

THESE

présentée à

L'INSTITUT' NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

pour obtenir le titre de

DOCTEUR-INGENIEUR

en Génie Géologique et Minier

par

Boudjema KHAMMARI

SUJET

SIMULATION NUMERIQUE DES ECHANGES RIVIERE - NAPPE ALLUVIALE EN PRESENCE D'UNE BALLASTIERE ESSAI METHODOLOGIQUE

Soutenue publiquement le 31 octobre 1978 devant la Commission d'Examen

MM. P. BLAZY

R. HOUPERT

J.L. MALLET

L. DEMASSIEUX

J.P. LABORDE

J. RICOUR

Président

} Examineurs

AVANT- PROPOS

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au Laboratoire d'Hydrogéologie et **d'Hydraulique Appliquée de l'Ecole Nationale Supérieure de géologie Appliquée et de Prospection Minière de Nancy.**

Qu'il me soit permis d'exprimer ici mes remerciements à **tous ceux** grâce auxquels j'ai pu faire ce travail.'

Monsieur le Professeur **P. BLAZY** m'a ouvert, il y a trois ans, les portes de **l'Ecole** qu'il dirige. **Aujourd'hui, il me fait** le grand honneur **de** présider ce Jury. Malgré ses **multiples** responsabilités de recherches **et d'enseignement**, j'ai été surpris **plus d'une fois de le voir** parfaitement au courant **de mon** travail. Il me plairait de **lui** témoigner entre autres, ma respectueuse admiration pour la facilité à communiquer son savoir.

La direction effective **de mon** travail **a été confiée** à Monsieur **L. DEMASSIELJX**, Maître **assistant à l'E.N.S.G. et Responsable du** Laboratoire d'Hydrogéologie **et d'Hydraulique Appliquée.** **Il fut** toujours un maître **soucieux - comme le voudrait la bienveillance** du formateur - et je **lui dois** de m'avoir **enseigné** l'Hydrogéologie. Après mes **timides tâtonnements** sur **les modèles analogiques**, il a su m'orienter **avec diligence vers la modélisation** numérique des nappes aquifères.

Monsieur J.L. **MALLET**, Maître **de recherches** au **C.N.R.S.**, **a mis** à ma disposition **son modèle numérique "PBDIR2".** **Qu'il** trouve ici l'expression de ma profonde gratitude. Ses conseils **et explications** ont été pour moi très précieux.

Je remercie **vivement** Monsieur R. **HOUVERT**, Maître **de conférences** et Directeur **du** Laboratoire de **Géomécanique de l'E.N.S.G.**, **qui a bien** voulu participer au Jury de **cette** thèse.

Je **remercie également** Monsieur J. **RICOUR**, Directeur **du** Service Géologique Régional **de Lorraine**, d'avoir bien voulu participer **au Jury de cette thèse.**

TABLE DES MATIERES

	Pages
INTRODUCTION.	I
1 - Le problème général des échanges rivière-nappe souterraine	I
2- Obj et del ' étude	3

CHAPITRE 1

PROBLEMES POSES PAR LES ECHANGES RIVIERE-NAPPE SOUTERRAINE ET ETAT ACTUEL DE LA QUESTION

1.1 - POSITION DES PROBLEMES	5
1.2 - LES TRAVAUX ANTERIEURS	6
1.2.1 : Paramètres en jeu et analyse dimensionnelle	6
1.2.2 : Description du modèle analogique	8
1.2.3 : Quelques conclusions sur les résultats obtenus en analogie visqueuse de HELE-SHAW ,	10
a - Evolution de la surface libre . . . ,	10
b - Débits échangés . . , , ,	12
1.3 - RAPPELS THEORIQUES	12
1.3.1 : Hypothèses fondamentales . ,	14
1.3.2 : Equations de base des écoulements en milieux poreux , . . . ,	14
a - Une équation de la conservation de l'énergie : loi de DARCY	15
b - Une équation de la conservation de la masse : l'équation de CONTINUITE	17
c - Caractéristiques hydrauliques et problèmes aux limites	19
i.3.3 - Limites d'application de l'équation de la diffusion	22
a - Nappe libre profonde	23
b - Nappe libre peu profonde	24

