

ACADÉMIE DE MONTPELLIER

UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC

THÈSE

présentée à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc
pour obtenir le grade de Docteur-Ingénieur en SCIENCES DE L'EAU

CONCEPTION D'UN MODÈLE DE PROPAGATION DE POLLUTION EN NAPPE AQUIFÈRE

EXEMPLES D'APPLICATION A LA NAPPE DU RHIN

par

Philippe VIGOUROUX

Soutenue le 4 Juillet 1981 devant la Commission d'Examen

JURY : MM. C. DROGUE	Président
H. R. LANGGUTH	} Assesseurs
G. de MARSILY	
J. P. VANÇON	

Laboratoire d'Hydrogéologie
Montpellier - U. S. T. L.

Bureau de Recherches Géologiques et Minières
Service Géologique Régional Alsace
Strasbourg

CONCEPTION D'UN MODELE DE PROPAGATION DE POLLUTION
EN NAPPE AQUIFERE
EXEMPLES D'APPLICATION A LA NAPPE DU RHIN

RÉSUMÉ

L'ensemble des pollutions qui affectent notre environnement a conduit à de nombreuses études de la qualité de l'eau des nappes aquifères, en particulier pour la nappe phréatique d'Alsace.

Cette nappe, la plus vaste d'Europe (170 km x 30 km) est un puissant réservoir aquifère, fortement exploité pour les besoins en eau des collectivités, des industriels et des agriculteurs. Elle représente un grand intérêt économique et se trouve depuis longtemps soumise à des agressions variées qui altèrent sa qualité. L'ampleur du phénomène est telle qu'il s'est créé, en aval de certaines sources de contamination de véritables langues salées qui se propagent parfois sur plusieurs dizaines de kilomètres de long.

Parmi les études réalisées pour améliorer la connaissance du milieu aquifère et pour remédier à cette situation critique pour l'environnement, un modèle hydrodispersif de propagation des polluants a été mis au point. Le modèle proposé a été calé sur une période de référence d'une trentaine d'années. En effet, parmi les sites étudiés, la pollution due aux terrils de l' "Ochsenfeld", résidus de fabrication de l'industrie chimique a pu être suivie, et un historique de données très complet est disponible. Sur ces terrils, un système de dépollution a été testé, ce qui a rendu possible une simulation de l'évolution des concentrations dans le temps. Malgré la lenteur du phénomène, l'influence de la dépollution est sensible.

L'ensemble du travail est basé sur l'étude d'un système de propagation chimique pouvant prendre en compte, en régime transitoire, toute variation imposée par l'hydrodynamique. L'analogie entre les maillages des modèles hydrodynamiques et chimiques a permis d'élargir les possibilités des modèles utilisés jusque là. Des procédures spéciales ont permis d'éliminer les phénomènes de dispersion numérique.

Pour mieux comprendre l'influence des différents paramètres qui rentrent en jeu, des tests ont été réalisés. Les résultats sont en accord avec l'approche analytique du problème. La rétention a été étudiée de manière plus approfondie, afin d'évaluer son rôle sur la propagation. L'influence prépondérante de la dispersion sur l'évolution des concentrations à courte distance a pu être mise en évidence (c'est le domaine d'application des modèles purement "dispersifs"). A grande distance, c'est la rétention qui prédomine, en ralentissant le déplacement du pic de concentration. Une relation a pu être définie entre la vitesse "modale" et la porosité de rétention moyenne.

L'ensemble des travaux effectués, tant du point de vue expérimental (conception du modèle et méthode développée) que du point de vue pratique (application du modèle en Alsace) a permis d'améliorer la compréhension des phénomènes de propagation chimique et ouvre la voie vers des systèmes de calcul de propagation plus élaborés.

