

Table des matières

Avant Propos	3
Sommaire.....	5
Introduction	7
 Chapitre 1 : Pollution de la nappe par un solvant chloré : problématique et quantification.....	11
1.1. Problématique	13
1.1.1. Ampleur de la menace pour la ressource en eau	13
1.1.2. Réglementation et enjeux économiques	14
1.2. Devenir des solvants chlorés dans le milieu souterrain	15
1.2.1. Propriétés physico-chimiques de trois solvants chlorés	15
1.2.2. Migration dans l'aquifère	17
1.2.3. Transferts de masse entre phases.....	18
1.2.3.1. Transfert de masse entre les phases organique et aqueuse.....	18
1.2.3.2. Transfert de masse entre les phases organique et gazeuse.....	20
1.2.3.3. Transfert de masse entre les phases aqueuse et gazeuse	20
1.2.3.4. Transfert de masse avec la matrice solide.....	21
1.3. Caractérisation de l'état de pollution	22
1.3.1. Echelles d'observation.....	22
1.3.2. Suivi et description de la pollution.....	23
1.3.2.1. Mesures ponctuelles des teneurs en polluant	23
1.3.2.1.1. Teneurs en polluant dans un échantillon de sol.....	23
1.3.2.1.2. Teneurs en polluant dans un échantillon de gaz.....	24
1.3.2.1.3. Teneurs en polluant dans un échantillon d'eau.....	25
1.3.2.2. Méthodes globales.....	28
1.3.3. Caractérisation du milieu poreux.....	29
1.3.3.1. Nature des matériaux constituant le milieu souterrain	29
1.3.3.2. Structure géologique de l'aquifère	30
1.3.3.3. Effets d'échelle et influence des hétérogénéités.....	32
1.4. Outils mathématiques pour étudier le devenir des COHVs	32
1.4.1. Transport polyphasique	32
1.4.1.1. Advection : généralisation de la loi de Darcy	33
1.4.1.2. Dispersion hydrodynamique	34
1.4.1.3. Relations constitutives.....	35
1.4.2. Quelques codes numériques inventoriés pour l'étude des écoulements de plusieurs phases.....	38
 Chapitre 2 : Construction du modèle hydrodynamique	43
2.1. Paramétrisation du modèle.....	45
2.1.1. Représentation et géométrie de l'aquifère	45
2.1.2. Conditions aux limites du système	47
2.1.2.1. Les apports d'eau	48
2.1.2.1.1. La recharge de la nappe par infiltration des eaux de pluie.....	48

3.2.1.3.3. Distribution des conductivités hydrauliques.....	97
3.2.1.3.4. Influence du niveau des rivières.....	100
3.2.1.3.5. Emplacement de la source.....	100
3.2.1.4. Conclusion.....	102
3.2.2. Incidence de la mise en place du dispositif de dépollution.....	102
3.2.2.1. Efficacité du traitement.....	102
3.2.2.2. Poursuite du traitement.....	105
3.2.2.3. Conclusion.....	107
3.3. Transport des traces dissoutes en régime d'écoulement transitoire.....	107
3.3.1. Comparaison aux résultats du régime d'écoulement permanent.....	108
3.3.2. Comparaison aux concentrations relevées au voisinage du site pollué.....	110
3.3.3. Influence de quelques paramètres de transport.....	111
3.3.3.1. Choix du pas de temps de calcul.....	111
3.3.3.2. Durée des périodes d'écoulement.....	113
3.3.3.3. Source à concentration variable.....	114
3.3.3.4. Conclusion.....	118
3.3.4. Devenir du panache des traces dissoutes.....	118
3.3.5. Conclusion.....	119
3.4. Conclusion.....	120

Chapitre 4 : Approche affinée du devenir de la pollution au moyen d'un code multiphasique.....121

4.1. Transfert du modèle hydrodynamique de l'aquifère vers SIMUSCOPP.....	123
4.1.1. Construction du modèle hydrodynamique.....	123
4.1.1.1. Discretisation spatiale du domaine.....	123
4.1.1.2. Propriétés hydrodynamiques du milieu poreux.....	124
4.1.1.3. Propriétés pétrochimiques de la phase DNAPL.....	125
4.1.1.4. Conditions aux limites.....	126
4.1.2. Comparaison de l'écoulement.....	127
4.1.3. Comparaison du transport des traces dissoutes.....	128
4.1.4. Conclusion.....	130
4.2. Affinement de la description de l'aquifère.....	131
4.2.1. Investigations sur le site d'étude.....	131
4.2.1.1. Rappel historique.....	131
4.2.1.2. Profils de vitesses mesurés dans l'aquifère.....	132
4.2.1.3. Profils de concentrations.....	135
4.2.2. Discretisation du domaine « extrait 2 ».....	139
4.2.3. Propriétés hydrodynamiques de l'aquifère.....	139
4.2.3.1. Distribution des conductivités hydrauliques sur le maillage « site ».....	140
4.2.3.2. Distribution des perméabilités et localisation du polluant sur le maillage « source ».....	143
4.2.3.2.1. Méthodologie.....	143
4.2.3.2.2. Résultats de l'étude analytique.....	145
4.2.3.3. Distribution des propriétés physiques du sol.....	148
4.2.4. Conditions aux limites du modèle.....	149
4.2.5. Ecoulement de la nappe calculé par SIMUSCOPP.....	150
4.3. Description de la source.....	151
4.3.1. Essais préliminaires.....	151
4.3.1.1. Superficie et profondeur d'infiltration du polluant.....	152