CHAPITRE IIISIMULATION NUMERIQUE DE L'INFLUENCE DES BALLASTIERES SUR LE
SOUTIEN AUX DEBITS D'ETIAGE - PRISE EN COMPTE DE (P - ETP)

III.1 - ENONCE DU PROBLEME	47
III.2 - DESCRIPTION DES DONNEES	48
111.2.1 : L'état initial de la nappe	48
111.2.2 : Les limites géométriques du système aquifère	48
111.2.3 : Caractéristiques hydrauliques de l'aquifère	49
111.2.4 : Evaluation de la pluie efficace	50
III.3 - MOYENS D'ETUDE.	51
111.3.1 : Principe de la méthode	52
111.3.2 : Description du programme utilisé	53
a - Maillage utilisé	53
b - Définitions des arguments de PBDIR2	55
111.3.3 : Adaptation du modèle mathématique aux problèmes posés	57
III.4 - ETUDE NUMERIQUE DU CONTRASTE DES DIFFUSIVITES T/S EN PRESENCE D'UNE BALLASTIERE- NAPPE ALLUVIALE	57
111.4.1 : Objet de l'étude	57
111.4.2 : Schématisation du cas réel	59
111.4.3 : Programmation des calculs	60
111.4.4 : Moyens d'interprétation des résultats	61
111.4.5 : Synthèse des premiers résultats	62
111.4.6 : Conclusion des premiers résultats	70
III.5 - INTERFERENCES HYDRODYNAMIQUES BALLASTIERE -ALLUVIONS. PRISE EN COMPTE DE (P - ETP).	74
111.5.1 : Exposé des problèmes	74
111.5.2 : Organisation des essais	74

1.4 - QUELQUES METHODES D'INTERPRETATION DES VARIATIONS DU NIVEAU DES NAPPES SOUTERRAINES	25
1.4.1 : Interprétation par les essais de pompage	25
1.4.2 : Autres méthodes d'étude	26
1.5 - CONCLUSION - BUT DE L' ETUDE	28

CHAPITRE II

FACTEURS DE VARIATIONS DU NIVEAU DES NAPPES SOUTERRAINES

II.1 - DESCRIPTION DES PRINCIPAUX TYPES DE STRUCTURES HYDROGEOLOGIQUES.	31
11.1.1 : Examen d'ensemble	31
11.1.2 : Typologie des eaux souterraines	36
11.1.3 : Conditions aux limites usuelles	38
II.2 - CAUSES DE VARIATIONS DU NIVEAU DES NAPPES	41
11.2.1 : Causes provoquées artificiellement.	41
11.2.2 : Variations selon le type de climat.	4
a - Vallée sèche.	4
b - Climat désertique	4
c - Climat tropical	4
d - Climat froid	4
11.2.3 : Autres causes possibles de variations	4
II.3 - CONCLUSION	
11.3.1 : Recharge et/ou décharge ?	
11.3.2 : Paramètres non pris en compte par l'équation de la diffusion mais pouvant intervenir	

	Pages
111.5.3 : Vidange d'une ballastière contiguë à un tronçon de rivière. . .	75
a - Modélisation du système ballastière - alluvions	76
. <i>Domaine d'étude</i>	76
. <i>Conditions aux limites et initiales</i>	76
. <i>Caractéristiques hydrodynamiques</i>	77
b - Discrétisation du modèle en éléments	77
. <i>Algorithme de discrétisation du système</i>	78
c - Conduite des simulations	80
. <i>Mise en oeuvre du programme résultant</i>	84
d - Résultats obtenus	86
e - Comportement de PBDIR2 vis-à-vis des résultats obtenus	92
f - Envergure optimale de la ballastière	95
111.5.4 : Vidange d'une ballastière encaissée dans un méandre	97
a - Discrétisation retenue pour la conduite des simulations	98
b - Résultats obtenus	100
111.5.5 : Comparaison des résultats obtenus. Conclusion	102
111.5.6 : Comportement naturel d'une ballastière en amont d'une nappe alluviale - Prise en compte de (P - ETP).	107
a - Introduction des données de l'année hydrologique 1975/76	107
b - Résultats obtenus	109
CONCLUSION	115
BIBLIOGRAPHIE	119
ANNEXES	123

Au terme de cette étude, on peut dire que les objectifs assignés ont été largement atteints ; il s'agissait essentiellement de simuler numériquement l'évolution des potentiels et des débits d'exhaures d'une nappe alluviale en présence d'une ballastière. Ces objectifs se sont définis exclusivement dans la spécialité que constitue l'hydrogéologie et nous ont ouvert bien d'autres perspectives ; nous y reviendrons.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons à notre disposition une résolution numérique d'une équation phénoménologique [voir §.I.3.2.c, équation 211, par une méthode variationnelle aux éléments finis [voir principe de la méthode au 5.111.3.1 et son détail en annexe). Cette équation ainsi que son mode de résolution, sont communes et applicables à de nombreux problèmes relevant des sciences de l'ingénieur.

