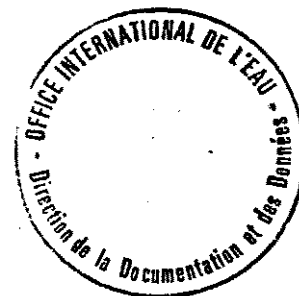


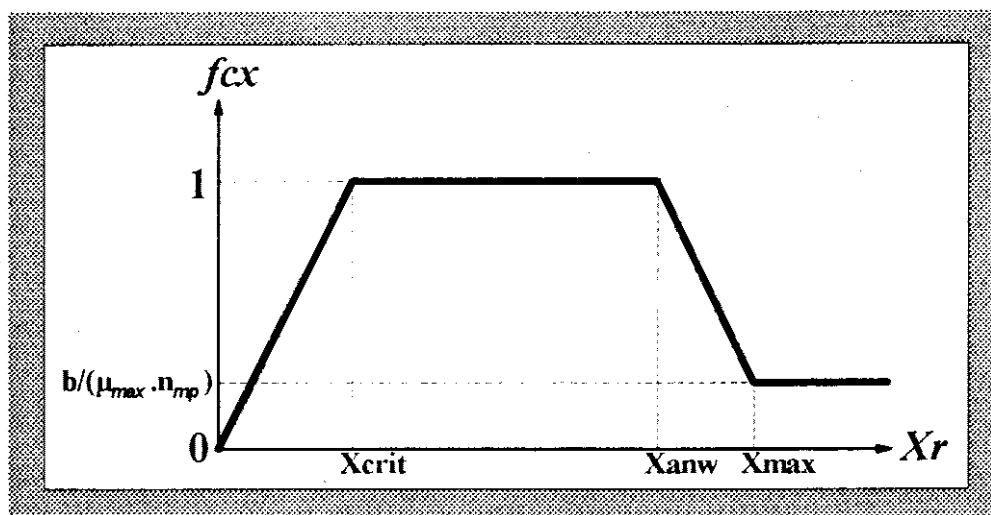
Jean-Marie CÔME



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

<b>Partie 1</b> <b>Identification des processus en jeu et élaboration d'un modèle conceptuel</b>
---

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

<b>1.6. Biodégradation des hydrocarbures dissous</b> .....	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
<b>1.7. Biodégradation des hydrocarbures résiduels</b> .....	87
1.7.1. Fermentation microbienne sur hydrocarbures : état de l'art .....	89
1.7.2. Proposition d'un modèle conceptuel .....	98
<b>1.8. Présentation du modèle mathématique de transport couplé à la dissolution et à la biologie</b> ..	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
<b>1.9. Traitement numérique des équations</b> .....	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><b>Partie 2</b></p> <p><b>Vérification du code numérique</b></p>
---

<b>Introduction</b> .....	119
<b>2.1. Vérification du code d'écoulement</b> .....	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
<b>2.2. Vérification du code de transport (substance non réactive)</b> .....	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
<b>2.3. Bilan de masse sur le code de transport couplé à la dissolution et à la biologie</b> .....	131
2.3.1. Méthodologie .....	131
2.3.2. Tests sur un maillage 1D de 20 éléments .....	135
<b>2.4. Etude de sensibilité des paramètres principaux du code BIOS sur les 5 variables d'état du système</b> .....	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
<b>2.5. Etude de sensibilité des paramètres principaux sur les surfaces interfaciales .....</b>	<b>169</b>
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
<b>2.6. Etude de sensibilité des paramètres principaux sur les coefficients cinétiques pour la dissolution.....</b>	<b>175</b>
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
<b>2.7. Tests de performance des schémas numériques.....</b>	<b>179</b>
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

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

<b>Introduction.....</b>	<b>189</b>
<b>3.1. Expérimentation <i>in situ</i> sur le site du Port aux Pétroles de Strasbourg.....</b>	<b>191</b>
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
<b>3.2. Expérimentation <i>in situ</i> sur une friche industrielle.....</b>	<b>223</b>
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;"><b>Partie 4</b> <b>Validation du modèle</b></p>
--

<b>Introduction.....</b>	<b>248</b>
<b>4.1. Description, mesure et choix des paramètres .....</b>	<b>249</b>
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
<b>4.2. Calibration sur des données de laboratoire.....</b>	<b>257</b>
4.2.1. Test en colonne.....	258
4.2.2. Test en bac.....	267
<b>4.3. Validation sur des données de terrain .....</b>	<b>273</b>
4.3.1. Port aux Pétroles de Strasbourg.....	274
4.3.2. Friche industrielle .....	276
 <b>Conclusion générale.....</b>	 <b>295</b>
 <b>Bibliographie.....</b>	 <b>300</b>
Bibliographie générale .....	301
Bibliographie relative au projet .....	310