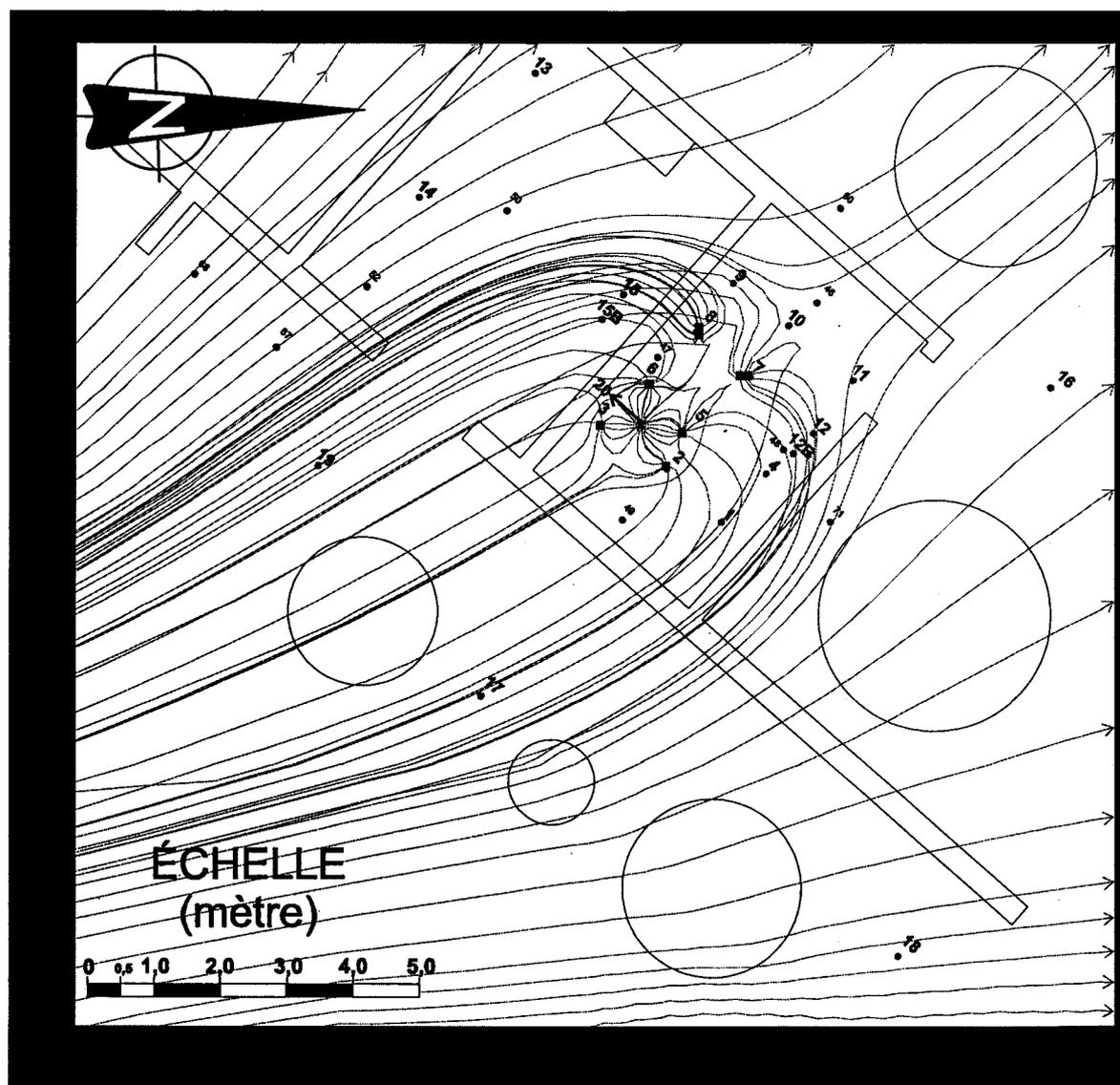


Figure 5.5 : Séquence 3 : Le patron d'écoulement lors de l'injection du polymère de viscosité 7 fois supérieure à celle de l'eau

Tableau 5.7 : Séquence 4 : Les débits théoriques lors de l'injection du polymère de viscosité 10 fois supérieure à celle de l'eau

Puits	20	2	3	5	6	7	8	Total
Débit ¹ (l/j)	+ 150	- 150	- 150	- 185	- 175	- 10	- 40	- 560

1. signe positif = injection, signe négatif = pompage

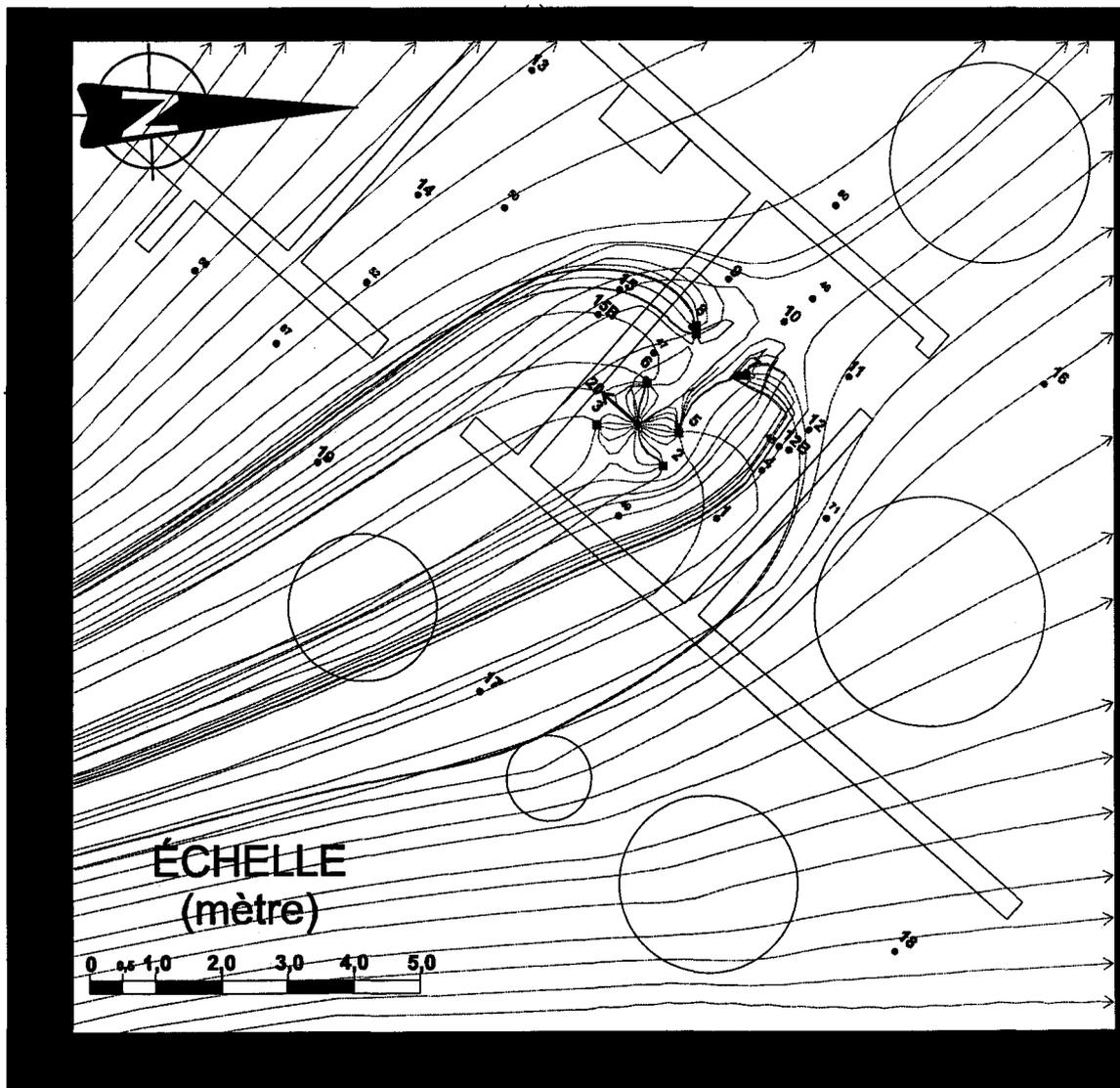


Figure 5.6 : Séquence 4 : Le patron d'écoulement lors de l'injection du polymère de viscosité 10 fois supérieure à celle de l'eau

5.3.4 La séquence 5 : le rinçage à l'eau

La modélisation de l'injection de l'eau de rinçage est identique à celle de la séquence 1 (Figure 5.3). Les débits, les temps requis pour le passage d'un volume des pores d'eau sont les mêmes que ceux donnés à la section 5.2.3, soit $t_{inj} = 13$ heures.

5.3.5 La synthèse des séquences de l'essai pilote de restauration par *lavage de sol*

Tableau 5.8 : La synthèse des séquences de l'essai pilote de restauration à l'aide de solutions tensioactives

	Débit d'injection (l/j)	Débit de pompage dans la parcelle (l/j)	Volume injecté (litre) (VP)	Temps d'injection de 1 VP (heure)
Séquence 1 : RP ¹ et pré-lavage à l'eau				
a) Régime permanent	+900	-1320	+ 900 (1,8 VP)	24 ²
b) Pré-lavage à l'eau + polymère	+500	-1400	+ 500 (1 VP)	13
Séquence 2 : solution de lavage 3 fois plus visqueuse que l'eau	+500	-1400	+ 500 (1VP)	24
Séquence 3 : polymère 7 fois plus visqueux que l'eau	+300	-1320	+ 500 (1VP)	40
Séquence 4 : polymère 10 fois plus visqueux que l'eau	+150	-760	+ 500 (1 VP)	80
Séquence 5 : rinçage à l'eau	+900	-1320	+ 500 (1 VP)	13

1. RP = régime permanent ; 2. Temps estimé pour atteindre le régime permanent

5.4 La mise en œuvre et la logistique de l'essai pilote de restauration

La modélisation numérique a été un outil fort utile pour faire la conception de l'essai pilote de restauration. Elle a permis d'obtenir les paramètres hydrauliques nécessaires à sa mise en œuvre et même de les modifier au besoin. La méthodologie utilisée pour mettre en œuvre de l'essai pilote est inspirée des travaux de Martel (1996, 1997). L'innovation du présent essai est l'intégration de la modélisation numérique pour la détermination des paramètres de conception. Les étapes de mises en œuvre sont décrites brièvement ci-après.

5.4.1 Les travaux préalables

Les principaux travaux réalisés avant l'essai de terrain sont :

1. L'échantillonnage des sols et de l'eau souterraine de la parcelle à décontaminer afin d'établir les concentrations en contaminants avant la restauration ;
2. L'installation de puits d'observation supplémentaires, notamment le puits d'injection (20) au centre de la cellule;
3. La mesure des niveaux d'eau dans les puits ;
4. Le développement des puits ;
5. Le choix du matériel et des équipements requis (décrit à la section 5.4.3) ;
6. L'installation des équipements pour l'essai ;
7. La réalisation d'essais hydrauliques complémentaires ;
8. La préparation du terrain. Dans le cas présent, une couche de bentonite a été mise en place sur la superficie de la cellule de 1 m² en remplacement de la couche de calcaire 0-3/4.

5.4.2 La réalisation de l'essai

L'essai pilote a été réalisé durant les mois d'avril et mai 1997 par une équipe d'une dizaine de personnes de l'Université Laval et de l'INRS. Bien que mon projet de

recherche portait sur la conception de l'essai pilote, j'ai néanmoins participé à plusieurs travaux avant et pendant cet essai. Ma contribution a surtout porté sur la conception, la préparation logistique, le montage des équipements sur le terrain et l'assistance en modélisation numérique en cours d'essai. L'essai de terrain s'est déroulé selon les séquences et les paramètres hydrauliques établis par la modélisation numérique résumés au Tableau 5.8.

5.4.3 La logistique de l'essai

La logistique est cette partie de l'essai qui touche le choix du matériel et de l'équipement requis ainsi que l'installation des équipements sur le terrain, étapes auxquelles j'ai participé activement.

La liste du matériel et de l'équipement requis est présentée au Tableau D.1 à l'annexe D. Ils sont classés selon leur usage soit pour l'échantillonnage des sols, l'installation des puits d'observation, la mesure des niveaux d'eau, les installations temporaires de chantier, l'injection et le pompage et la sécurité. La Figure 5.7 présente le schéma simplifié du montage de l'essai.