Il apparaît clairement, dès les premiers résultats, que la méthode de résolution utilisée permet la simulation de plan d'eau en liaison hydrodynamique continue avec l'écoulement à travers les alluvions ; en effet, nous l'avons testé trois fois de différentes manières [voir (.III.5.3.b, §.III.5.3.e, §.III.5.6.b). Cela nous a amené à essayer d'optimiser les arguments de contrôle de la SUBROUTINEPBDIR2 pour différents pas de temps et pas d'espace. Nous avons également pu constater que le modèle en question pouvait donner de très mauvais résultats s'il se trouvait mal utilisé.

Nous ne prétendons pas avoir utilisé toutes les possibilités de ce modèle ; nous avons seulement essayé de l'adapter à un problème particulier de l'hydrogéologie.

Mais, on a pu nous objecter d'avoir "utilisé un bulldozer pour écraser une mouche", c'est-à-dire d'avoir abusé de moyens technologiques importants pour atteindre finalement des objectifs sans grand intérêt. Face à cela, nous dirons que ce reproche ne peut être fondé que s'il est justifié par l'utilisation d'un autre moyen (ou méthode) plus efficace et moins onéreux. Quant à l'intérêt de l'étude, nous dirons que l'estimation du rôle des ballastières dans le soutien aux débits d'étiage n'est pas moins important que tout autre objectif de l'hydrogéologie. Certes, la prévision des débits d'exhaure et le soutien aux débits d'étiage ne sont pas les seuls problèmes de l'hydrogéologue qui devra désormais tenir compte de la protection des nappes aquifères contre la pollution.

Bref, l'intérêt d'une étude prévisionnelle nous paraît indéniable. Quoi qu'il en soit, c'est à l'hydrogéologue de décider des moyens à mettre en oeuvre pour répondre à la question : "de combien d'eau dispose-t-on" ?

Voilà plus de soixante-dix ans que l'équation fondamentale de l'hydrodynamique en milieux poreux saturés a été établie. Elle a donné lieu à de nombreuses solutions analytiques et analogiques. Parmi les solutions évoquées au chapitre 1, nous avons présenté en détail l'analogie visqueuse de HELE-SHAW. Cette analogie a pu aboutir à quelques résultats au prix de gros investissements (voir §.I.2.2). Les résultats qu'elle a pu fournir ne concernent que le cas précis et particulier d'une nappe plane sous l'impact d'une crue, laquelle crue a été difficilement simulée par la rotation d'une came ; et il ne faudra pas se faire trop d'illusions sur l'éventuelle extension des résultats par les moyens de l'analyse dimensionnelle. En effet, dans ce genre de problèmes on débouche très vite sur des similitudes - géométriquement et hydrauliquement - distordues. C'est ici que la simulation numérique prendra ses droits, par la souplesse d'adaptation qu'elle permet, les conditions aux limites pouvant être très variées (voir §.II.1.3). Il est à préciser que les conditions aux limites d'une nappe sont souvent mal connues, alors que leur rôle dans les phénomènes simulés peuvent être de première importance.

