

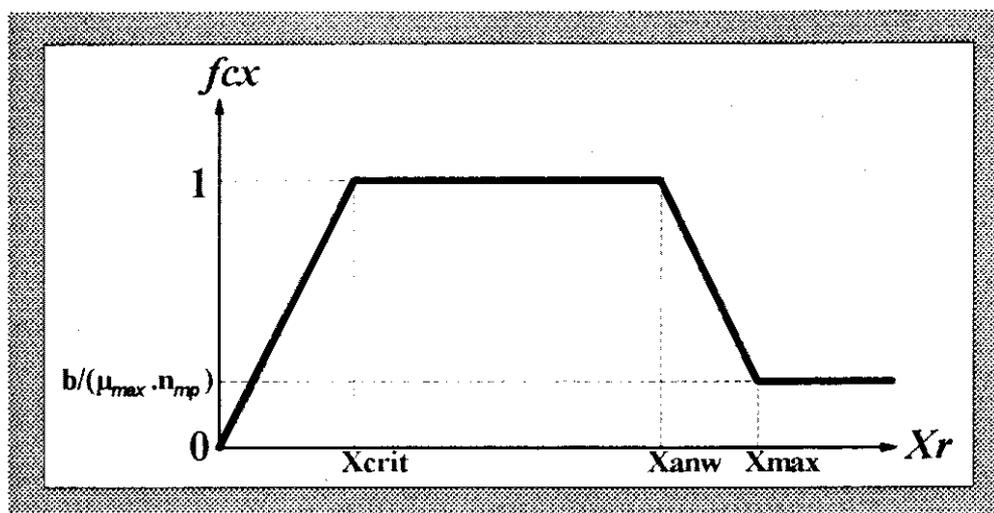
Jean-Marie CÔME



EXPÉRIMENTATION ET MODÉLISATION
DES PROCÉDÉS *IN SITU* DE DÉPOLLUTION
PAR BIODÉGRADATION AÉROBIE DES AQUIFÈRES
CONTAMINÉS PAR DES HYDROCARBURES

Prise en compte d'une phase huile résiduelle

67 / 03175



CENTRE D'INFORMATIQUE GÉOLOGIQUE
&
BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES
ET MINIÈRES



Sommaire

Résumé étendu.....	7
Notations utilisées.....	17
Introduction générale.....	21

Partie 1 Identification des processus en jeu et élaboration d'un modèle conceptuel

Introduction.....	27
1.1. Propagation d'une pollution de type hydrocarbure pétrolier dans un milieu poreux.....	29
1.2. La biodégradation aérobie <i>in situ</i>	32
1.2.1. Justification du choix du procédé vis-à-vis d'autres techniques de réhabilitation.....	32
1.2.2. Principes généraux.....	34
1.2.3. Les hydrocarbures.....	36
1.2.4. Le peroxyde d'hydrogène.....	38
1.2.5. L'azote.....	42
1.2.6. Le phosphore.....	48
1.2.7. Conclusion.....	51
1.3. Transfert d'eau en milieu poreux saturé en phases liquides avec prise en compte de saturations résiduelles en huile.....	53
1.3.1. Evidences expérimentales de la présence d'huile résiduelle dans la zone de battement de nappe.....	54
1.3.2. Répartition spatiale des gouttelettes d'huile à l'échelle microscopique.....	55
1.3.3. Estimation des surfaces interfaciales.....	62
1.3.4. Relations entre perméabilité relative et saturation en fluide.....	66
1.3.5. Equation d'écoulement.....	67
1.4. Transport de masse d'une substance soluble non réactive.....	69
1.4.1. Mécanismes de migration d'un élément conservatif en milieu poreux.....	69
1.4.2. Equation de transport.....	70
1.5. La dissolution.....	71
1.5.1. Modèles à l'équilibre et modèles cinétiques.....	71
1.5.2. Estimation des coefficients de transfert de masse.....	72
1.5.3. Confrontation des modèles de <i>Pfannkuch</i> et de <i>Miller et al.</i> avec des données de terrain.....	74
1.5.4. Méthodologie adoptée.....	76

1.6. Biodégradation des hydrocarbures dissous	77
1.6.1. Le modèle de Herbert	77
1.6.2. Limitation de la croissance par les accepteurs d'électrons et les nutriments	78
1.6.3. Limitation de la croissance par la biomasse	79
1.6.4. Limitation de la croissance par des substances inhibitrices	84
1.6.5. Modèle proposé	85
1.7. Biodégradation des hydrocarbures résiduels	87
1.7.1. Fermentation microbienne sur hydrocarbures : état de l'art	89
1.7.2. Proposition d'un modèle conceptuel	98
1.8. Présentation du modèle mathématique de transport couplé à la dissolution et à la biologie ..	105
1.8.1. Oxygène dissous	105
1.8.2. Hydrocarbure dissous	105
1.8.3. Hydrocarbure résiduel	106
1.8.4. Biomasse consommant les hydrocarbures résiduels	106
1.8.5. Biomasse consommant les hydrocarbures dissous	106
1.9. Traitement numérique des équations	107
1.9.1. Principe de la méthode des éléments finis	107
1.9.2. Application à la résolution de l'équation d'écoulement	108
1.9.3. Application à la résolution de l'équation de transport	110
1.9.4. Introduction des termes sources et couplage des équations de transport avec la dissolution et la biologie	112