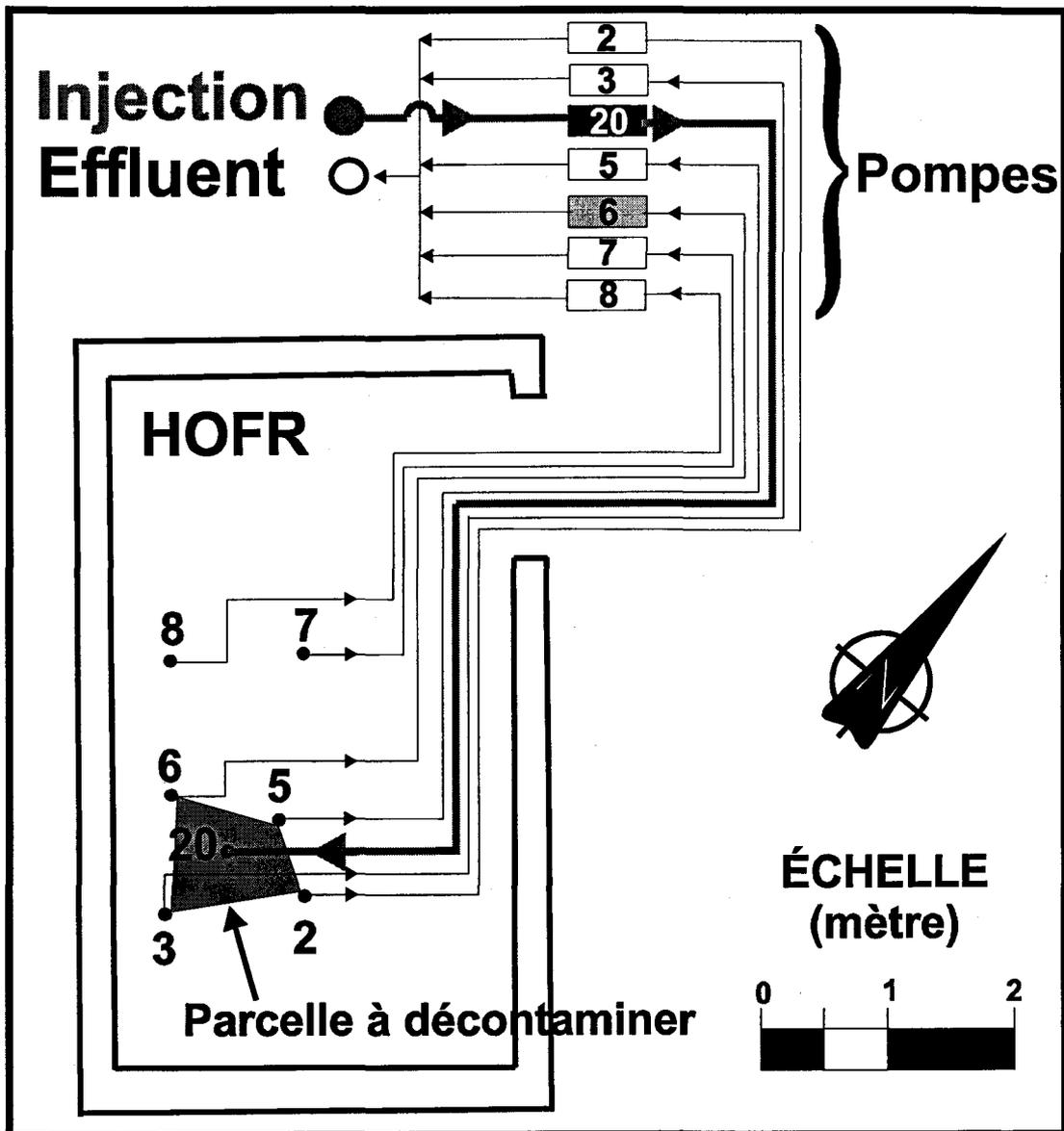


Figure 5.7 : Le montage du système d'injection et de pompage de l'essai pilote de restauration

La Figure 5.7 montre que le système est muni de 7 pompes dont une est utilisée pour l'injection (20) et six pour le pompage comprenant quatre pompes dans la parcelle et deux comme puits d'appoint. Le choix des pompes doit tenir compte de plusieurs éléments notamment la profondeur de pompage, la charge hydraulique dans le puits, la qualité de résistance à la déflagration, la compatibilité des matériaux avec les contaminants présents et la facilité de manipulation.

Des pompes péristaltiques ont été choisies parce qu'elles répondaient à ces critères ainsi que pour leur simplicité d'utilisation. Compte tenu des faibles débits dans la parcelle, il n'a cependant pas été possible d'avoir des pompes péristaltiques antidéflagrantes. Ceci a nécessité leur installation à l'extérieur de la HOFR. La capacité des pompes a été évaluée selon les valeurs indiquées par le fournisseur pour les débits fixés au Tableau 5.8. Il faut mentionner qu'il est très important de tenir compte de la charge hydraulique pour évaluer la capacité des pompes. En général, les fournisseurs indiquent les débits escomptés des pompes en fonction de la charge hydraulique. Dans notre cas, une charge hydraulique de 1 m, correspondant à la profondeur du pompage, a été considérée.

5.4.4 L'utilité de la modélisation numérique durant l'essai

La conception de l'essai pilote de restauration par modélisation numérique a été très utile notamment pour fixer les débits d'injection et de pompage initiaux des puits dans la parcelle contaminée (Tableau 5.8). Pendant la réalisation de l'essai, la modélisation numérique s'est aussi révélée très utile. En effet, en cours d'essai, il est devenu difficile de maintenir les débits théoriques fixés particulièrement lors de l'injection de liquides de grande viscosité. Les liquides extraits s'avéraient plus visqueux que ce qui était attendu et même un des puits (no 2) a cessé de fonctionner. La modélisation a permis de redéfinir les débits en fonction des changements de condition sur le terrain et ainsi d'ajuster les pompes en conséquence.

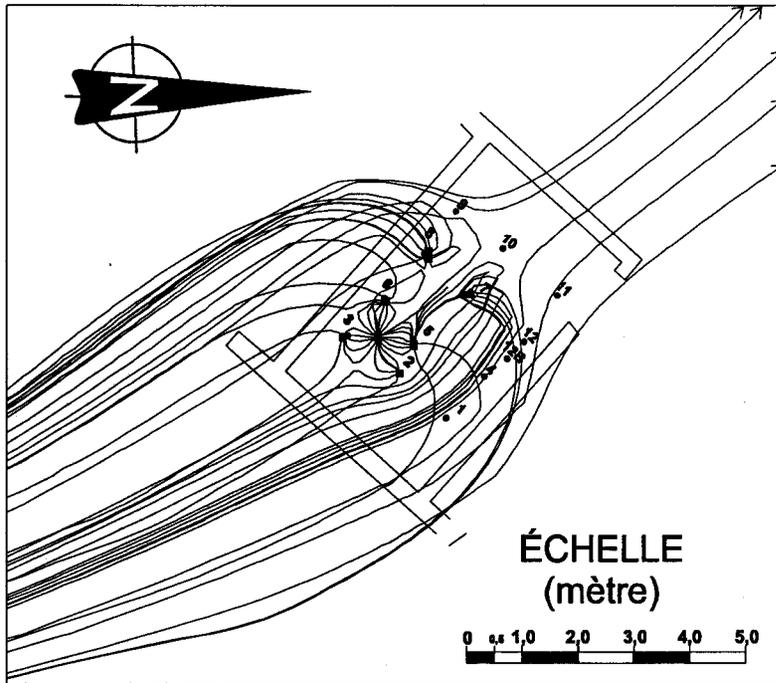
5.5 L'évaluation du modèle numérique de l'essai pilote de restauration

L'analyse exhaustive de l'essai pilote de restauration fait l'objet d'une étude distincte de mon projet de recherche. Au moment de la rédaction de ce mémoire à l'automne 1997, seuls des résultats préliminaires de l'essai pilote étaient disponibles. Ainsi, deux évaluations du modèle sont présentées dans cette section. D'abord, nous examinons la séquence 4 modifiée en cours d'essai et ensuite, nous évaluons le bilan hydraulique de l'essai.

La séquence 4 théorique et modifiée en cours d'essai pilote

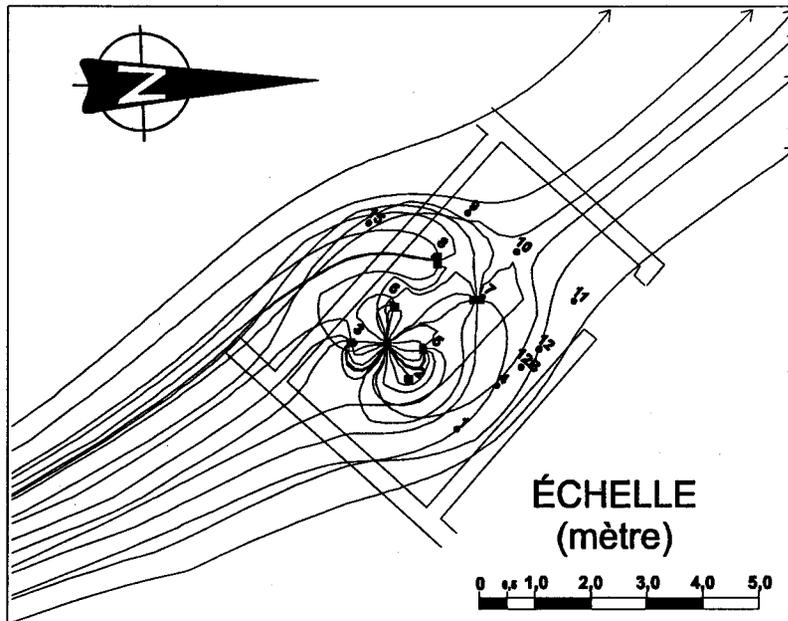
L'analyse de la séquence 4 présentée ici se veut une évaluation de l'utilité de la modélisation numérique comme outil de conception. Nous n'avons pas pu comparer la séquence 4 théorique avec celle réellement obtenue sur le terrain faute de données détaillées sur l'essai. Durant la réalisation de l'essai, à cause de conditions particulières inattendues, le puits 2 s'asséchait aux débits fixés et a dû être abandonné. De nouveaux débits ont dû être calculés en tenant compte de l'abolition du puits 2 et de la nécessité de solliciter plus fortement les puits d'appoint 7 et 8. La Figure 5.8 présente la simulation originale de la séquence 4, soit l'injection d'un polymère 10 fois plus visqueux que l'eau, et la simulation ajustée en cours d'essai.

L'utilisation de la modélisation numérique pour la conception de l'essai a l'avantage de permettre la modification de paramètres hydrauliques à n'importe quel moment. Dans la situation qui s'est présentée lors de l'essai, la modélisation a démontré non seulement son utilité à préparer adéquatement l'essai mais également à pourvoir aux imprévus durant sa réalisation, ce que ne permettent pas facilement les solutions analytiques classiques en hydrogéologie. La modélisation numérique réalisée avec les nouvelles conditions de l'essai a permis d'obtenir les débits théoriques des puits 7 et 8 de façon à empêcher la sortie des produits de lavage au-delà de ces puits. Bien qu'il ne s'agisse pas d'une comparaison entre des séquences simulées et réelles, nous pouvons quand même tirer certains constats de ces deux simulations.



**SÉQUENCE 4
SIMULATION
ORIGINALE**

<u>Puits</u>	<u>Débit (l/j)</u>
20	+ 150
2	- 150
3	- 150
5	- 185
6	- 175
7	- 10
8	- 40



**SÉQUENCE 4
SIMULATION
AJUSTÉE**

<u>Puits</u>	<u>Débit (l/j)</u>
20	+ 350
2	0
3	- 155
5	- 160
6	- 155
7	- 70
8	- 100

Figure 5.8 : La comparaison de la séquence 4 ($\mu > 10$) de la simulation originale et de la simulation ajustée en cours d'essai

La Figure 5.8 montre que le patron d'injection et de pompage théorique permettait le fonctionnement des 4 puits de pompage alors que dans la réalité, le puits 2 s'asséchait. Le puits 8 a dû être utilisé à titre de producteur pour pallier à l'absence du puits 2. Sur le terrain, il a été observé qu'au fur et à mesure que la viscosité des liquides injectés augmentait, le pompage devenait très difficile aux débits fixés. Les liquides extraits étaient beaucoup plus visqueux que ceux qui étaient injectés, probablement à cause du mélange des liquides d'injection, des BPC et des savons commerciaux produits à l'usine et présents dans l'aquifère (Martel, communication personnelle). Il va de soi que la modélisation numérique ne peut pas simuler les phénomènes de mélange qui se produisent entre les fluides immiscibles mais, elle permet de calculer de nouveaux débits en tout temps. Sachant que l'augmentation de la viscosité des liquides a pour conséquence de diminuer les conductivités hydrauliques dans la parcelle (éq. 2.6), elle a probablement aussi eu pour effet de rendre difficile le travail des puits de pompage, notamment le puits 2, d'autant plus que l'épaisseur de l'aquifère n'est que d'un mètre.

Par ailleurs, rappelons qu'une valeur uniforme de conductivité hydraulique a été utilisée pour modéliser le secteur de la HR et de la HOFR alors que la parcelle présente des variations de conductivité hydraulique (Tableau 3.2) dont la plus faible est justement à l'endroit du puits 2. La conductivité hydraulique du matériel autour du puits 2 est de $1,43 \times 10^{-7}$ m/s alors que le modèle numérique utilise une valeur de $1,66 \times 10^{-5}$ m/s pour toute la parcelle. Cette différence se chiffre à deux ordres de grandeur, ce qui pourrait être une des causes de l'assèchement du puits 2. La faible conductivité hydraulique à l'endroit du puits 2, combinée avec une augmentation des viscosités, donc une diminution des conductivités hydrauliques avec le temps, n'a certes pas aidé au bon fonctionnement de ce puits. Il semble donc que l'attribution d'une conductivité hydraulique uniforme sur toute la parcelle est une faiblesse du modèle numérique qui aurait eu une influence sur l'injection et le pompage dans la parcelle, particulièrement lorsque les viscosités augmentaient.

Le bilan hydraulique

Le Tableau 5.9 présente le bilan hydraulique théorique et celui obtenu sur le terrain. Comme il a été mentionné en début de section, les séquences de l'essai pilote ont tenu compte du nombre de volume des pores obtenu au laboratoire de façon définitive après la conception de l'essai. L'injection d'un polymère 10 fois plus visqueux que l'eau n'a pas été réalisée pour l'essai. Cependant, il faut mentionner que la viscosité indiquée pour chacune des séquences est une moyenne et que, dans le cas de la séquence 3, elle a grimpé à plus de 10 fois celle de l'eau, d'où la modélisation de la Figure 5.8 (Saumure, communication personnelle).

Tableau 5.9 : Le bilan hydraulique théorique et observé de l'essai pilote de restauration

	Nombre de VP injecté	Volume pompé (litre)		Temps d'injection (heure)		Débit d'injection (l/j)	
		Théorique ¹	Terrain ²	Théorique	Terrain	Théorique	Terrain
Séquence 1 : prélavage à l'eau							
a) Prélavage à l'eau et traceurs	1,5	-1137	-780	19,5	19,7	+900	+954
b) Polymère 3 fois plus visqueux ³	0,2	-303	-105	4,8	3,4	+500	+731
Séquence 2 : solution de lavage 3 fois plus visqueuse	7,5	-11362	-3897	180	215	+500	+466
Séquence 3 : polymère 7 fois plus visqueux	3	-7098	-1418	120	55	+300	+702
Séquence 4 : rinçage à l'eau	2	-758	-969	13	41	+900	+572
TOTAL de toutes les séquences 1a) + 1b) + 2 + 3 + 4	14,2	-20 658	-7169	337	334	--	--

1. Tiré du Tableau 5.8 ; 2. Tiré des données préliminaires de l'essai pilote (Saumure, communication personnelle) ; 3. Tiré de la séquence 2

L'analyse des résultats du Tableau 5.9 permet de faire plusieurs constats.