SOMMAIRE

	Pages
TABLEAU DES SYMBOLES	1
<u>INTRODUCTION</u>	3
<u>CHAPITRE I</u> : REFLEXIONS SUR LA TERMINOLOGIE	5
<u>I.1. Les termes concernant les modèles mathématiques</u>	
I.1.1. la modélisation	6
I.1.2. la discrétisation	6
I.1.3. le modèle hydrodynamique	6
I.1.4. le modèle hydrodispersif	7
I.1.5. la notion de limites	7
<u>I.2. Les termes spécifiques à l'étude</u>	
I.2.1. pollution et environnement	7
I.2.2. axe de la langue salée	8
I.2.3. injection	12
I.2.4. pluie efficace	12
I.2.5. convection	13
I.2.7. dispersion	13
I.2.8. rétention	16
<u>CHAPITRE II</u> : DESCRIPTION DU MODELE UTILISE	18
<u>II.1. Modélisation mathématique</u>	
II.1.1. les méthodes usuelles	19
a) méthode des différences finies	19
b) méthode des caractéristiques	19
c) approximation par éléments finis - méthode de Galerkin	20
d) conclusion sur ces méthodes.	20
II.1.2. équation de la propagation	20
<u>II.2. Résolution informatique</u>	
II.2.1. modèle CHI	21
II.2.2. le modèle LOZ	23
a) hypothèses formulées par le modèle LOZ	23
b) couplage des modèles hydrodynamique et hydrodispersif, les fichiers	23
c) problème de la diffusion numérique	25
d) suivi de l'axe de la langue salée	27
e) modélisation de la propagation	29
f) analyse par module, organigramme, procédures, les données	31
g) conditions d'injection et pompage	37
h) limites d'utilisation	39

	Pages
<u>CHAPITRE III</u> : ETUDE DES PARAMETRES DU MODELE	40
III.1. <u>Choix des variables sans dimension et paramètres étudiés</u>	
III.2. <u>Caractéristiques du domaine aquifère test</u>	
III.2.1. Les essais sur les piézomètres de Munwiller	42
a) mesures de vitesse	42
b) essais de traceur	43
III.2.2. Les tests de modélisation	44
III.3. <u>Résultats de l'étude sur le domaine test</u>	
III.3.1. Vérification du fonctionnement du modèle LOZ	45
III.3.2. Etude du rôle des paramètres	46
a) la dispersion	46
b) la rétention	51
III.4. <u>Conclusions</u>	
III.4.1. Rôle des paramètres en fonction de la distance	52
a) à courte distance	52
b) à grande distance	52
III.4.2. Méthode d'approche des études	53
<u>CHAPITRE IV</u> : APPLICATIONS DU MODELE	55
1ère application : Pollution de la nappe du Rhin à partir _____ des terrils de l'Ochsenfeld	56
IV.1. <u>Contexte de l'application</u>	
IV.1.1. Activité industrielle et pollution	56
IV.1.2. Conditions géologiques et hydrogéologiques	57
IV.1.3. Etudes antérieures sur le secteur	58
IV.2. <u>Utilisation du modèle hydrodynamique</u>	
IV.2.1. Etude en régime permanent	59
IV.2.2. Etude en régime transitoire	59
IV.3. <u>Utilisation du modèle hydrodispersif</u>	
IV.3.1. Les données prises en compte	61
IV.3.2. Méthode d'approche	62
IV.3.3. Résultats obtenus : étalonnage et prévisions	63
IV.3.4. Premiers résultats terrains et conclusions	67

	Pages
2ème application : Pollution de la nappe du Rhin issue des terrils ALEX et RODOLPHE (Bollwiller)	75
<u>IV.4. Situation générale</u>	
IV.4.1. Différenciation de deux axes salés	75
IV.4.2. Influence de la pollution directe	76
<u>IV.5. Simulations avec le modèle LOZ</u>	
IV.5.1. Les difficultés rencontrées	76
IV.5.2. Les perspectives de l'étude	78
 <u>CONCLUSIONS</u>	 79
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	81
 <u>LISTE DES FIGURES</u>	 85
<u>LISTE DES ANNEXES</u>	87

INTRODUCTION

1.1 EXPOSE DU PROBLEME ET OBJECTIF DES ETUDES

1.1.1. Exposé du problème

Les nappes souterraines constituent d'importantes ressources naturelles en eau et peuvent être considérées comme une véritable richesse. Cependant, elles présentent une grande vulnérabilité aux pollutions. La notion de ressource doit s'entendre autant du point de vue quantitatif que qualitatif. Malheureusement en ce qui concerne la qualité, celle-ci peut être altérée par des infiltrations ponctuelles de polluant (terrils) ou par une alimentation en eaux souillées (rivières). C'est dans ce contexte que la nappe phréatique d'Alsace et les différentes pollutions qui affectent sa qualité ont été particulièrement étudiées.