<p>Partie 2 Vérification du code numérique</p>
--

Introduction	119
2.1. Vérification du code d'écoulement	121
2.1.1. Maillage régulier 70 éléments et champ de perméabilité homogène	122
2.1.2. Maillage irrégulier 700 éléments et champ de perméabilité hétérogène	123
2.2. Vérification du code de transport (substance non réactive)	125
2.2.1. Maillage régulier 70 éléments et champ de perméabilité homogène	125
2.2.2. Maillage irrégulier 700 éléments et champ de perméabilité hétérogène	126
2.2.3. Maillage régulier 7000 éléments et champ de perméabilité homogène	129
2.3. Bilan de masse sur le code de transport couplé à la dissolution et à la biologie	131
2.3.1. Méthodologie	131
2.3.2. Tests sur un maillage 1D de 20 éléments	135
2.4. Etude de sensibilité des paramètres principaux du code BIOS sur les 5 variables d'état du système	137
2.4.1. Perméabilité à saturation	140
2.4.2. Coefficient cinétique pour la dissolution	141
2.4.3. Solubilité de l'hydrocarbure	143
2.4.4. Taux de croissance spécifique exponentiel pour la biomasse consommant l'hydrocarbure dissous	144
2.4.5. Taux de croissance spécifique exponentiel pour la biomasse consommant l'hydrocarbure résiduel	146
2.4.6. Taux de dégénérescence spécifique pour la biomasse consommant l'hydrocarbure dissous	147
2.4.7. Taux de dégénérescence spécifique pour la biomasse consommant l'hydrocarbure résiduel	149

2.4.8. Facteur d'accessibilité lié au milieu poreux pour la biomasse consommant l'hydrocarbure dissous	150
2.4.9. Facteur d'accessibilité lié au milieu poreux pour la biomasse consommant l'hydrocarbure résiduel.....	152
2.4.10. Concentration en biomasse correspondant au recouvrement complet de la surface interfaciale PLNA/phase aqueuse par la biomasse	153
2.4.11. Concentration critique en biomasse pour l'adhésion et la solubilisation de la PLNA.....	155
2.4.12. Concentration maximale en biomasse atteinte à la fin de la phase exponentielle	156
2.4.13. Masse d'une bactérie.....	158
2.4.14. Rapport massique de conversion substrat hydrocarboné / biomasse.....	159
2.4.15. Rapport massique stoechiométrique oxygène / hydrocarbure.....	161
2.4.16. Concentration de demi-saturation en hydrocarbure dissous.....	162
2.4.17. Concentration de demi-saturation en hydrocarbure résiduel.....	164
2.4.18. Concentration de demi-saturation en oxygène	165
2.4.19. Discussion.....	167
2.5. Etude de sensibilité des paramètres principaux sur les surfaces interfaciales	169
2.5.1. Granulométrie.....	169
2.5.2. Saturation en fluide non mouillant.....	171
2.5.3. Angle de contact.....	173
2.5.4. Influence des surfaces interfaciales sur la fonction f_{cx}	173
2.6. Etude de sensibilité des paramètres principaux sur les coefficients cinétiques pour la dissolution.....	175
2.6.1. Granulométrie.....	176
2.6.2. Porosité.....	176
2.6.3. Vitesse de pore.....	177
2.6.4. Saturation en fluide non mouillant.....	177
2.7. Tests de performance des schémas numériques.....	179
2.7.1. Convergence de la solution (schéma de Picard).....	179
2.7.2. Stabilité de la solution.....	182
2.7.3. Intérêt du découplage de la résolution de l'écoulement et du transport sur le temps CPU.....	183

<p>Partie 3 Expérimentations <i>in situ</i></p>
--

Introduction.....	189
3.1. Expérimentation <i>in situ</i> sur le site du Port aux Pétroles de Strasbourg.....	191
3.1.1. De l'idée d'un partenariat industriel à l'étude de faisabilité en laboratoire.....	191
3.1.2. Conception et construction du pilote.....	199
3.1.3. Phase 1 de traitement.....	203
3.1.4. Bilan de masse pour la phase 1 de traitement.....	212
3.1.5. Phase 2 de traitement.....	217
3.1.6. Conclusion.....	220
3.2. Expérimentation <i>in situ</i> sur une friche industrielle.....	223
3.2.1. Contexte hydrogéologique.....	224
3.2.2. Diagnostic de la pollution du milieu souterrain.....	224
3.2.3. Conception et réalisation du dispositif de traitement.....	228
3.2.4. Déroulement du traitement.....	231
3.2.5. Résultats sur les sols.....	235

3.2.6. Résultats sur les eaux	236
3.2.7. Bilan de masse.....	243
3.2.8. Conclusion	245

<p style="text-align: center;">Partie 4 Validation du modèle</p>
--

Introduction.....	248
4.1. Description, mesure et choix des paramètres	249
4.1.1. Paramètres considérés comme des constantes universelles.....	250
4.1.2. Paramètres mesurés indépendamment.....	251
4.1.3. Paramètres issus de la littérature	254
4.1.4. Paramètres de calibration.....	256
4.2. Calibration sur des données de laboratoire.....	257
4.2.1. Test en colonne.....	258
4.2.2. Test en bac.....	267
4.3. Validation sur des données de terrain	273
4.3.1. Port aux Pétroles de Strasbourg.....	274
4.3.2. Friche industrielle	276
Conclusion générale.....	295
Bibliographie.....	300
Bibliographie générale	301
Bibliographie relative au projet	310