1. Les volumes pompés théoriques sont supérieurs en général à ceux obtenus sur le terrain, ce qui indique que le modèle numérique a tendance à surestimer les volumes pompés.

Pour expliquer cette surestimation, rappelons que l'injection de liquides de viscosités différentes est simulée à l'aide de l'équation simplifiée 2.6, c'est-à-dire que pour chaque augmentation de viscosité, la conductivité hydraulique à l'intérieur de la parcelle était diminuée d'autant (section 5.2.3). Sachant qu'en condition d'écoulement l'eau aura tendance à voyager plus facilement dans un milieu plus perméable, l'eau de l'extérieur de la parcelle sera attirée plus facilement par les puits de pompage que celle à l'intérieur de la cellule, entraînant le pompage d'un plus grand volume d'eau provenant de l'extérieur de la parcelle.

Cette hypothèse concorde d'ailleurs avec le fait qu'il y a un grand écart entre les débits d'injection et de pompage des simulations. En effet, selon les tableaux 5.2 et 5.5 à 5.7, les débits totaux de chaque séquence sont tous négatifs ce qui indique que le système pompe plus qu'il n'injecte, parfois jusqu'à plus de deux fois avec l'augmentation des viscosités. Le pompage de l'eau provenant de l'extérieur est donc plus facile pour le système modélisé qu'il ne le serait en réalité.

2. En ce qui concerne les débits d'injection obtenus, ils concordent assez bien avec les prédictions du début de l'opération. C'est à partir de l'introduction du polymère que les débits présentent des valeurs plus discordantes.

Comme il a été mentionné précédemment, les liquides extraits sont devenus plus visqueux que ce qui était escompté. Il semble que le mélange des solutions de lavage, des BPC et des savons commerciaux présents dans l'aquifère n'ait pas eu un effet positif. Sachant que l'augmentation de la viscosité des liquides a pour conséquence de diminuer les conductivités hydrauliques dans la parcelle (éq. 2.6), elle a probablement

aussi eu pour effet de rendre difficile le travail des puits de pompage, ce qui expliquerait vraisemblablement la différence dans les débits à partir de ce moment.

3. Les temps d'injection, pour leur part, sont liés directement aux débits d'injection. Pour la modélisation numérique, le temps total d'injection de 13,2 VP est de 337 heures alors qu'il est de 334 heures pour l'essai de terrain, ce qui est très concordant.

CHAPITRE 6

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La compagnie Domtar a exploité une usine de fabrication de charbon et d'alcool de bois sur un terrain situé à environ 200 kilomètres au nord de Toronto en Ontario. Une autre compagnie a repris les activités de production depuis quelques années et fabrique entre autres des savons commerciaux.

Durant les années cinquante, la compagnie Domtar a utilisé des BPC à des fins énergétiques dans les salles de fournaies. Des études de caractérisation du site montrent la présence d'une contamination en BPC principalement sous ces secteurs de bâtiments appelés *Hot Oil Furnace Room (HOFR)* et *Hot Room (HR)*.

La technologie retenue par la compagnie Domtar pour restaurer les sols et l'eau souterraine sous des bâtiments est celle qui fut développée par l'Université Laval de 1993 à 1997 (Martel et al., 1993, 1996 et 1997). Le projet "Domtar" porte sur la recherche et le développement d'une technologie de décontamination *in situ* des sols et de l'eau souterraine contaminés par des biphényles polychlorés (BPC). Les BPC sont des fluides immiscibles dans l'eau. La récupération des contaminants immiscibles est basée sur les principes utilisés dans l'industrie pétrolière et consiste à injecter des solutions tensioactives dans le but de favoriser la solubilisation et la mobilisation des contaminants. Cette technique est appelée communément *lavage de sol*.

Les étapes d'une restauration avec la technique de *lavage de sol* sont : la réalisation d'essais de laboratoire permettant de trouver les solutions tensioactives les plus efficaces, la vérification, en laboratoire, de l'efficacité des solutions tensioactives sur des sols

contaminés provenant du terrain à l'étude ainsi que la conception et la réalisation d'un essai de terrain. Ce projet de maîtrise a porté sur la conception d'un essai pilote à l'aide de la modélisation numérique. J'ai également participé à d'autres travaux connexes tels que la caractérisation exhaustive du site, la coordination et la préparation de l'essai pilote et la réalisation d'essais de laboratoire. Les travaux de terrain réalisés font l'objet d'un rapport distinct (Roy, 1997).

La conception de l'essai pilote par modélisation numérique s'est faite en plusieurs étapes. Une première étape consiste à déterminer l'écoulement de l'eau souterraine à l'échelle de la propriété selon une méthodologie systématique (Anderson et Woessner, 1992). L'écoulement de l'eau souterraine à l'échelle de la propriété a été modélisé à partir de la carte piézométrique du site dont les lignes de courant et équipotentielles correspondaient à des limites à flux nul et à charge hydraulique imposée.

Comme l'essai pilote se déroule sur une parcelle de 1 m² dans la HOFR, le domaine initial a été réduit une première fois pour avoir plus de précision dans la zone étudiée. Ce nouveau domaine à l'échelle de la HOFR, a servi notamment à faire le choix du patron d'injection et de pompage et à établir les paramètres initiaux de l'essai pilote. Un patron carré a été retenu pour la réalisation des scénarios de restauration. Il est constitué d'un puits d'injection central (20), de quatre puits de pompage périphériques (2, 3, 5 et 6) et de deux puits d'appoint en aval hydraulique (7 et 8).

Ce domaine a été réduit à son tour à l'échelle de la parcelle à décontaminer pour les simulations de l'essai pilote de restauration de façon à obtenir des mailles de 12,5 cm de côté à l'intérieur de la cellule. Les scénarios de restauration ont été inspirés des séquences typiques d'un essai de *lavage de sol* (Martel et al., 1997) : 1. le régime permanent et le pré-lavage à l'eau avec un polymère de viscosité 3 fois supérieure à celle de l'eau, 2. l'injection d'une solution de lavage de viscosité 3 fois supérieure à celle de l'eau, 3. l'injection d'un polymère de viscosité 7 fois supérieure à celle de l'eau ainsi que 4. le rinçage à l'eau. Les différences de viscosité ont été simulées à l'aide de la relation entre la

conductivité hydraulique (K) à la viscosité (μ) $\kappa = \frac{K\mu}{\rho g}$ (éq. 2.6). Comme la viscosité est inversement proportionnelle à la conductivité hydraulique, une augmentation de viscosité de 3 fois correspondrait à une diminution d'un facteur 3 de la conductivité hydraulique. Pour chacune des séquences, les volumes injectés, les volumes pompés, les débits et les temps d'injection théoriques ont été calculés en fonction de la viscosité. L'analyse exhaustive de l'essai pilote ne fait pas partie du présent mémoire mais, les résultats préliminaires de l'essai ont été utilisés pour faire une évaluation du modèle numérique. L'évaluation du modèle porte sur deux aspects, soit la modélisation de la séquence 4 d'injection d'un polymère 10 fois plus visqueux que l'eau ainsi que le bilan hydraulique de l'essai.

La **modélisation de la séquence 4** originale est comparée à la modélisation de la séquence 4 ajustée à la suite du changement des conditions de pompage en cours d'essai lié à l'assèchement du puits 2. L'analyse de la séquence 4 permet d'évaluer l'utilité de la modélisation numérique comme outil de conception et non de comparer des valeurs théoriques et de terrain faute de données détaillées sur l'essai. Durant la réalisation de l'essai, le puits 2 a dû être abandonné et de nouveaux débits ont dû être calculés en tenant compte de son abolition et de la nécessité de solliciter plus fortement les puits d'appoint 7 et 8. L'utilisation de la modélisation numérique pour la conception de l'essai a l'avantage de permettre la modification de paramètres hydrauliques à n'importe quel moment. Elle a démontré non seulement son utilité à préparer adéquatement l'essai mais également à pourvoir aux imprévus durant sa réalisation, ce que ne permettent pas facilement les solutions analytiques classiques en hydrogéologie. La modélisation numérique réalisée avec les nouvelles conditions de l'essai a permis d'obtenir les débits théoriques des puits 7 et 8 de façon à empêcher la sortie des produits de lavage.

À l'examen de la simulation 4 originale avec celle ajustée en cours d'essai, certains facteurs peuvent expliquer l'assèchement du puits 2. Sur le terrain, il a été observé qu'au fur et à mesure que la viscosité des liquides injectés augmentait, le pompage devenait très difficile aux débits fixés. Les liquides extraits étaient beaucoup plus visqueux que ceux

qui étaient injectés, probablement à cause du mélange des liquides d'injection, des BPC et des savons commerciaux présents originellement dans l'aquifère (Martel, communication personnelle). Sachant que l'augmentation de la viscosité des liquides a pour conséquence de diminuer les conductivités hydrauliques dans la parcelle (éq. 2.6), elle a probablement aussi eu pour effet de rendre difficile le travail des puits de pompage, notamment le puits 2, d'autant plus que l'épaisseur de l'aquifère n'est que d'un mètre.

Par ailleurs, rappelons qu'une valeur uniforme de conductivité hydraulique a été utilisée pour modéliser toute la parcelle alors qu'en réalité elle présente des variations de conductivité hydraulique (Tableau 3.2) dont la plus faible est justement à l'endroit du puits 2. La différence de conductivité hydraulique entre le matériel autour du puits 2 et celle attribuée au modèle est de deux ordres de grandeur. La faible conductivité hydraulique à l'endroit du puits 2, combinée avec une augmentation des viscosités pourraient être des causes de l'assèchement de ce puits. Il semble donc que l'attribution d'une conductivité hydraulique uniforme sur toute la parcelle est une faiblesse du modèle numérique qui aurait eu une influence sur l'injection et le pompage, particulièrement lorsque les viscosités augmentaient.

Pour ce qui est du **bilan hydraulique global de l'essai**, les résultats partiels montrent différentes tendances en ce qui a trait aux volumes pompés ainsi qu'aux débits et aux temps d'injection.

Les volumes pompés théoriques obtenus du modèle numérique sont nettement supérieurs aux volumes réels, ce qui indique que le modèle a tendance à surestimer les volumes pompés. Une des causes de cette surestimation serait probablement liés à la simplification mathématique (éq. 2.6) utilisée pour simuler l'injection de liquides de viscosités différentes, c'est-à-dire que pour chaque augmentation de viscosité, la conductivité hydraulique à l'intérieur de la parcelle était diminuée d'autant. Sachant que l'eau souterraine aura tendance à voyager plus facilement dans un milieu plus perméable, l'eau de l'extérieur de la parcelle sera attirée plus facilement par les puits de pompage que celle à l'intérieur de la cellule. Cette hypothèse concorde d'ailleurs avec le fait qu'il y a un

grand écart entre les débits d'injection et de pompage des simulations alors que le système pompe plus qu'il n'injecte, parfois jusqu'à plus de deux fois avec l'augmentation des viscosités. Le pompage de l'eau provenant de l'extérieur est donc plus facile pour le système modélisé qu'il ne le serait sur le terrain.

Les débits et les temps d'injection réels, pour leur part, concordent en général assez bien avec les valeurs projetées, particulièrement jusqu'à l'introduction du polymère de viscosité 7 fois supérieure avec celle de l'eau. Après l'injection du polymère, les résultats sont plus variables. Le mélange *in situ* des solutions tensioactives, des BPC et des savons commerciaux a probablement occasionné des changements notables au niveau de la conductivité hydraulique de la parcelle, ce qui expliquerait vraisemblablement la différence des débits à partir de ce moment. La présence d'une conductivité hydraulique locale plus faible au puits 2 plutôt qu'uniforme tel que fixé dans le modèle aurait également influencé les débits et les temps d'injection.

Malgré les écarts entre les résultats du modèle numérique et de l'essai de terrain, il appert que le modèle semble performant pour établir l'écoulement et le bilan hydraulique en présence d'eau ou de liquides montrant une faible différence de viscosité avec l'eau. Lorsque la viscosité est supérieure de façon appréciable à celle de l'eau (plus de 3 fois), le bilan hydraulique est moins probant entre les valeurs théoriques et réelles.

Évaluation des travaux et recommandations

1. Le programme MODFLOW©

- a) L'utilisation d'un modèle numérique tel que MODFLOW© a pour principal avantage l'établissement d'une solution de l'écoulement souterrain fiable et simplifiée dans un système à phase unique d'eau. Il a toutefois certaines limites lorsqu'il implique la présence de plusieurs fluides immiscibles.

La principale limite concerne la simplification mathématique $\kappa = \frac{K\mu}{\rho g}$ utilisée afin de

tenir compte de la présence de fluides de viscosités différentes. Il existe des programmes numériques adaptés aux cas de restauration de liquides immiscibles qui tiennent compte de plusieurs propriétés que MODFLOW© n'intègre pas. Ces propriétés sont notamment de la densité, de la perméabilité intrinsèque du fluide, de la dispersivité et des propriétés des fluides immiscibles (tension interfaciale, capillarité, perméabilité relative). Cependant, les modèles conçus pour l'écoulement multiphase présentent une grande difficulté en ce qui a trait à la détermination des paramètres nécessaires à la modélisation qui, pour plusieurs doivent être estimés. Par ailleurs, du fait que les équations de base de ces modèles intègrent ces paramètres, les calculs servant à déterminer l'écoulement sont complexes et fastidieux.

- b) Le modèle numérique utilisé, quoique très simpliste pour résoudre le transport des contaminants immiscibles, a été un bon outil pour la planification de l'essai pilote. Ceci est d'autant plus vrai qu'il a été possible, en cours d'essai, de simuler d'autres conditions d'injection et de pompage alors qu'un puits est devenu non fonctionnel.
- c) Même si le bilan hydraulique n'est pas concluant sur le plan de l'estimation des volumes, il a permis de déterminer les débits et les temps d'injection d'une façon satisfaisante ainsi que de choisir l'équipement nécessaire à l'essai. La modélisation numérique s'est révélée très utile comme outil de conception surtout si on considère que ces paramètres sont déterminés de façon empirique en général.
- d) Malgré tous les points faibles du modèle numérique choisi, il est indéniable que la modélisation numérique s'avère un excellent outil de conception puisqu'elle est versatile et surtout adaptable aux conditions changeantes du terrain. Cette une technique recommandable dans le cas de projets qui s'échelonnent sur une année ou plus.