1.1.2. Objectif des études

Jusqu'ici, les travaux portaient essentiellement sur la détermination des conditions optimales de dépollution des sites, à l'aide d'un modèle hydrodynamique.

A partir des différentes données disponibles et par l'étude des différents paramètres, l'objectif de cette étude était de mettre au point un modèle hydrodispersif qui permette, à un instant quelconque, de représenter la répartition des teneurs chimiques au sein de la nappe, en intégrant les modifications que les systèmes de dépollution imposent à l'hydrodynamique. Pour ce faire, il a été nécessaire de coupler l'utilisation des modèles hydrodynamique et hydrodispersif autour de fichiers de données communs, permettant une prise en compte efficace des phénomènes, ce grâce à un maillage carré analogue.

1.2 TRAVAUX REALISES

Le modèle informatique est constitué d'un ensemble de programmes et sous-programmes qui s'enchaînent, en fonction des impératifs de calcul, par des procédures automatiques. Ils sont écrits en Fortran IV et adaptés à l'unité de programmation disponible au Service Géologique Régional Alsace, ce qui a facilité la liaison avec les programmes de modélisation hydrodynamique déjà utilisés par ce même Service.

Pour vérifier les résultats obtenus par ce modèle sur une étude expérimentale fictive, les réponses ont été comparées aux résultats analytiques correspondants. L'influence des paramètres qui jouent un rôle sur la propagation des concentrations a été systématiquement étudiée. Pour cela, des tests ont été réalisés en modifiant successivement chacun des paramètres, ce qui permet d'évaluer leur importance relative. Parmi ceux-ci, l'influence de la rétention et de la dispersion sur de très courtes distances (inférieures à 10 m) et sur des distances moyennes (de l'ordre du kilomètre) a particulièrement retenu l'attention.

A partir de ces travaux, une étude complète a pu être menée sur un site réel (contrat pour le compte du Ministère de la Qualité de la Vie). Les principaux points de cette étude sont exposés plus loin et sont un exemple des procédures qui peuvent être suivies dans les cas de pollutions analogues.

En fin de ce travail, d'autres cas ont été abordés, qui présentent des difficultés d'approche spécifiques. Les réflexions particulières concernant un de ces cas sont présentées dans le chapitre IV. Pour bien comprendre le modèle et ses utilisations, il est nécessaire de définir de façon claire le contexte géologique dans lequel il a été élaboré.

1.3 CONTEXTE GENERAL (d'après Y. BABOT 1979)

L'étude réalisée concerne la plaine alluviale du Rhin, qui, comme on le sait, est le siège, depuis des années, d'une pollution de la nappe aquifère. Cette plaine s'étend sur 170 km de long et sur 25 km de large (maximum) et fait partie de cette vaste formation d'alluvions qui se développe dans le fossé rhénan.

Ces alluvions sont le siège d'une puissante nappe phréatique, alimentée par les précipitations sur toute sa surface ainsi que par l'infiltration des rivières vosgiennes et sundgaviennes à leur débouché en plaine. Le renouvellement des eaux a pu être estimé à 1,5 milliards de mètres cube par an et les prévisions d'exploitation avoisinent 1 milliard de m³ pour l'an 2 000. Le Rhin et ses aménagements jouent le rôle de niveau de base, en drainant ou en alimentant la nappe suivant la position des différents biefs.

En ce qui concerne les caractéristiques hydrodynamiques, la relative homogénéité des alluvions conduit à une transmissivité qui varie presque essentiellement en fonction de l'épaisseur. Elle peut atteindre des valeurs de 0,5 à 1 m²/s au centre de la plaine. La continuité de la nappe aquifère sur parfois plus de 100 km de long, en relation avec les cours d'eau, favorise la propagation de pollutions souterraines importantes. Ainsi, des kilomètres carrés de ressource en eau deviennent inutilisables.

CONCLUSION

Ce travail rentre dans le cadre d'une vaste étude des problèmes de pollution qui affectent les ressources en eaux souterraines de la plaine d'Alsace. Le modèle LOZ, développé dans le cadre de cette thèse, s'est révélé un outil bien adapté à ce type d'étude.