2.1.2.1.2. Les flux entrants.....	50
2.1.2.2. Les sorties d'eau.....	50
2.1.2.2.1. La limite orientale du domaine.....	50
2.1.2.2.2. Les débits d'exploitation de la nappe alluviale.....	51
2.1.2.2.3. Les échanges nappe – drains.....	51
2.1.2.3. Les échanges nappe – rivières.....	52
2.1.3. Données hydrodynamiques.....	53
2.1.3.1. La piézométrie sur le domaine.....	53
2.1.3.2. Les paramètres hydrauliques.....	55
2.2. Modélisation du régime d'écoulement permanent.....	57
2.2.1. Initialisation du modèle.....	57
2.2.2. Résultats du calage.....	58
2.2.2.1. Description du champ de perméabilités.....	58
2.2.2.2. Bilan en eau.....	61
2.2.3. Sensibilité du modèle.....	61
2.2.4. Influence des conditions aux limites sur la piézométrie.....	63
2.2.4.1. Influence de la recharge et des flux entrants.....	63
2.2.4.2. Influence du niveau des rivières.....	63
2.2.4.3. Conclusion.....	64
2.3. Modélisation du régime d'écoulement transitoire.....	64
2.3.1. Paramétrisation du modèle.....	64
2.3.1.1. Coefficient d'emmagasinement.....	64
2.3.1.2. Conditions aux limites.....	65
2.3.2. Ajustement de la distribution de la recharge.....	66
2.3.2.1. Hypothèse 1 : combinaison linéaire de plusieurs événements pluvieux.....	66
2.3.2.2. Hypothèse 2 : réaction de la nappe différée par rapport aux précipitations.....	70
2.3.2.3. Hypothèse 3 : recharge moyenne annuelle sur le piémont.....	74
2.3.2.4. Conclusion.....	75
2.3.3. Sensibilité des paramètres.....	75
2.3.3.1. Apports latéraux.....	75
2.3.3.2. Ruissellement.....	78
2.3.3.3. Coefficient d'emmagasinement.....	81
2.4. Conclusion.....	82
Chapitre 3 : Simulation numérique monophasique du transport.....	83
3.1. Paramétrisation du modèle.....	85
3.1.1. Choix du code de calcul.....	85
3.1.2. Propriétés du milieu poreux.....	86
3.1.2.1. Porosité du milieu.....	86
3.1.2.2. Dispersivité du milieu poreux.....	87
3.1.2.3. Transferts de masse et réactions physico-chimiques.....	87
3.1.3. Localisation et description initiales de la source.....	88
3.2. Transport des traces dissoutes en régime d'écoulement permanent.....	90
3.2.1. Résultats de l'étude préliminaire.....	90
3.2.1.1. Concentrations en PCE calculées dans les piézomètres.....	90
3.2.1.2. Masse de polluant dissoute dans la nappe depuis l'apparition de la pollution.....	92
3.2.1.3. Influence de paramètres de transport sur le développement du panache.....	93
3.2.1.3.1. Dispersion.....	93
3.2.1.3.2. Dégradation.....	94

4.3.1.2. Etendue de la source et volume mis en place	153
4.3.2. Calage de la source	158
4.3.2.1. Localisation de la source affinée dans le plan horizontal	158
4.3.2.2. Profils des concentrations en PCE calculés	165
4.3.2.3. Panache des traces dissoutes de PCE	170
4.3.3. Comparaison des résultats obtenus pour les trois schématisations de l'aquifère ..	171
4.3.4. Conclusion	172
4.4. Etude du dispositif de dépollution	173
4.4.1. Définition du problème posé	173
4.4.2. Effet de la mise en fonctionnement du puits F4	174
4.4.3. Fonctionnement des puits de fixation	176
4.4.4. Influence du régime d'écoulement introduit pour la projection	176
4.4.5. Conclusion	179
4.5. Conclusion	179
Conclusion générale et perspectives	183
Références bibliographiques	187
Liste des figures	199
Liste des Tableaux	203
Liste des symboles	205
Liste des abréviations	209
Table des matières	211
Annexes	215
Annexe 1 : Glossaire des notions de base des écoulements en milieu poreux ..	217
Annexe 2 : Carte des précipitations brutes sur le département	223
Annexe 3 : Distribution des champs de perméabilités calées en régime permanent	225
Annexe 4 : Technique de forage au marteau fond de trou	227

