

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I

Le système aquifère. Caractérisation et échelles	7
---------------------------------------------------------------	----------

1.1 - Introduction..	7
1.2 - Le système aquifère : problème d'évaluation	7
1.3 - Concept de ressource en eau souterraine	9
1.3.1 - Définition	9
1.3.2 - La gestion des stocks souterrains	9
1.3.3 - Limite d'exploitation..	10
1.4 - Notion de bilan d'un aquifère..	10
1.5 - Estimation de l'alimentation régionale	12
1.5.1 - L'infiltration	12
1.5.2 - Caractéristiques hydrauliques et estimation de la recharge	13
1.5.3 - Approche de la méthode Glugla	16
1.6 - Intégration du système hydrogéologique dans un environnement de simulation	16
1.6.1 - Hétérogénéité des systèmes aquifères	18
1.6.2 - Echelle régionale..	19
1.6.3 - Echelle du travail	21
1.7 - Approche de la simulation hydrogéologique..	23
1.8 - Modèles et faisabilité technique	24
1.9 - Conclusions	32

Chapitre II

Description de la nappe des Grès du Trias Inférieur à Épinal.....	35
--------------------------------------------------------------------------	-----------

2.1 - Introduction..	35
2.2 - Cadre géologique	36
2.2.1 - Structure régionale	37
2.2.2 - Contexte stratigraphique	37
2.2.3 - Extension latérale des Grès du Trias Inférieur	39
2.3 - Hydrologie	40
2.3.1 - Répartition spatiale des précipitations	41
2.3.2 - Relation précipitations-écoulement	43
2.3.3 - Variation des débits moyens mensuels de la Moselle à Épinal	45
2.3.4 - Variation des débits moyens annuels de la Moselle à Épinal	46
2.3.5 - Evapotranspiration potentielle et réelle	49
2.4 - Hydrogéologie..	51
2.4.1 - Le réservoir	52
2.4.2 - Limites hydrogéologiques des Grès du Trias Inférieur (GTI)	52
2.4.3 - Extension et épaisseur de l'aquifère d'étude (affleurement des grès à Epinal)	53
2.4.4 - Alimentation de la nappe libre des grès à l'amont d'Épinal..	53
2.4.5 - Caractéristiques hydrodynamiques..	54
2.4.6 - Piézométrie	56
2.4.7 - Prélèvements	59
2.5 - Conclusion	59

Chapitre III

Simulation numérique par approche directe.....63

3.1 - Modélisation (représentation et identification).....	.63
3.2 - Modèles de comportements d'un aquifère.....	.64
3.3 - Identification du système aquifère.....	.65
3.4 - Equation de diffusivité (Laplace).....	.67
3.4.1 - Écoulement en nappe captive.....	.67
3.4.2 - Écoulement en nappe libre.....	.67
3.5 - Simulation numérique.....	68
3.5.1 - Approches mathématiques.....	.69
3.5.2 - Paramètres à prendre en compte lors de la modélisation de l'écoulement.....	.70
3.6 - Hypothèses du travail.....	71
3.6.1 - Hypothèses relatives à l'aquifère.....	.71
3.6.2 - Hypothèses relatives à la simulation.....	.72
3.6.3 - Présentation de l'aquifère et application.....	.72
3.6.4 - Description du modèle numérique.....	.73
3.7 - Simulation en régime permanent.....	.75
3.7.1 - Conditions aux limites.....	.75
3.7.2 - Épaisseur de la nappe.....	.76
3.7.3 - Paramètres hydrodynamiques.....	.76
3.7.4 - Prélèvements.....	76
3.7.5 - Maillage.....	77
3.7.6 - Résultats et discussion.....	.77
3.8 - Simulation en régime transitoire.....	.79
3.8.1 - Totalité de l'aquifère considéré comme captif.....	.79
3.8.1.1 - Période de simulation.....	.79
3.8.1.2 - Analyse et critique des conditions de simulation.....	.80
3.8.1.3 - Résultats et discussion.....	.83
3.8.2 - Application à la nappe libre des GTL.....	.88
3.8.2.1 - Représentation de la nappe.....	.88
3.8.2.2 - Résultats et discussion.....	.92
3.4 - Conclusion.....	96

Chapitre IV

Étude du problème inverse.....99

4.1 - Introduction.....	99
4.2 - Approche de la modélisation inverse.....	.99
4.2.1 - Position du problème inverse.....	101
4.2.2 - Résolution du problème inverse.....	102
4.2.3 - Méthode d'estimation.....	103
4.2.4 - Techniques d'optimisation.....	104
4.2.5 - Techniques de validation.....	105
4.3 - Généralités sur le modèle utilisé.....	106
4.3.1 - Approche de la modélisation inverse.....	106
4.3.2 - La paramétrisation.....	107
4.4 - Etude de sensibilité (application à un exemple théorique).....	108
4.4.2 - Résultat de l'estimation.....	111
4.5 - Application au domaine d'étude.....	115
4.5.1 - Faisabilité de l'estimation.....	115
4.5.2 - Résultat de l'estimation dans la nappe captive.....	118
4.5.2.1 - Estimation en régime permanent.....	118