Lors de la conception du modèle LOZ, représentant un schéma bidimensionnel plan, certains problèmes se sont posés, on notera essentiellement :

- les problèmes liés à la discrétisation, en particulier la nécessité d'un transfert en rapport avec la dimension de la maille,
- la valeur de concentration moyenne sur toute la hauteur de l'aquifère (bidimensionnel plan) et sur toute la largeur de la maille (discrétisation de l'espace),
- la non-prise en compte des filets liquides divergents, ceci afin d'éviter une des formes de la diffusion numérique de direction.

Malgré ces difficultés, le schéma de modélisation retenu a permis d'annuler les phénomènes parasites de diffusion numérique pour ce qui concerne la convection, d'une part par la prise en compte d'une erreur angulaire qui élimine la diffusion numérique de direction, et d'autre part, par la prise en compte d'une erreur sur la distance, transmise d'un pas de temps sur l'autre, qui annule la diffusion numérique d'amplitude. Le domaine aquifère test, étudié avec le modèle LOZ a permis d'apprécier le rôle relatif de la dispersion et de la rétention. On distingue ainsi, à petite échelle (de l'ordre de la dizaine de mètres) une influence prépondérante de la dispersion. Le passage du pic de concentration est en avance par rapport au passage d'un pic correspondant à la vitesse effective moyenne de pores. A grande échelle (de l'ordre de quelques kilomètres) on note une influence prépondérante de la rétention qui provoque un retard de passage du pic de concentration. L'ensemble de ces observations a conduit à considérer à grande distance l'influence de la variation de porosité de rétention sur la vitesse modale. Une relation linéaire entre le rapport de la vitesse modale sur la vitesse effective et le rapport de la porosité de rétention sur la porosité totale, a permis d'élaborer une méthode d'approche des études de pollution concernant de grands domaines. On peut ainsi ajuster l'ensemble des paramètres entre eux et tendre rapidement, avec le modèle LOZ, vers une solution proche des observations de terrain.

Deux exemples de pollution étendue différents ont alors été étudiés. Le premier, la pollution à partir des terrils de l'Ochsenfeld, concerne une zone de la nappe du Rhin fortement sollicitée par l'exploitation de gravières et faisant l'objet d'une action de dépollution basée sur une configuration déterminée par les modèles utilisés (hydrodynamique et hydrodispersif). Le deuxième, la langue salée de Bollwiller, présente des particularités intéressantes : d'une part le dédoublement en deux axes salés distincts, d'autre part, les effets de la pollution directe par les rivières par opposition à la pollution lente provenant des terrils. Ces travaux permettent d'apprécier l'utilisation du modèle LOZ. Les limites du système de modélisation retenu donnent une idée des perfectionnements à apporter, on peut citer :

- l'introduction d'une constante de temps pour effectuer l'homogénéisation, au cours du pas de temps des concentrations entre la phase mobile et immobile, ceci pour rendre compte du fait qu'il doit se passer des phénomènes différents, suivant que le temps de contact est long ou court. Cela permettrait une plus grande indépendance entre le résultat et le pas de temps de calcul adopté sur le modèle. Cette constante cinétique pourrait être calée sur une expérience à petite échelle, permettant une extrapolation à d'autres durées ou d'autres distances.

- la prise en compte d'une troisième dimension, c'est à dire, sans envisager tout de suite un véritable système tridimensionnel, l'étude d'un système multicouche. A ce niveau se pose le problème des données trop peu nombreuses. On peut envisager alors une utilisation plus intense de la géophysique pour la détermination des différentes strates plus ou moins conductrices du milieu poreux et de leur degré de pollution. Cette nouvelle voie permettrait de prendre en compte des phénomènes négligés jusque là, mais elle nécessite un alourdissement de la programmation tel qu'il sera peut être exclu de résoudre ce genre d'étude sur des ordinateurs de capacité mémoire réduite tels que celui auquel a été adapté toute la conception du modèle LOZ.

Quoiqu'il en soit, et malgré ses simplifications par rapport aux phénomènes réels, le modèle LOZ permet une approche réaliste des phénomènes de propagation de polluant sur de grandes distances.