Annexes 1 : Glossaire des notions de base des écoulements en milieu poreux

a) Concept d'aquifère

L'aquifère est une formation géologique composée de roches perméables, c'est-à-dire capables de laisser passer l'eau, et qui est suffisamment épaisse pour permettre l'écoulement significatif d'eau dans une direction donnée. Le captage de quantités d'eau appréciables. L'aquifère est considéré comme tel si la charge hydraulique est suffisante pour permettre l'écoulement significatif d'eau dans une direction donnée.

Annexe 1 : Glossaire des notions de base des écoulements en milieu poreux

Dans cette annexe sont rappelées les notions de base non présentées dans le coeur du mémoire (Castany, 1982 ; de Marsily, 1996).

Annexe 2 : Carte des précipitations brutes sur le département

La carte présentée a été établie en 2001

Annexe 3 : Distribution des champs de perméabilités calées en régime permanent

Annexe 4 : Technique de forage au marteau fond de trou

La loi de Darcy est une loi expérimentale découverte en 1856. Elle quantifie l'écoulement de l'eau dans l'aquifère sous l'influence des paramètres hydrodynamiques. Elle définit, à l'échelle du volume élémentaire représentatif, une vitesse moyenne globale du fluide dans un milieu poreux sous l'influence d'un gradient hydraulique. C'est une loi macroscopique qui se formalise de la manière suivante :

$$\mathbf{v} = -K \nabla h \quad (A1.1)$$

où $\mathbf{v}$ [$L.T^{-1}$] est le vecteur vitesse de Darcy, K [$L.T^{-1}$] est le vecteur des perméabilités et h [L] est la charge hydraulique, définie comme suite :

$$h = \frac{p}{\rho g} + z \quad (A1.2)$$

où P [$ML^{-1}.T^{-2}$] est la pression, g [$L.T^{-2}$] l'accélération de la pesanteur et z [ML^{-1}] est le niveau volumique du fluide.

Cette loi n'est valable que dans le cas d'écoulements laminaires, c'est-à-dire pour des faibles vitesses (nombre de Reynolds en milieu poreux inférieur à une limite située entre 1 et 10). En pratique, elle n'est pas valable pour des écoulements en milieu karstique et en voisinage des ouvrages de captage où les vitesses sont très élevées.

Introduction

Les eaux souterraines représentent notre première ressource en eau douce mais leur qualité est aujourd'hui menacée par une activité humaine non raisonnée. Pour faire face à ce problème, des politiques de gestion des énergies sont développées pour protéger notre patrimoine environnemental mais, d'ores et déjà dans les pays industrialisés, les ressources en eaux souterraines sont mises en péril notamment par l'emploi intensif de produits nitrates et phytosanitaires et l'exploitation parfois non contrôlée des hydrocarbures, de leurs dérivés et des métaux lourds. La fragilité de cette ressource réside dans sa non accessibilité. En effet, alors que la pollution d'un cours d'eau est visible quasiment immédiatement, celle de la nappe n'est souvent détectée que des décennies après son apparition du fait de la lenteur de la progression des substances dans le sol. Il est alors parfois difficile de déterminer avec exactitude son origine car les moyens d'investigation sont coûteux et les informations qui en résultent restent limitées. Par ailleurs, suivant leurs propriétés physico-chimiques, les substances polluantes peuvent rester piégées dans le sol durant une très longue durée. En France, 3783 sites pollués par des hydrocarbures et leurs dérivés ou des métaux lourds sont recensés. Environ 12% de ces cas ont pour origine des solvants halogénés familles de constituants chimiques à laquelle appartiennent les solvants chlorés. En Alsace, la proportion de ces sites pollués par cette catégorie de substances (19%) est supérieure à la moyenne nationale (BASOL, 2004).