2. Le choix des paramètres du modèle numérique du terrain à l'étude

Le choix des paramètres du modèle numérique ont eu une influence sur les résultats des modélisations numériques effectuées.

- a) Comme il a déjà été mentionné, la parcelle à décontaminer occupe une superficie de 1 m², un volume de 1 m³ et le maillage a une dimension de 12,5 cm à l'intérieur de la parcelle. Le diamètre des puits est de 5 cm de sorte que le modèle numérique aurait gagné en précision si la zone modélisée avait été raffinée encore à l'échelle des puits dans la HOFR. Par ailleurs, au niveau vertical, le choix de diviser l'unité de sable silteux en deux couches est très judicieux puisqu'il permet de tenir compte de l'assèchement sur chaque couche indépendamment (section 4.2.2.3).
- b) La conductivité hydraulique est probablement la propriété hydraulique qui a eu le plus d'impact sur la modélisation numérique. Le modèle calibré présente une conductivité hydraulique uniforme sur l'ensemble de la parcelle alors qu'elle est plutôt variable en réalité. Dans le cas du puits 2, la valeur du modèle présentait même une différence de deux ordres de grandeur par rapport à la valeur de terrain.
- c) La simplification de la présence de fluides à viscosités variables par une diminution de la conductivité hydraulique dans la parcelle (éq. 2.6) a introduit une surestimation des volumes pompés. Lorsque la conductivité hydraulique dans la parcelle diminuait, celle à l'extérieur demeurait inchangée. Comme l'eau souterraine a plus de facilité à voyager dans un milieu perméable, l'eau provenant de l'extérieur de la parcelle s'avère plus facile à pomper. La parcelle aurait dû être conçue de façon à inclure une plus grande portion autour de chaque puits afin de minimiser l'effet de contraste de conductivité hydraulique à l'intérieur et à l'extérieur de la parcelle.
- d) Une façon d'améliorer le modèle numérique actuel est de réduire le domaine, de raffiner le maillage à l'intérieur de la parcelle, de considérer les variations de

conductivités hydrauliques dans la formation ainsi que d'augmenter la dimension de la parcelle pour diminuer les volumes pompés de l'extérieur.

3. Les phénomènes chimiques entre les fluides

Le mélange des solutions tensioactives, des BPC et des savons commerciaux dans la formation aquifère a interféré avec l'essai pilote. La modélisation numérique ne peut pas tenir compte de ces phénomènes mais, a permis, dans le cas présent, de modifier les paramètres hydrauliques en cours d'essai. Nous ne pouvons que constater que le mélange des différents liquides aurait favorisé la baisse des conductivités hydrauliques *in situ* déjà légèrement surestimées par le modèle numérique. Une étape subséquente à l'essai pilote devrait inclure le choix de solutions de lavage qui tiendraient compte de cette interaction.

4. L'analyse de l'essai pilote de terrain

Les résultats de l'essai pilote de terrain étaient préliminaires au moment d'écrire ce mémoire. L'analyse plus exhaustive de l'essai pilote devrait permettre de mieux établir les volumes injectés et pompés aux différentes séquences, de préciser les viscosités des produits ainsi que l'efficacité de récupération des contaminants.

5. Les suggestions pour l'essai à grande échelle

Le domaine calibré à l'échelle de la propriété est réutilisable pour un essai éventuel à grande échelle. Cette possibilité de réutilisation du modèle numérique était un des avantages qui avait arrêté notre choix sur la modélisation numérique comme outil de conception d'un essai de restauration. Une des modifications à apporter au modèle à grande échelle serait l'introduction de conductivités hydrauliques variables plutôt qu'uniformes. À la verticale, le nombre total de couches pourrait passer de 4 à 3 en enlevant la partie superficielle de la couche de remblai de surface non saturée.

BIBLIOGRAPHIE

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

Bear, J., 1972. Dynamics of fluids in porous media. American Elsevier.

Carrier G., 1985. Les effets toxiques des BPC et les produits apparentés sur l'animal et l'humain, conférence prononcée lors d'une réunion de l'association canadienne des médecins en santé au travail.

Chiang W.H., 1994. PMPATH for Windows, User's manual Scientific Software Group. Washington, DC.

Chiang W.H., Kinzelbach W., 1996. Processing Modflow, A simulation system for modeling groundwater flow and pollution, USA.

Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME), non daté. Les dioxines et les furanes, la situation au Canada, Winnipeg, Manitoba.

Conseil canadien des ministres des ressources et de l'environnement (CCMRE), 1986. La question des BPC, Toronto, Ontario.

Craig F.F., 1971. The reservoir engineering aspects of waterflooding, Society of Petroleum Engineers, Monograph vol.3 New-York.

- Decommissioning consulting services limited (DCS), 1995. Hot oil furnace room sub-lab soil remediation, Longford Mills surfactant plant, Longford Mills, Ontario, Prepared for Domtar, Ontario.
- Doherty J., Brebber, Whyte P., 1994. PEST-Model independant parameter estimation. User's manual, Watermark Computing, Australia.
- Domenico A.P., Schwartz F.W., 1990. Physical and chemical hydrogeology, John Wiley & Sons, United States.
- Driscoll F.G., 1986. Groundwater and wells, Johnson Division, 2nd edition, Minnesota.
- Environmental Strategies limited (ESL), 1990. Environmental property assessment, Longford Mills plant site and adjacent north property, Prepared for Domtar, Ontario.
- Environmental Strategies limited (ESL), 1992. Subsurface study Longford Mills plant, Phase II, Prepared for Domtar, Ontario.
- Environmental Strategies limited (ESL), 1994. Routine water quality monitoring results, the Longford Mills plant site, Prepared for Domtar, Ontario.
- Freeze R.A., Cherry J.A., 1979. Groundwater. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NewJersey.
- Gélinas P., Martel R., Lefebvre R., Therrien R., Sylvestre M., 1995. Restauration in situ d'aquifères contenant des biphényles polychlorés (BPC) par l'injection de solutions tensio-actives, Université Laval, Québec.
- Geophysics GPR International inc, 1996. Ground penetrating radar survey in Longford Mills, Ontario.

- Goyer N., 1980. Biphényles polychlorés, Bureau d'études sur les substances toxiques (BEST), Ministère de l'environnement du Québec.
- Howard P.H., 1989. Handbook of environmental fate and exposure data for organic chemicals, Volumes I and II, Lewis Publishers, Michigan.
- International programme on chemical safety (IPCS), 1992. Polychlorinated biphenyls (PCB's) and polychlorinated terphenyls (PCT's) health and safety guide, World health organization, Geneva.
- Javandel, I., Doughty, C., Tsang, C.F., 1984. Groundwater Transport: Handbook of Mathematical Models. American Geophys. Union (Washington), Water Res. Monograph 10, 228p.
- Lefebvre R., 1996. Écoulement en milieu poreux, notes de cours, Institut national de la recherche scientifique, Sainte-Foy, Québec.
- Lefebvre R., Gélinas P. Hydrogéologie, notes de cours, Département de géologie, Université Laval, Sainte-Foy, Québec.
- Lepage N., 1996. Modélisation tridimensionnelle régionale et locale de l'écoulement de l'eau souterraine sur l'Île de Montréal et au Centre de Tri et d'Élimination des Déchets de la Ville de Montréal, Université du Québec, Institut National de la recherche scientifique, Sainte-Foy, Québec.
- Kruseman G.P., de Ridder N.A., 1990. Analysis and evaluation of pumping test data. 2nd edition, ILRI Publication 47, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands.
- de Marsily G., 1986. Quantitative Hydrogeology. Academic Press, San Diego, CA, 440 p.

- Martel K.E., 1995. Utilisation de solutions de polymères pour améliorer l'efficacité de balayage des solutions tensioactives développées pour la restauration d'aquifères contaminés aux hydrocarbures immiscibles lourds, Faculté des sciences et de génie, Université Laval, Sainte-Foy, Québec.
- Martel R., Gélinas P.J., Desnoyers J.E., Masson A., 1993. Phase Diagram to Optimize Surfactant Solutions for Oil and DNAPL Recovery in Aquifers. Ground Water v.31, no. 5, pp. 789-800.
- Martel R., Gélinas P.J., 1996. Surfactants Solutions for NAPL Recovery in Contaminated Aquifers. Ground Water v.34, no. 1, pp. 143-154.
- Martel R., Gélinas P.J., Desnoyers J.E., 1997. Aquifer washing by micellar solutions : 1- Optimization of alcohol/surfactant/solvent solutions. Journal of Contaminant Hydrology (accepté 17/02/97, sous presse).
- Martel R., Lefebvre R., Gélinas P.J., 1997. Aquifer washing by micellar solutions : 2- DNAPL Recovery mechanisms for an optimized alcohol/surfactant/solvent solution. Journal of Contaminant Hydrology (accepté 17/02/97, sous presse).
- Martel R., Gélinas P.J., Saumure L., 1997. Aquifer washing by micellar solutions : 3- Preliminary Field test at Thouin Sand pit, Québec, Canada. Journal of Contaminant Hydrology (accepté 17/02/97, sous presse).
- McDonald M.C., Harbaugh A.W., 1988. Modflow, a modular three-dimensional finite difference ground-water flow model. US Geological Survey, Open-file report 83-875, Chapter A1, Washington, DC.
- Ministère de l'environnement et de la faune (MEF), 1993. Éléments sur les substances toxiques, de tout pour tous, Montréal.

- National library of medicine, 1994. Hazardous Substance Data Bank (HSDB), Micromedex inc.
- Pollock D.W., 1988. Semianalytical computation of path lines for finite difference models, Ground Water (26) 6, 743-750.
- Pollock D.W., 1989. MODPATH (version 1.x) Documentation of computer programs to compute and display pathlines using results from the US Geological Survey modular three-dimensional finite-difference ground-water model, US Geological Survey open-file report 89-381.
- Pollock D.W., 1994. User's guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, version 3: A particle tracking post-processing package for MODFLOW US Geological Survey finite-difference ground-water flow model, Reston, VA US Geological Survey.
- Prudic D.E., 1989. Documentation of a computer program to simulate stream-aquifer relations using a modular, finite-difference, ground-water flow model, US Geological Survey, Open-file report 88-729, Carson City, Nevada.
- Roberts J.R., Rodgers D.W., Bailey J.R., Rorke M.A., 1979. Polychlorobiphényles: critères biologiques pour évaluer leurs effets sur l'état de l'environnement, Conseil national de recherches Canada (CNRC), Ottawa.
- Roy A., 1997. Rapport de la caractérisation complémentaire de juin 1996 et de l'essai de pompage de décembre 1996. Terrain de la compagnie Domtar à Longford Mills, Ontario, Institut national de la recherche scientifique, Sainte-Foy, Québec.
- Schwarzenbach R.P., Gschwend P.M., Imboden D.M., 1993. Environmental organic chemistry, John Wiley and sons inc., USA.

Therrien R., 1996. Cours de modélisation en hydrogéologie, Département de géologie, Université Laval, Sainte- Foy, Québec.

Trépanier J.P., 1984. Biphényles polychlorés, informations générales et situation au Québec, Ministère de l'environnement du Québec, Service des études d'impact.

UNIVERSITÉ LAVAL, 1995. Restauration in situ d'aquifères contenant des biphényles polychlorés (BPC) par l'injection de solutions tensioactives. Université Laval. Sainte-Foy, Québec.

Weast R.C., 1974-1975. Handbook of chemistry and physics, 55th edition, CRC Press, Ohio.

Zheng C., 1990. MT3D, a modular three-dimensional transport model, SS Papadopoulos an Associates, Inc., Rockville, Maryland.

ANNEXE A
LES CARACTÉRISTIQUES DES BPC

Tableau A.1: Les usages des principaux aroclors

Usages	Types d'aroclors utilisés								
	1221		1242 (1)		1254				
Condensateurs élec.									
Transformateurs élec.			1242		1254	1260			
Pompes à vide				1248	1254				
Fluides hydrauliques		1232	1242	1248	1254	1260			
Résines synthétiques				1248	1254	1260	1262	1268	(2)
Adhésifs	1221	1232	1242	1248	1254				
Caoutchouc	1221	1232	1242	1248	1254			1268	
Échangeurs de chaleur			1242						
Cires			1242		1254			1268	(2)
Abat-poussières					1254	1260			
Solvants de pesticides, encre, lubrifiants, huiles de coupe					1254				
Papiers à reproduction			1242						

(1) = Avant 1972

(2) = BPC-TPC= mélange de biphényles polychlorés (BPC) et de terphényles polychlorés (TPC)

Tableau A.2 : La composition chimique de différents aroclors

Aroclor ¹	1221 %		1242 %		1248 %		1254 %		1260 %	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
C ₁₂ H ₁₀	11	--	<0,1	--			<0,1	--		
C ₁₂ H ₉ Cl	51	--	1	3			<0,1	--		
C ₁₂ H ₈ Cl ₂	32	--	16	13	2	2	0,5	--		
C ₁₂ H ₇ Cl ₃	4	--	49	28	18	18	1	--		
C ₁₂ H ₆ Cl ₄	2	--	25	30	40	40	21	11		
C ₁₂ H ₅ Cl ₅	<0,5	--	8	22	36	36	48	49	12	12
C ₁₂ H ₄ Cl ₆			1	4	4	4	23	34	38	38
C ₁₂ H ₃ Cl ₇			<0,1				6	6	41	41
C ₁₂ H ₂ Cl ₈									8	8
C ₁₂ HCl ₉									1	1

1. Trépanier (1984) indique la présence de dibenzofurannes dans tous les BPC

(1) = (Goyer, 1980)

(2) = (IPCS, 1992)