L'une des hypothèses qui mérite d'être discutée ici est précisément d'avoir supposé la permanence des caractéristiques hydrodynamiques, à travers des alluvions qui, comme chacun sait, sont constituées de stratifications hétérogènes. En effet, l'hypothèse d'une nappe alluviale plane, homogène, isotrope, limitée à l'amont par un front étanche et en aval par un niveau constant, nous a paru trop simpliste. Mais, notre démarche a été de chercher à isoler les différents phénomènes qui dans la nature, se manifestent simultanément (ces phénomènes intervenant dans le cycle de l'eau, sont quelquefois superposés - voire même masqués l'un par l'autre). S'intéressant à T et S, nous avons "fermé les yeux" sur les autres variables (mais sans les ignorer) et conditions aux limites et vice versa avec PL, GL et (P - ETP). C'est ainsi que nous avons procédé pour quatre séries de solutions en φ et Q (t) réalisées en quarante-trois simulations, nous avons pu alors déterminer successivement :

- le contraste extrême des diffusivités ballastièrre - alluvions à l'intérieur desquelles le modèle numérique PBDIR2 pouvait être utilisé, et nous avons effectivement atteint le contraste limite des diffusivités pour lesquelles PBDIR n'est plus valable (voir 5.111.4.61 ;

- la position optimale de la ballastière qui permettrait la vidange minimale; nous l'avons fait pour deux cas particuliers de nappes (particuliers, mais néanmoins assez fréquents) :

. 1er cas : ballastière en amont d'une nappe alluviale contiguë à une rivière (§.III.5.3.d)

. 2ème cas : ballastière encaissée dans un méandre (§.III.5.4.b)

- le comportement naturel d'une ballastière en amont des alluvions ; l'ensemble ballastière - alluvions a été soumis à l'année hydrologique 1975/76 qui a été particulièrement sèche en Lorraine. En effet, la prise en compte de P - ETP, excessivement déficitaire, a induit une circulation inversée rivière → nappe, rare en pays tempérés, mais bien fréquente en pays désertiques (voir §.II.2.2 et II.5.6.b).

Il est apparu clairement, en comparant les résultats (voir §.III.5.5) que le cas qui offre le meilleur coefficient de tarissement α est celui d'une ballastière creusée sur la moitié amont des alluvions contiguë latéralement à une rivière.

Dans la mesure où nous avons pu nous assurer de la sensibilité du modèle à transmettre intégralement les réponses aux impulsions provoquées, nous nous sommes alors arrangés de telle sorte que la question et la réponse se détachent nettement des autres paramètres et variables que l'on n'a pas négligés, mais que l'on a simplement maintenus constants. Evidemment, une telle démarche nous expose au risque qu'une série de solutions prises séparément en dehors de son contexte paraisse "simpliste" et dénuée de tout intérêt. Cependant, la dernière série de solutions va synthétiser simultanément le comportement de l'ensemble des paramètres et variables avec toutefois :

- l'inconvénient de ne permettre que des interprétations qualitatives sur les facteurs T, S, α , PL, GL que nous nous sommes proposés d'étudier quantitativement ;

- l'avantage de visualiser directement les réponses instantanées $\varphi_B(t)$ et les échanges réciproques instantanés $Q_A(t)$ respectivement aux impulsions simultanées P - EPT et HAUT (R).

Parmi les facteurs non pris en compte mais pouvant intervenir (voir conclusion du chapitre II), il faut ajouter ici que l'on a également supposé l'absence d'interactions entre l'eau et la roche et que seul le mouvement de l'eau en phase liquide a été considéré (voir hypothèses fondamentales §.I.3.1). Dans d'autres domaines, comme celui par exemple de la valorisation du minerai, ces hypothèses sont mieux appréciées et l'on n'ignore pas délibérément les mélanges de phases solide, liquide, gaz en présence.

Un autre problème - pas moins-important - et qui mérite donc d'être signalé ici, est celui de la difficulté d'obtenir des données hydrogéologiques, notamment les caractéristiques hydrodynamiques relatives à chaque stratification. C'est là une des raisons qui n'incitent pas les modélistes à étendre leurs équations phénoménologiques aux trois directions cartésiennes.

Au terme de ce travail, il nous reste l'intuition que celui-ci pourrait, dans un proche avenir, être appréhendé autrement et d'une manière radicale qui prendrait en compte valablement les équations de transfert dans la zone non saturée, depuis la surface du sol jusqu'à la nappe, et non comme nous l'avons fait globalement. C'est seulement à ce prix que l'on pourra mieux estimer un bilan hydrologique. Nous avons idée de l'existence de ces équations de transfert et les mathématiciens sont à même de les mettre au point. Une collaboration réelle avec les physiciens (= naturalistes) pourra les adapter aux problèmes considérés. Quant à l'acquisition des données, répétons le : "il n'existe aucun procédé générateur d'informations en dehors des procédés de mesures".