Notre étude a porté sur une pollution au perchloroéthylène (PCE) située au pied des collines vosgiennes. La présence de PCE a été détectée dans la nappe dans les années 90 mais l'enquête menée par BURGEAP a montré qu'il était probable que celle-ci soit apparue entre 1970 et 1980. Son origine est méconnue mais plusieurs travaux ont été réalisés afin de limiter la progression des traces dissoutes à l'aval du site. Dans le but de comprendre le devenir de ce solvant chloré et de ses dérivés, un partenariat a été conclu entre l'industriel considéré juridiquement comme responsable, le bureau d'étude BURGEAP chargé de ce dossier et le groupe d'animation de la recherche IFARE (Institut Franco-Allemand de Recherche sur l'Environnement) de l'Institut de Mécanique des Fluides et des Solides de Strasbourg. L'IMFS-IFARE s'intéresse, depuis quelques années, au comportement et au devenir de solvants chlorés dans les milieux poreux et dispose, pour ses travaux, d'une plate-forme expérimentale de grande dimension. Ce projet entre dans le cadre d'une convention de recherche entre l'IMFS-IFARE et l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse et a bénéficié d'une bourse de thèse financée par la Région Alsace. Durant ces travaux, des partenariats scientifiques avec l'équipe VEGAS (*) de l'Institut für Wasserbau de Stuttgart et Anjou Recherche ont permis d'affiner notre connaissance du milieu souterrain et de la pollution par la conduite de plusieurs campagnes de mesures entre décembre 1999 et juin 2003.

La situation de cette pollution est particulière car son origine a été localisée au pied des collines vosgiennes mais la menace peut s'étendre dans la plaine alsacienne. Or sur ce domaine, la nature géologique de l'aquifère est très différente entre le piémont et la plaine : dans le piémont, le milieu poreux apparaît très hétérogène et est constitué d'une alternance de couches de perméabilités très différentes alors qu'il semble plus homogène et plus perméable en plaine. Comment alors caractériser ces hétérogénéités tout en conservant une

(*) Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung

schématisation simple de l'aquifère sur le domaine d'étude afin de décrire l'écoulement global de la nappe et d'étudier le transport des polluants dissous ?

En outre, le comportement hydrodynamique de la nappe est sensiblement différent entre la plaine et le piémont et en fonction des fluctuations saisonnières des conditions hydrologiques. Comment alors reproduire les battements du niveau piézométrique ? Et ont-ils une incidence sur l'évolution des concentrations des traces dissoutes de polluants relevées sur le domaine ? Par ailleurs, le comportement des polluants est fortement conditionné par les caractéristiques physico-chimiques du milieu poreux pour lesquelles nous manquons d'information. Comment alors reproduire le panache des traces dissoutes de solvants chlorés tels qu'il est perçu actuellement ? Comment évaluer la fiabilité de notre étude et estimer l'évolution de cette pollution ?

Enfin, nos connaissances sur la source de solvants chlorés sont relativement restreintes : nous disposons de témoignages plus ou moins précis, de mesures ponctuelles de concentrations dont l'historique reste limité et des études réalisées précédemment par BURGEAP dont les travaux ont abouti à la mise en place d'un dispositif de dépollution qui se révèle efficace. Comment donc affiner notre perception de la source pour optimiser ce dispositif ?

L'approche adoptée est présentée en quatre chapitres. Dans le premier chapitre est abordée la problématique générale des solvants chlorés à travers quelques indications statistiques quant à la présence de ces substances dans les eaux souterraines et leurs propriétés dans le milieu poreux. Les difficultés à appréhender et à suivre l'étendue d'une pollution sont ici mises en relief en proposant quelques techniques d'investigation employées sur site et au laboratoire. Enfin sont présentées des approches numériques développées comme outils d'analyse du devenir de ces substances dans le sol.

Le deuxième chapitre expose la méthodologie adoptée pour bâtir un modèle de l'aquifère avec le code numérique hydrogéologique MODFLOW : fiabilité des données disponibles et hypothèses de construction du modèle afin de décrire l'écoulement de la nappe en régimes permanent et transitoire. Une analyse de sensibilité concernant les paramètres calés pour les deux régimes d'écoulement est présentée dans le but de discuter de la valeur du modèle obtenu.

Dans le troisième chapitre est abordé l'étude à grande échelle de la pollution des traces dissoutes. Pour ce faire, un modèle de transport a été construit avec le code de calcul monophasique MT3DMS. Puis, l'évolution probable de la pollution à courte durée dans un premier temps et pour une perspective de 30 ans environ ont été étudiées ainsi que la poursuite du traitement sur le site. La pollution a été décrite pour un régime d'écoulement tantôt permanent, tantôt transitoire à partir des champs de vitesses calculés dans le chapitre précédent.

Enfin, dans le dernier chapitre, nous nous sommes intéressés à la description plus locale de la pollution afin d'affiner la perception de la source résiduelle de polluant. Dans un premier temps, à l'aide d'une méthode analytique, la description du milieu poreux a été affinée et une distribution possible des quantités résiduelles de polluant a été déterminée. Puis une description plus détaillée de la source a été obtenue en utilisant un modèle multiphasique, SIMUSCOPP, permettant de considérer la dissolution du polluant dans la nappe. Cette étude s'est appuyée sur les profils de vitesses et de concentrations établis lors des campagnes de 1999 à 2003.