Tableau A.3 : Les propriétés physico-chimiques des principaux aroclors

Aroclor	T _{éb} (°C)	P _v (mm de Hg)	H (atm m ³ /mol)	S (mg/l)	log K _{ow}	M _{mol} (mol)	ρ (g/cm ³)	μ (centipoises)
1221	275-320 à 750 mm Hg (3)	6,7 x 10 ⁻³ à 25 °C (3)	3,5 x 10 ⁻³ à 25 °C (3)	0,59 à 25 °C (3)	4,46 à 8,18 pour les 209 congénères (3)	--	1,15 à 25 °C (3)	--
1232	290-325 à 750 mm Hg (3)	4,1 x 10 ⁻³ à 25 °C (3)	--	0,45 à 25 °C (3)	4,46 à 8,18 pour les 309 congénères (3)	--	1,24 à 25 °C (3)	--
1016	325-356 à 750 mm Hg (3)	4,0 x 10 ⁻⁴ à 25 °C (3)	2,9 x 10 ⁻⁴ à 25 °C (3)	0,42 à 25 °C (3)	4,46 à 8,18 pour les 209 congénères (3)	--	1,33 à 25 °C (3)	--
1242	325-366 à P=? (1) 325-366 à P=750 mm Hg (3)	4,1 x 10 ⁻⁴ à 20 °C (2) 4,1 x 10 ⁻³ à 25 °C (3) 4,06 x 10 ⁻⁴ à T=? (5)	3,43 x 10 ⁻⁴ à 25 °C (1) 5,6 x 10 ⁻⁴ à T=? (2) 5,2 x 10 ⁻⁴ à 25 °C (3)	0,240 à 25 °C (1) 0,24 à 25 °C (3) 0,2 à 20 °C (5) 0,24 à 25 °C (6)	4,11 (1) 4,46 à 8,18 pour les 209 congénères (3)	261 (1)	1,392 à 25 °C (1) 1,381 à 15,5 °C (1) 1,35 à 25 °C (3) 1,392 à 15 °C (5) 1,381 à 25 °C (5) 1,392 à 15 °C (6)	16-19 centistokes à 37,8 oC (1) 7-9 cs à 54,4 oC (1) 2,5 cs à 98,9 oC (1) réf. (6) donne les mêmes valeurs

(suite) Tableau A.3 : Les propriétés physico-chimiques des principaux aroclors

Aroclor	T _{éb} (°C)	P _v (mm de Hg)	H (atm m ³ /mol)	S (mg/l)	log K _{ow}	M _{mol} (mol)	ρ (g/cm ³)	μ (centipoises)
1248	340-375 à P=? (1) 340-375 à P=750 mm Hg (3)	4,9 x 10 ⁻⁴ à 20 °C (1) 4,9 x 10 ⁻⁴ à 25 °C (3) 4,9 x 10 ⁻⁴ à T=? (5)	3,5 x 10 ⁻³ à T=? (1) 2,8 x 10 ⁻³ à 25 °C (3)	0,054 à T=? (2) 0,054 à 25 °C (3) 0,1 à 20 °C (5) 0,054 à 25 °C (5)	6,11 (1) 4,46 à 8,18 pour les 209 congénères (3)	288 (1)	1,405-1,415 à 15,5 °C (1) 1,41 à 25 °C (3) 1,415 à 15 °C (5) 1,405 à 25 °C (5)	3-3,5 cs à 98,9 °C (1) 40-55 à 37,8 oC (6) 14-16 cs à 54,4 oC (6) 3,5 cs à 98,9 oC (6)
1254	365-390 à 750 mm Hg (3)	7,7 x 10 ⁻⁵ à 20 et 25 °C (1) 7,7 x 10 ⁻⁵ à 25 °C (3) 7,71 à T=? (5)	2,7 x 10 ⁻³ à T=? (1) 2,0 x 10 ⁻³ à 25 °C (3)	0,012 à 25 °C (1) 0,021 à 25 °C (3) 0,05 à 20 °C (5) 0,012 à 25 °C (5) 0,05 à T=? (6)	6,03 (1) 4,46 à 8,18 pour les 209 congénères (3)	327 (1)	1,495 à 65 °C (1) 1,505 à 15,5 °C (1) 1,5 à 25 °C (3) 1,505 à 15 °C (5) 1,495 à 25 °C (5) 1,505 à 15 °C (6)	1800-2500 = ? Cs à 37,8oC (1) 5,5-7 cs à 98,9 oC 1800-2500 = ? cs à 37,8 oC 55-75 cs à 54,4 oC 5,5-7 cs à 98,9 oC
1260	385 à P=? (1) 385-420 à P= 760 mm Hg (3)	4,05 x 10 ⁻⁵ à 25 °C (1) 4,0 x 10 ⁻⁵ à 25 °C (3) 4,05 x 10 ⁻⁵ à T=? (5)	3,3 x 10 ⁻⁴ à T=? (1) 7,1 x 10 ⁻³ à T=? (1) 5 x 10 ⁻⁵ à 20 °C (1) 4,6 x 10 ⁻³ à 25 °C (3)	0,027 à 25 °C (1) 0,0027 à 25 °C (3) 0,025 à 20 °C (5) 0,0027 à 25 °C (5) 0,0027 à T=? (6)	6,80 (1) 7,02 (1) 7,8 (1) 4,46 à 8,18 pour les 209 congénères (3)	372 (1)	1,58 à 25 °C (1) 1,58 à 25 °C (3) 1,566 à 15 °C (5) 1,555 à 25 °C (5) 1,566 à 15 °C (6)	3200-4500= ? Cs à 54,4 oC (1) 13-16 cs à 98,9 oC (1) 3200-4500= ?cs à 54,4 oC (6) 13-16 cs à 98.9 oC (6)

(1) National library of medicine, 1994; (2) Howard, 1989; (3) IPCS, 1992; (4) Schwarzenbach, et al., 1993; (5) Trépanier, 1984; (6) Goyer, 1980

Tableau A.4 : Les valeurs de K_{oc} obtenues des équations de régression linéaire de K_{ow} et de S

Équation de régression linéaire	K_{oc} calculé
À partir de K_{ow}	
$\log K_{oc} = -0,21 + \log K_{ow}$ (1)	794 328
$\log K_{oc} = 0,49 + 0,72 \log K_{ow}$ (2)	77 446
$\log K_{oc} = 0,088 + 0,909 \log K_{ow}$ (3)	436 515
À partir de S	
$\log K_{oc} = 3,64 - 0,55 \log S_2$ en mg/L(4)	21 727
$\log K_{oc} = 3,95 - 0,62 \log S_2$ en mg/L(3)	54 325

Note : Les valeurs de $\log K_{ow}$ et de S sont tirées du Tableau A.3 et sont de 6,11 et 0,054 mg/L respectivement.

ANNEXE B

**LA STRATIGRAPHIE ET LES PUIITS D'OBSERVATION SELON LES
TRAVAUUX DE L'INRS ET DE L'UNIVERSITÉ LAVAL, JUIN ET DÉCEMBRE
1996**

Schéma du puits 1 après construction

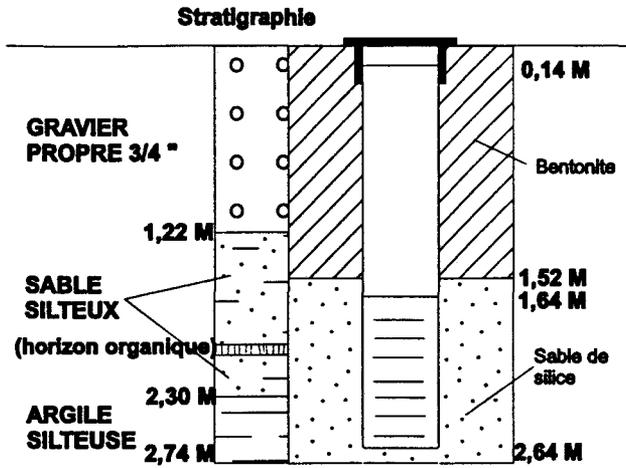


Schéma du puits 2 après construction

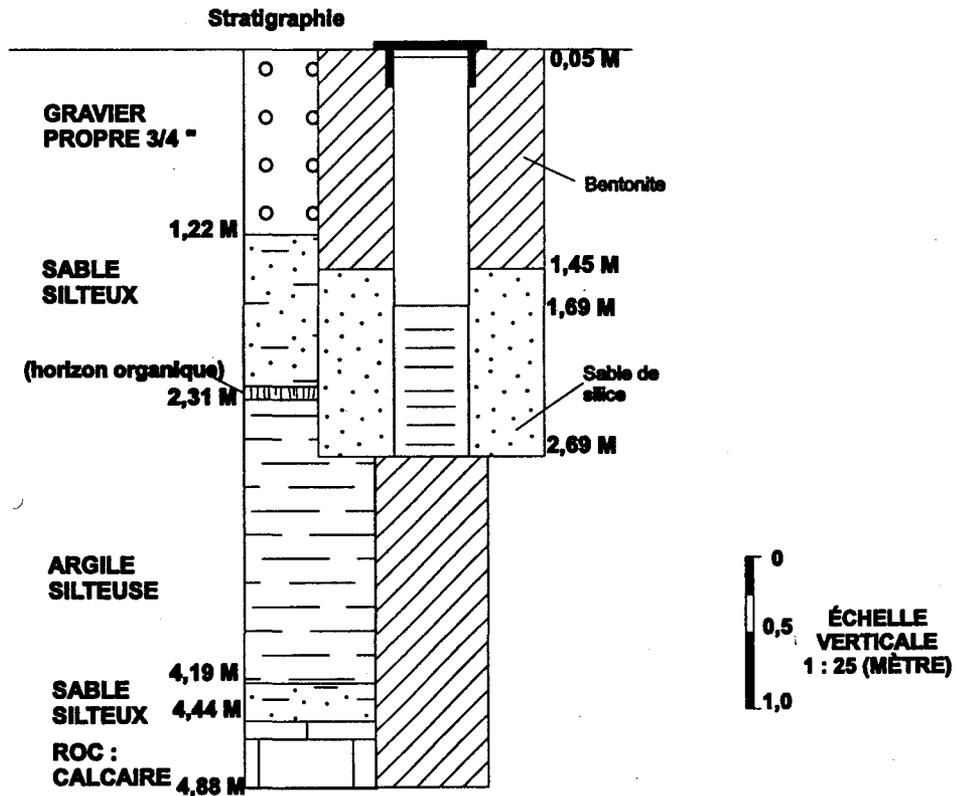


Schéma du puits 3 après construction

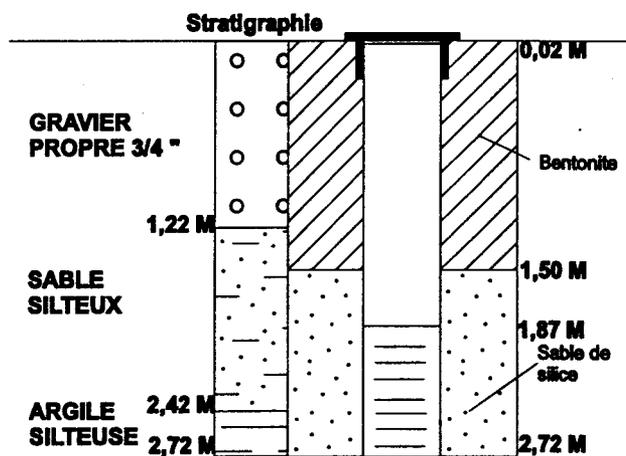


Schéma du puits 4 après construction

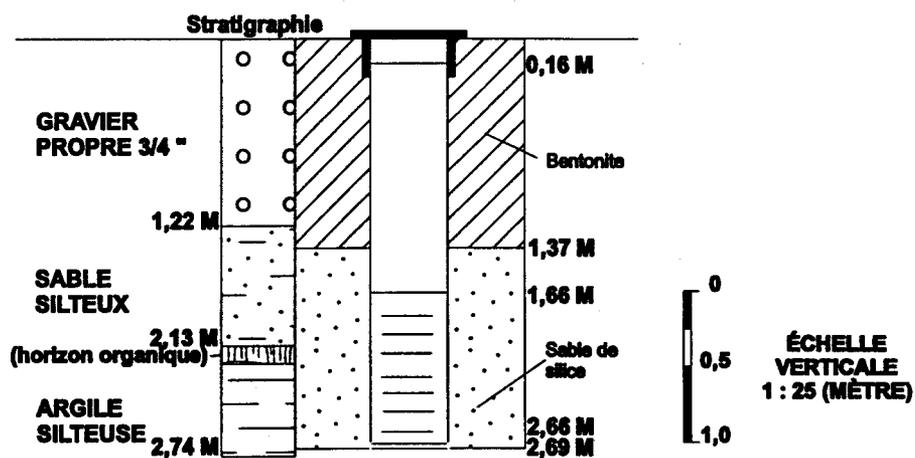


Schéma du puits 5 après construction

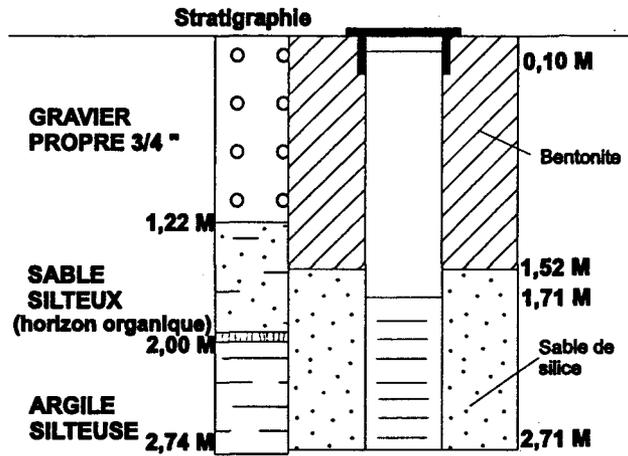


Schéma du puits 6 après construction

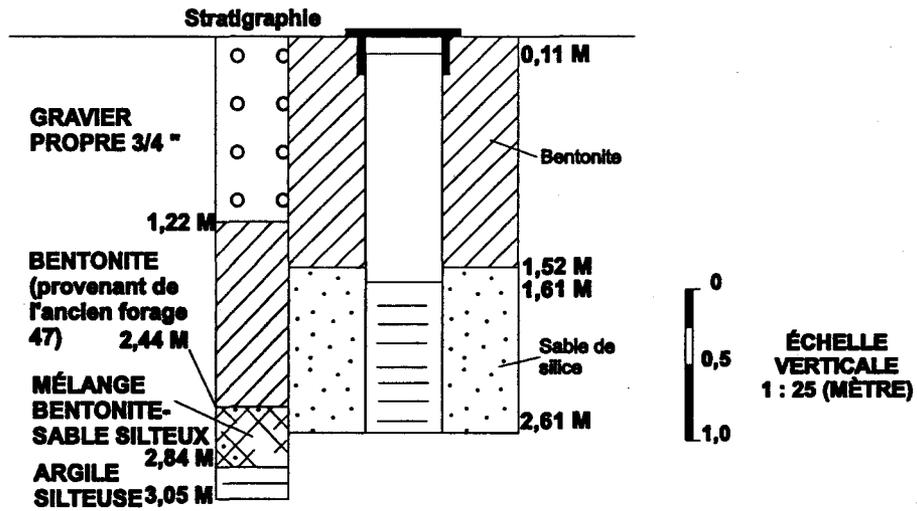


Schéma du puits 7 après construction

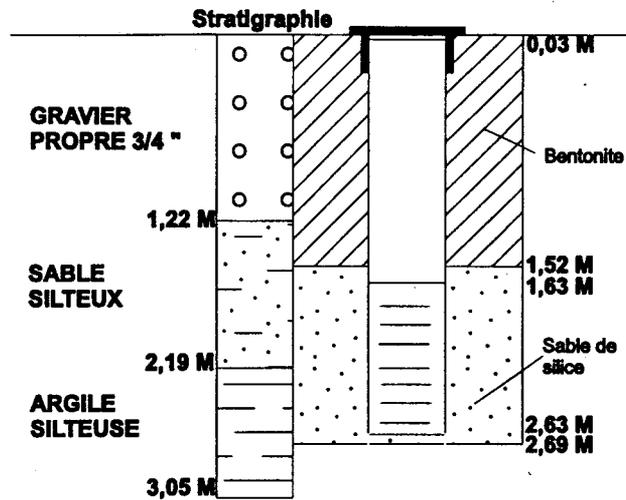


Schéma du puits 8 après construction

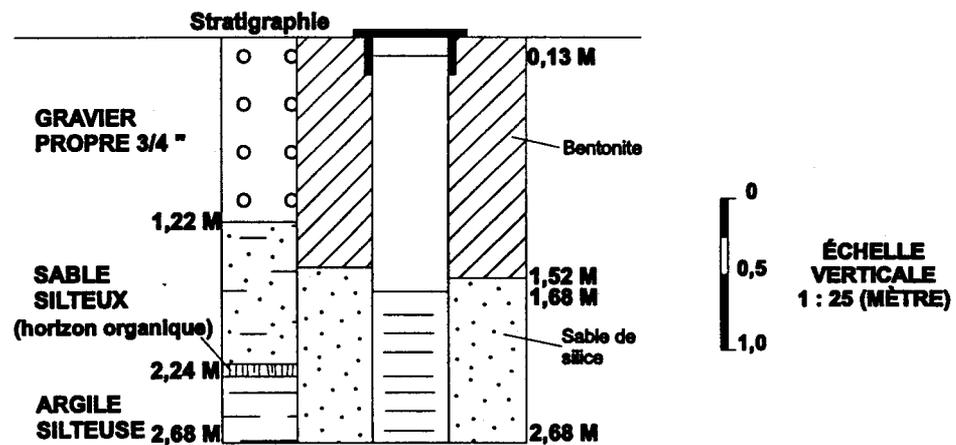


Schéma du puits 9 après construction

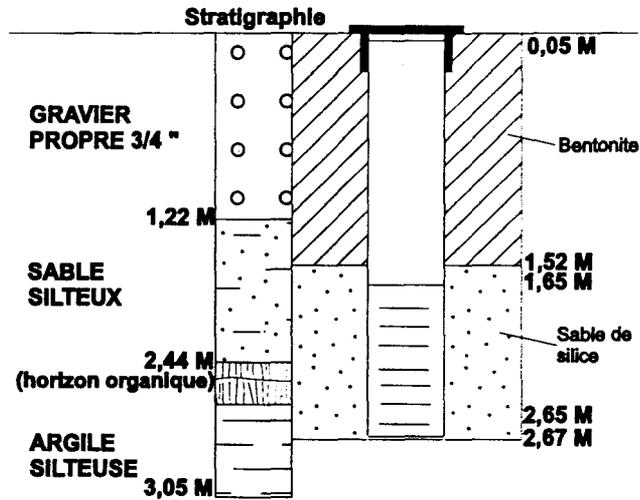


Schéma du puits 10 après construction

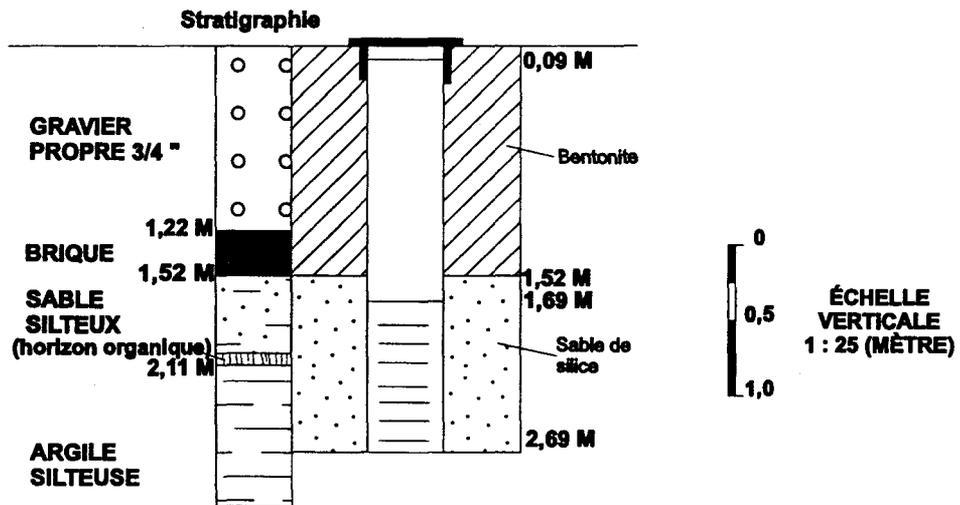


Schéma du puits 11 après construction

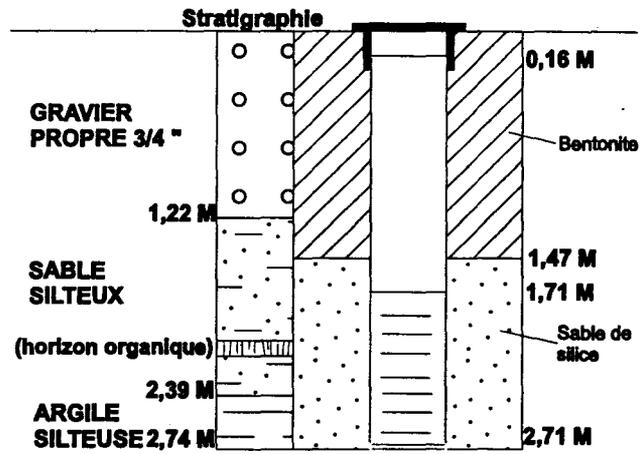


Schéma du puits 12 après construction

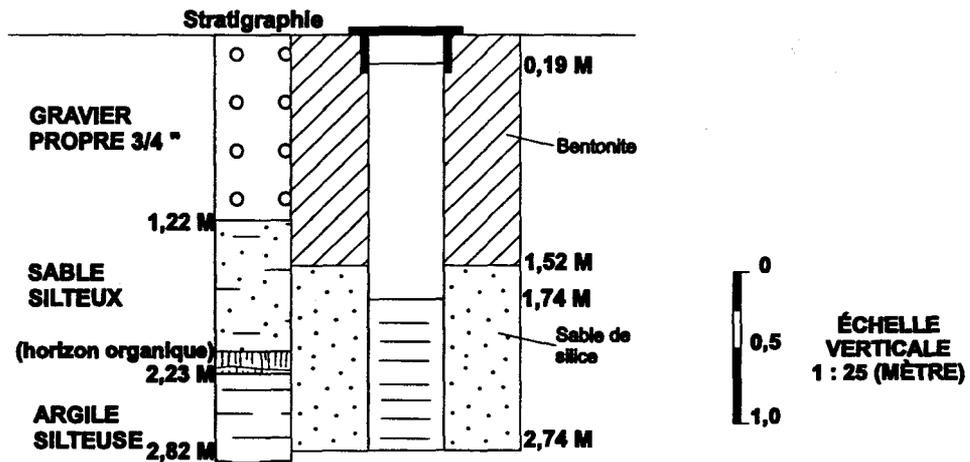


Schéma du puits 12-B après construction

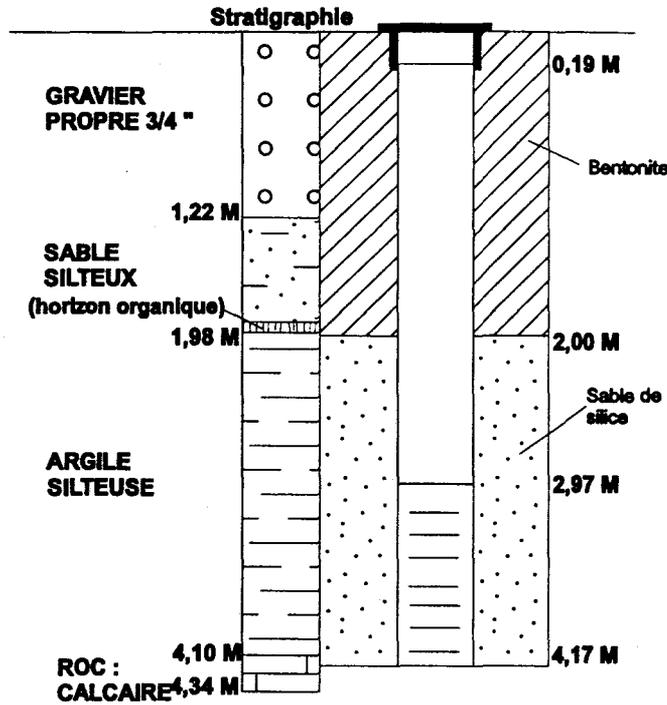


Schéma du puits 13 après construction

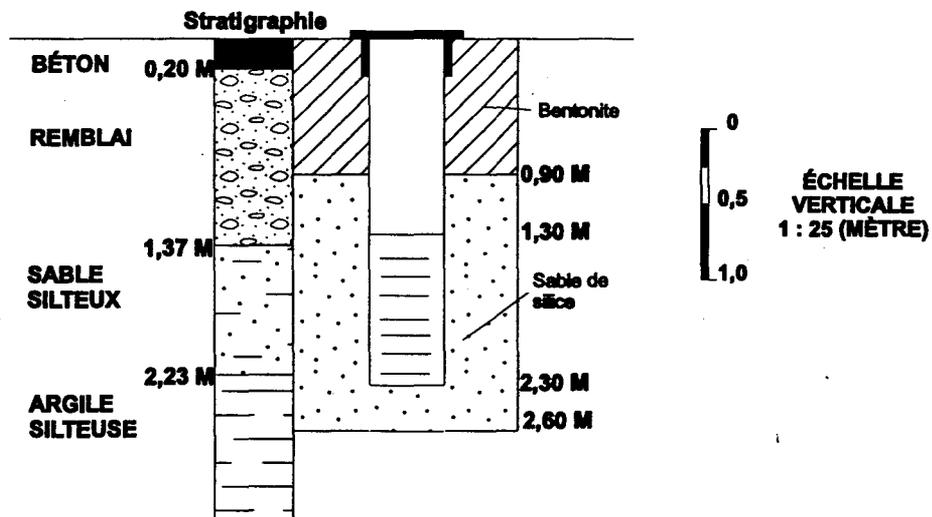


Schéma du puits 14 après construction

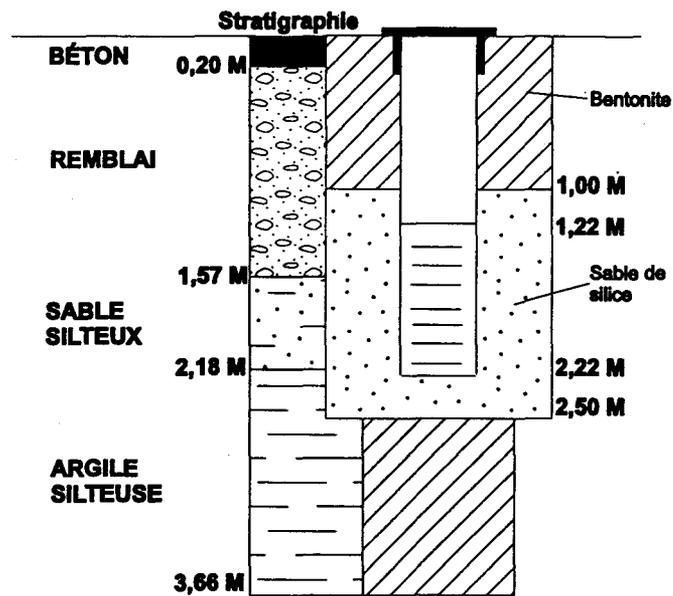
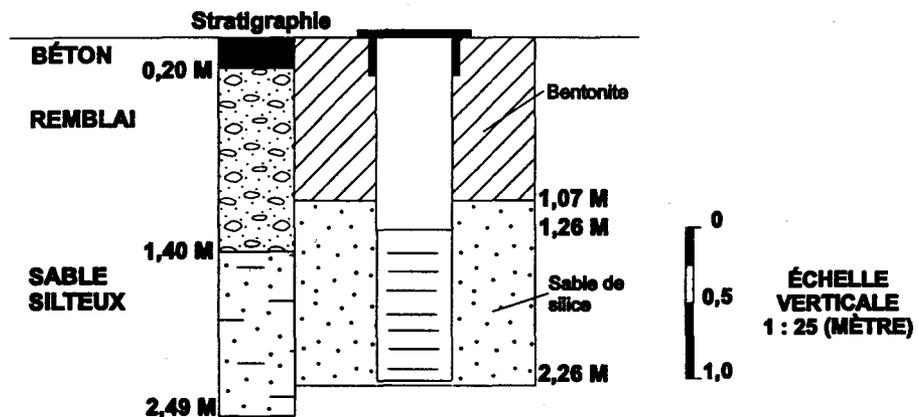


Schéma du puits 15 après construction



NOTE : l'élévation du puits est donnée par rapport à la surface et nécessitera d'être ajustée à l'élévation réelle lorsqu'elle sera connue

Schéma du puits 15-B après construction

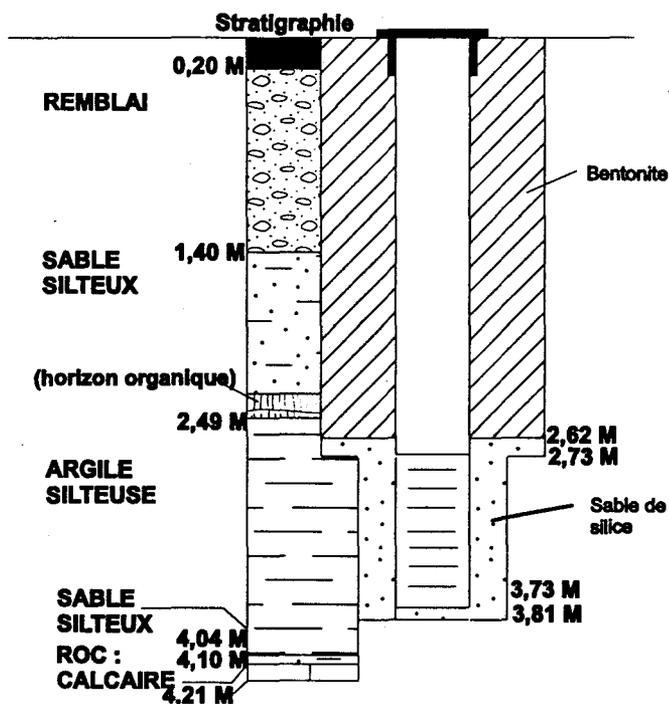
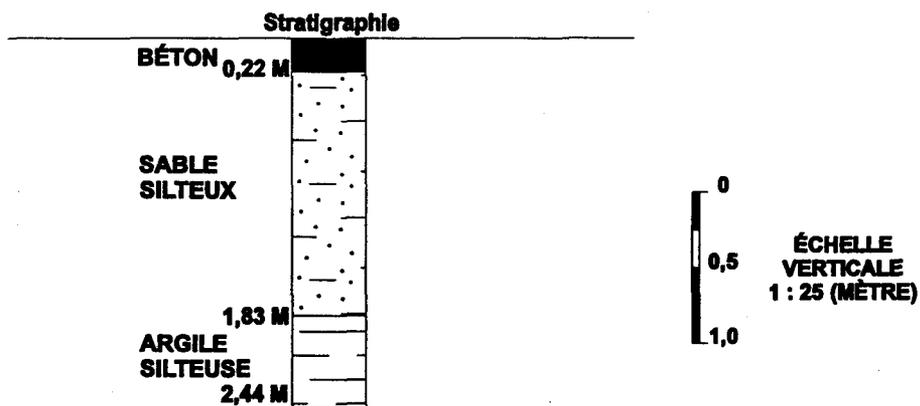


Schéma du puits 16 après construction



NOTE : l'élévation du puits est donnée par rapport à la surface et nécessitera d'être ajustée à l'élévation réelle lorsqu'elle sera connue

Schéma du puits 17 après construction

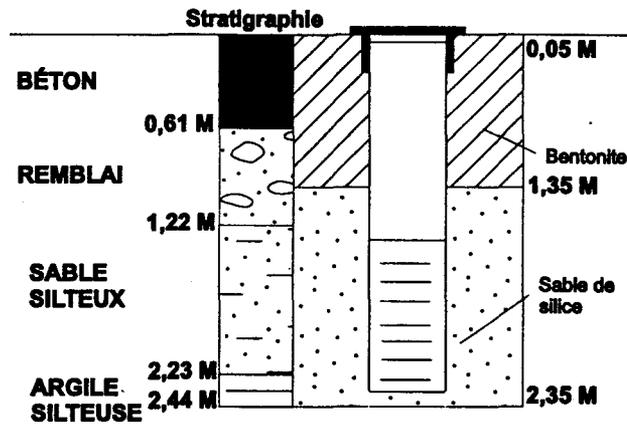


Schéma du puits 18 après construction

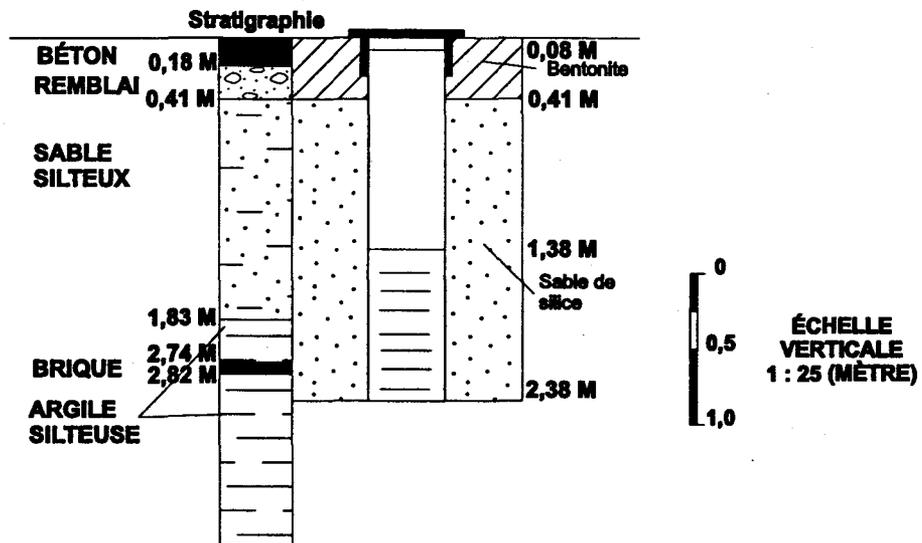
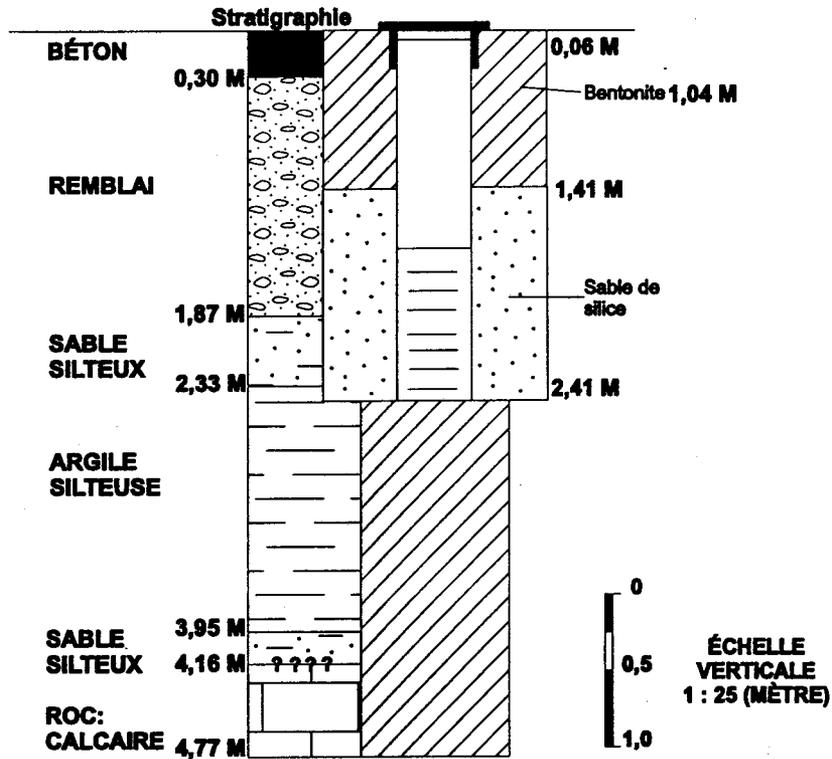
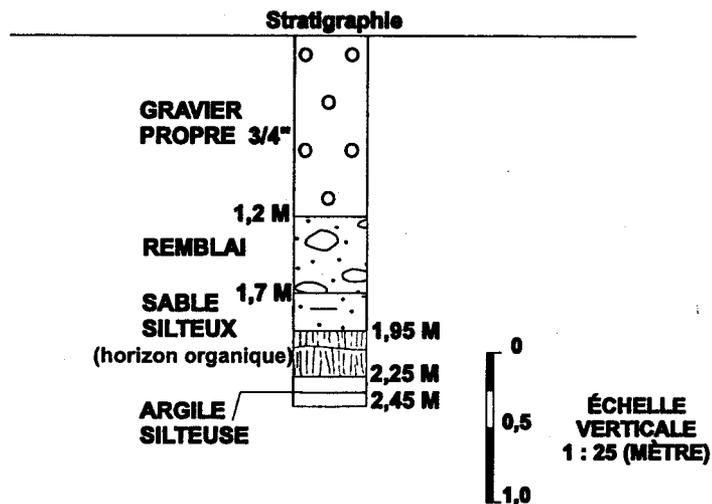


Schéma du puits 19 après construction



Stratigraphie au droit du forage 20



ANNEXE C

**LES CARACTÉRISTIQUES DES SIMULATIONS RÉALISÉES POUR LA
CALIBRATION DE L'ÉCOULEMENT SUR LA PROPRIÉTÉ DOMTAR**

**Tableau C.1 : Les caractéristiques des simulations réalisées
pour la calibration de l'écoulement à l'échelle de la propriété Domtar**

No sim.	Nombre de couches	Épaisseur des couches (couches : m)	Conditions aux limites ³	K_{hor} (m/s)	Anisotropie (K_{hor}/K_{hor})	Porosité effective (n)
1 ⁵	8 ¹	<u>Domaine</u> 1 à 4 : 0,31 5 à 8 : 0,25 <u>HOFR et HR²</u> sommet du sable silteux plus élevé	<u>Couches 2-8</u> Nord : Charge imposée correspondant à la valeur de h de la ligne équipotentielle de 220,20 m et charges variables imposées Sud Flux nul ou limite imperméable sauf à l'endroit du puits 6 Est Flux nul ou limite imperméable <u>Couche 1</u> 1 seule charge imposée au puits 6 ⁴	<u>Couches 1-4</u> $1,0 \times 10^{-5}$ <u>Couches 5-8</u> $1,99 \times 10^{-5}$	1 1	<u>Couches 1-4</u> 0,35 <u>Couches 5-8</u> 0,25
2 ⁵	Idem à 1	Idem 1-4, pour 5-8 le sommet du s. silteux varie sur une zone plus petite	<u>Couches 1-3</u> Tout le domaine inactif <u>Couches 4-8</u> Idem à 1	<u>Couches 1-8</u> $1,99 \times 10^{-5}$	1	<u>Couches 1-8</u> 0,25

1. 4 couches dans le remblai, 4 couches dans le sable silteux; 2. zone au maillage raffiné sur la Figure 4.3;
3. Voir Figure 4.3; 4. Le logiciel PMWIN impose une contrainte pour la 1^{ère} couche pour les charges imposées; 5. La recharge est nulle

(suite) Tableau C.1 : Les caractéristiques des simulations réalisées pour la calibration de l'écoulement à l'échelle de la propriété Domtar

No sim.	Nombre de couches	Épaisseur des couches (couches : m)	Conditions aux limites ³	K_{hor} (m/s)	Anisotropie (K_{hor}/K_{hor})	Porosité effective (n)
3 ⁵	5 ⁶	<u>Domaine</u> 1: 1,4 2 à 5 : 0,25 <u>HOFR et HR²</u> sommet du sable silteux plus élevé	<u>Couches 2-5</u> Idem à couches 2-8 de la simulation 2 <u>Couche 1</u> Idem à la couche 1 de la simulation 1	<u>Couche 1</u> $1,0 \times 10^{-5}$ <u>Couches 2-5</u> $1,99 \times 10^{-5}$	1 1	<u>Couche 1</u> 0,35 <u>Couches 2-5</u> 0,25
4 ⁵	4 ⁷	<u>Domaine</u> l'épaisseur de la couche est la ½ de celle du remblai en fct de la topo <u>HOFR et HR²</u> 1 : 1,1 2 : 0,1 3 : 0,45 4 : 0,55 à 1,05	<u>Couches 3 et 4</u> Idem à couches 2-8 de la simulation 2 <u>Couche 2</u> Idem à la couche 1 de la simulation 1 <u>Couche 1</u> Aucune charge imposée	<u>Couches 1-2</u> $1,0 \times 10^{-5}$ <u>Couches 3-4</u> $1,99 \times 10^{-5}$	1 1	<u>Couches 1-2</u> 0,35 <u>Couches 3-4</u> 0,25

1. 4 couches dans le remblai, 4 couches dans le sable silteux; 2. zone au maillage raffiné sur la Figure 4.3; 3. Voir Figure 4.3; 4. Le logiciel PMWIN impose une contrainte pour la 1^{ère} couche pour les charges imposées; 5. La recharge est nulle ; 6. 1 couche pour le remblai et 4 couches pour le s. silteux; 7. 2 couches dans le remblai et 2 couches dans le s. silteux

(suite) Tableau C.1 : Les caractéristiques des simulations réalisées pour la calibration de l'écoulement à l'échelle de la propriété Domtar

No sim.	Nombre de couches	Épaisseur des couches (couches : m)	Conditions aux limites ³	K_{hor} (m/s)	Anisotropie (K_{hor}/K_{hor})	R (m/s) ⁵	Porosité effective (n)
5	4 ⁷	Idem à 4	Idem à 4	<u>Couches 1-2</u> 1,0 x 10 ⁻⁴ <u>Couches 3-4</u> Domaine 2,0 x 10 ⁻⁵⁸ Zone raffinée 1,66 x 10 ⁻⁵⁸	10 1 1	1,27 x 10 ^{-8,9}	Idem à 4
6	4 ⁷	Idem à 4	Idem à 4	<u>Couches 1-2</u> 1,0 x 10 ⁻⁴ <u>Couches 3-4</u> Domaine 2,0 x 10 ⁻⁵⁸ Z. raffinée 1,66 x 10 ⁻⁵⁸	0,1 0,1 0,1	6,3 x 10 ^{-9,9}	Idem à 4

1. 4 couches dans le remblai, 4 couches dans le sable silteux; 2. zone au maillage raffiné sur la Figure 4.3; 3. Voir Figure 4.3; 4. Le logiciel PMWIN impose une contrainte pour la 1^{ère} couche pour les charges imposées; 5. La recharge n'est pas nulle; 6. 1 couche pour le remblai et 4 couches pour le s. silteux; 7. 2 couches dans le remblai et 2 couches dans le s. silteux; 8. Tiré des données de terrain (domaine : Gartner Lee, 1992, zone raffinée : INRS, 1996); 9. Tiré de Gartner Lee, 1992

(suite) Tableau C.1 : Les caractéristiques des simulations réalisées pour la calibration de l'écoulement à l'échelle de la propriété Domtar

No sim.	Nombre de couches	Épaisseur des couches (couches : m)	Conditions aux limites ³	K_{hor} (m/s)	Anisotropie (K_{hor}/K_{hor})	R (m/s) ⁵	Porosité effective (n)
7	4 ⁷	Idem à 4	Idem à 4	<u>Couches 1-2</u> 1,0 x 10 ⁻⁴ <u>Couches 3-4</u> Domaine 2,0 x 10 ⁻⁵⁸ Z. raffinée 1,66 x 10 ⁻⁵⁸	10 10 10	6,3 x 10 ⁻⁹⁹	Idem à 4
8	4 ⁷	Idem à 4	Idem à 4	<u>Couches 1-2</u> 1,0 x 10 ⁻⁴ <u>Couches 3-4</u> Domaine 2,0 x 10 ⁻⁵⁸ Z. raffinée 1,66 x 10 ⁻⁵⁸	0,1 0,1 0,1	4,76 x 10 ⁻⁸ ₁₀	Idem à 4
9	4 ⁷	Idem à 4	<u>Couche 1</u> 4 charges imposées et reste du domaine inactif <u>Couches 2-4</u> Idem à 4	Idem à 8	Idem à 8	4,76 x 10 ⁻⁸ ₁₀	Idem à 4

1. 4 couches dans le remblai, 4 couches dans le sable silteux; 2. zone au maillage raffiné sur la Figure 4.3; 3. Voir Figure 4.3; 4. Le logiciel PMWIN impose une contrainte pour la 1^{ère} couche pour les charges imposées; 5. La recharge n'est pas nulle; 6. 1 couche pour le remblai et 4 couches pour le s. silteux; 7. 2 couches dans le remblai et 2 couches dans le s. silteux; 8. (domaine : ESL, 1992, zone raffinée : INRS, 1996); 9. ESL, 1992; 10. R= précipitations et ET= 1,6 x 10⁻⁸

(suite) Tableau C.1 : Les caractéristiques des simulations réalisées pour la calibration de l'écoulement à l'échelle de la propriété Domtar

No sim.	Nombre de couches	Épaisseur des couches (couches : m)	Conditions aux limites ³	K_{hor} (m/s)	Anisotropie (K_{hor}/K_{hor})	R (m/s) ⁵	Porosité effective (n)
10	4 ⁷	Idem à 4	<u>Couche 1</u> 4 charges imposées et reste du domaine inactif <u>Couches 2-4</u> Idem à 4	<u>Couches 1-2</u> $1,0 \times 10^{-4}$ <u>Couches 3-4</u> Domaine $2,0 \times 10^{-58}$ Z. raffinée $1,66 \times 10^{-58}$	0,01 0,01 0,01	$4,76 \times 10^{-8,10}$	Idem à 4
11	4 ⁷	Idem à 4	<u>Couche 1</u> 4 charges imposées et reste du domaine inactif <u>Couches 2-4</u> Idem à 4	<u>Couches 1-2</u> $1,0 \times 10^{-4}$ <u>Couches 3-4</u> Domaine $2,0 \times 10^{-58}$ Z. raffinée $1,66 \times 10^{-58}$	0,1 0,1 0,1	$6,34 \times 10^{-8,10}$	Idem à 4

1. 4 couches dans le remblai, 4 couches dans le sable silteux; 2. zone au maillage raffiné sur la Figure 4.3; 3. Voir Figure 4.3; 4. Le logiciel PMWIN impose une contrainte pour la 1^{ère} couche pour les charges imposées; 5. La recharge est fixée par la carte piézométrique; 6. 1 couche pour le remblai et 4 couches pour le s. silteux; 7. 2 couches dans le remblai et 2 couches dans le s. silteux; 8. Tiré des données de terrain (domaine : Gartner Lee, 1992, zone raffinée : INRS, 1996); 9. Tiré de Gartner Lee, 1992; 10. R= précipitations et ET= $1,6 \times 10^{-8}$

(suite) Tableau C.1 : Les caractéristiques des simulations réalisées pour la calibration de l'écoulement à l'échelle de la propriété Domtar

No sim.	Nombre de couches	Épaisseur des couches (couches : m)	Conditions aux limites ³	K_{hor} (m/s)	Anisotropie (K_{hor}/K_{hor})	R (m/s) ⁵	Porosité effective (n)
12	4 ⁷	Idem à 4	<u>Couche 1</u> 4 charges imposées et reste du domaine inactif <u>Couches 2-4</u> Idem à 4	<u>Couches 1-2</u> $1,0 \times 10^{-4}$ <u>Couche 3</u> Domaine $2,0 \times 10^{-68}$ Z. raffinée $1,66 \times 10^{-68}$	10 10 10	0	Idem à 4
13	4 ⁷	Idem à 4	<u>Couche 1</u> 4 charges imposées et reste du domaine inactif <u>Couches 2-4</u> Idem à 4	<u>Couches 1-2</u> $1,0 \times 10^{-5}$ <u>Couche 3</u> Domaine $2,0 \times 10^{-68}$ Z. raffinée $1,66 \times 10^{-68}$ <u>Couche 4</u> Domaine $2,0 \times 10^{-78}$ Z. raffinée $1,66 \times 10^{-7}$	1 1 1 1 1	$2,87 \times 10^{-8,10}$	Idem à 4

1. 4 couches dans le remblai, 4 couches dans le sable silteux; 2. zone au maillage raffiné sur la Figure 4.3; 3. Voir Figure 4.3; 4. Le logiciel PMWIN impose une contrainte pour la 1^{ère} couche pour les charges imposées; 5. La recharge est fixée par la carte piézométrique; 6. 1 couche pour le remblai et 4 couches pour le s. silteux; 7. 2 couches dans le remblai et 2 couches dans le s. silteux; 8. Tiré des données de terrain (domaine : Gartner Lee, 1992, zone raffinée : INRS, 1996); 9. Tiré de Gartner Lee, 1992; 10. R= précipitations et ET= $1,6 \times 10^{-8}$

(suite) Tableau C.1 : Les caractéristiques des simulations réalisées pour la calibration de l'écoulement à l'échelle de la propriété Domtar

No sim.	Nombre de couches	Épaisseur des couches (couches : m)	Conditions aux limites ³	K_{hor} (m/s)	Anisotropie (K_{hor}/K_{hor})	R (m/s) ⁵	Porosité effective (n)
14	4 ⁷	Idem à 4	<u>Couche 1</u> 4 charges imposées et reste du domaine inactif <u>Couches 2-4</u> Idem à 4	<u>Couches 1-2</u> $1,0 \times 10^{-5}$ <u>Couche 3</u> Domaine $2,0 \times 10^{-68}$ Z. raffinée $1,66 \times 10^{-68}$ <u>Couche 4</u> Domaine $2,0 \times 10^{-78}$ Z. raffinée $1,66 \times 10^{-7}$	1 1 1 1 1	$1,26 \times 10^{-7}$	Idem à 4
15	4 ⁷	Idem à 4	<u>Couche 1</u> 4 charges imposées et reste du domaine inactif <u>Couches 2-4</u> Idem à 4	<u>Couches 1-2</u> $1,0 \times 10^{-4}$ <u>Couche 3</u> Domaine $2,0 \times 10^{-58}$ Z. raffinée $1,66 \times 10^{-58}$	0,1 0,1 0,1	$2,87 \times 10^{-8,10}$	Idem à 4

1. 4 couches dans le remblai, 4 couches dans le sable silteux; 2. zone au maillage raffiné sur la Figure 4.3; 3. Voir Figure 4.3; 4. Le logiciel PMWIN impose une contrainte pour la 1^{re} couche pour les charges imposées; 5. La recharge est fixée par la carte piézométrique; 6. 1 couche pour le remblai et 4 couches pour le s. silteux; 7. 2 couches dans le remblai et 2 couches dans le s. silteux; 8. Tiré des données de terrain (domaine : Gartner Lee, 1992, zone raffinée : INRS, 1996); 9. Tiré de Gartner Lee, 1992; 10. R= précipitations et ET= $1,6 \times 10^{-8}$

(suite) Tableau C.1 : Les caractéristiques des simulations réalisées pour la calibration de l'écoulement à l'échelle de la propriété Domtar

No sim.	Nombre de couches	Épaisseur des couches (couches : m)	Conditions aux limites ³	K_{hor} (m/s)	Anisotropie (K_{hor}/K_{hor})	Porosité effective (n)
16 ⁵	4 ⁷	Idem à 4	<u>Couche 1</u> 4 charges imposées et reste du domaine inactif <u>Couches 2-4</u> Idem à 4	<u>Couches 1-2</u> $1,0 \times 10^{-4}$ <u>Couche 3</u> Domaine $2,0 \times 10^{-58}$ Z. raffinée $1,66 \times 10^{-58}$	1 1 1	Idem à 4
17 ⁵	4 ⁷	Idem à 4	<u>Couche 1</u> 4 charges imposées et reste du domaine inactif <u>Couches 2-4</u> Idem à 4	<u>Couches 1-2</u> $1,0 \times 10^{-4}$ <u>Couche 3</u> Domaine $2,0 \times 10^{-58}$ Z. raffinée $1,66 \times 10^{-58}$	10 10 10	Idem à 4

1. 4 couches dans le remblai, 4 couches dans le sable silteux; 2. zone au maillage raffiné sur la Figure 4.3; 3. Voir Figure 4.3; 4. Le logiciel PMWIN impose une contrainte pour la 1^{ère} couche pour les charges imposées; 5. La recharge est fixée par la carte piézométrique; 6. 1 couche pour le remblai et 4 couches pour le s. silteux; 7. 2 couches dans le remblai et 2 couches dans le s. silteux; 8. Tiré des données de terrain (domaine : Gartner Lee, 1992, zone raffinée : INRS, 1996); 9. Tiré de Gartner Lee, 1992; 10. R= précipitations et ET= $1,6 \times 10^{-8}$

Tableau C.2 : Le bilan de masse du système obtenu par PMWIN©**WATER BUDGET OF THE WHOLE MODEL DOMAIN:**

FLOW TERM	IN	OUT	IN-OUT
STORAGE	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
CONSTANT HEAD	9.8695928E-06	9.8379760E-06	3.1616764E-08
WELLS	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
DRAINS	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
RECHARGE	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
ET	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
RIVER LEAKAGE	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
HEAD DEP BOUNDS	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
STREAM LEAKAGE	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
INTERBED STORAGE	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00

SUM	9.8695928E-06	9.8379760E-06	3.1616764E-08
DISCREPANCY [%]	0.32		

ANNEXE D

La mise en œuvre et la logistique de l'essai pilote de restauration

Tableau D.1 : Liste des équipements pour l'essai pilote de restauration

ÉQUIPEMENT OU MATÉRIEL	À acheter	À l'inventaire
Échantillonnage des sols		
Tube Shelby d'un pouce de DI, 1,5 m delong	x	
Truelles en acier inox.		x
Produits de nettoyage des outils d'échantillonnage (acétone...)	x	
Chiffons, gants	x	
Masse	x	
Treuil		x
Installation des puits d'observation		
Pionjar		x
Pointes filtrantes en acier inox.	x	
Géosock	x	
Mesure des niveaux d'eau dans les puits		
Sonde à niveau d'eau		x
Installations de chantier		
Roulotte de chantier	x	
Abri Tempo	x	
Connexions électriques et d'eau	x	
Essais hydrauliques		
5 pompes péristaltiques de 0,03 à 0,54 l/min	x	
Tubages des pompes -pour les pompes DI 1 pouce (compatibilité chimique avec les produits) -pour les effluents DI 2 pouces -pour l'échantillonnage DI 1 cm	x x	x
Valves (environ 20)	x	x
Fittings ou raccords (20)	x	
Bouteilles d'échantillonnage des liquides de 60 ml (en verre avec bouchon en Téflon) (30)	x	
Seringues d'au moins 20 ml (en verre ou en Téflon ou tout en polyéthylène, pas de piston en caoutchouc) (30)	x	
Tubage en nylon pour les raccords avec les seringues (30)	x	
Tubage en Viton	x	
Tissu Nitek pour filtrer	x	
Débitmètres ou petits compteurs d'eau	x	
5 barils de 200 l (Domtar) pour récupérer les effluents ou 1 réservoir de 10 000 l	x	
3 barils de 200 l pour préparer les traceurs	x	
Sondes à électrode pour les essais de traceurs	x	
2 réservoirs de 1 m ³ pour préparer les solutions de lavage	x	

ÉQUIPEMENT OU MATÉRIEL	À acheter	À l'inventaire
Sécurité		
Habits Tyvek, gants de travail, gants en latex, lunettes de sécurité, casques, bottes ...	x	x
Ventilateur dans la HOFR et conduits de ventilation	x	
Chaufferettes, lampes halogènes		x
Détecteur de gaz	x	
Autre		
Déneigement	x	