4.5.2.2 - Estimation en régime transitoire.....	123
4.5.3 - Application à la nappe libre.....	129
4.5.4 - Résultat de calage.....	132
4.6 - Conclusion.....	140

CONCLUSION GÉNÉRALE.....141

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... 145

LISTE DES FIGURES.....157

LISTE DES TABLEAUX.....161

Le travail présenté dans ce mémoire a permis la mise au point d'une méthodologie originale afin d'améliorer la compréhension de l'hydrodynamique d'un aquifère gréseux (la nappe des GTI à l'amont d'Epinal) à l'échelle régionale. La qualité des simulations de l'écoulement dans un milieu poreux à grande échelle est étroitement liée à la connaissance de sa structure. A travers deux approches de modélisations complémentaires, nous avons essayé d'appréhender l'état de l'aquifère dans l'espace et dans le temps sous différentes hypothèses. L'objectif de cette étude est atteint, d'abord par des simulations directes, et ensuite, au moyen d'une procédure d'optimisation basée sur la méthode inverse.

Les simulations effectuées dans l'approche directe par le biais des différents scénarii et hypothèses, en régime permanent puis en transitoire, ont permis de mettre en évidence les points suivants :

- La méthodologie consistait à décomposer le domaine d'étude en deux sous domaines : la partie captive et la partie libre. La simulation de l'écoulement a concerné : (i) la partie captive uniquement, (ii) les deux parties considérées comme un aquifère captif et (iii) la zone d'intérêt, i.e. : la partie libre ;
- La piézométrie simulée dans la nappe libre est sensible aux incertitudes sur l'estimation des caractéristiques hydrodynamiques et dépend fortement du choix des conditions aux limites ;
- Les différentes caractéristiques de l'écoulement sont correctement reproduites : (i) rabattement du niveau de la nappe sur la période de simulation d'une moyenne de 0,5 m/an, (ii) sens de l'écoulement orienté Sud-Est/Nord-Ouest et (iii) drainage de la nappe par la Moselle contrairement à la Vologne qui l'alimente ;
- Le flux échangé entre la Moselle et l'aquifère d'étude varie entre 5 et 8 m³/s. Le gradient hydraulique varie entre 2.10^{-2} et 3.10^{-4} , et explique l'alimentation de la nappe captive par les affleurements ;
- Les différents résultats obtenus et leurs analyses montrent la présence d'une nappe continue à l'échelle régionale où la partie libre fonctionne hydrauliquement en réseau avec la partie avale captive ;
- Les résultats de simulations obtenus dans la nappe libre ont pu justifier la "validité" de la succession des étapes établies dans cette première approche.

La procédure inverse a permis d'apprécier les résultats obtenus par la paramétrisation multi-échelle, notamment sa souplesse remarquable d'utilisation. Même si les transmissivités estimées n'ont pas toujours été proches des transmissivités initiales de l'aquifère, la modélisation inverse semble être parfaitement applicable. A travers cette approche, on a pu relever les points suivants :

- Les forts contrastes des transmissivités estimées ont pu mettre en relief, les hétérogénéités du terrain et “l’impact probable” de l’utilisation d’un coefficient d’emmagasinement constant ;
- Une différence de la piézométrie à partir des transmissivités estimées, à la limite nappe libre/nappe captive, par rapport au niveau calculé par approche directe a été observée. Ceci est, certainement, dû à une sous-estimation des transmissivités au niveau de cette limite et aux conditions aux limites imposées en simulant uniquement la partie captive ;
- La différence entre la piézométrie simulée à partir des transmissivités estimées et celle simulée par approche directe dans la partie libre n’excède pas 1 m ;
- La paramétrisation multi-échelle a permis de reproduire correctement la distribution spatiale de la piézométrie et son évolution en discrétisant finement la nappe ;
- Les coefficients d’échange nappe-rivière nécessaires à un bon calage automatique des volumes échangés entre la nappe et la rivière varient entre 0,5 et 5 s⁻¹ pour la Moselle et de 1 à 7,8 s⁻¹ pour la Vologne ;
- Les valeurs les plus faibles de la fonction objectif et de ses gradients ont été obtenues avec le maillage multi-échelle le plus fin.

On peut considérer que le problème est, globalement, bien posé. La paramétrisation **multi-échelle** basée sur le principe de limiter un grand nombre de solutions au problème de minimisation a **permis** une bonne restitution de la piézométrie. L’information contenue dans les mesures est un apport incontournable dans la bonne identification des paramètres.

Les perspectives de ce travail sont variées, tant au niveau de mode de gestion de la ressource en eau dans cet aquifère, qu’au niveau des techniques de modélisation et leur applications.

En ce qui concerne la gestion de la ressource hydrique :

- La connaissance des paramètres hydrodynamiques devrait être approfondie à différents endroits par la réalisation d’essais de pompage de longue durée avec des piézomètres d’observation ;
- Il conviendrait d’envisager la réalisation d’investigations supplémentaires afin d’obtenir des informations nécessaires à une détermination fiable de la valeur de la recharge aussi bien spatialement que temporellement ;
- Il est **recommandé** d’implanter judicieusement des stations hydrométriques à l’amont de la Moselle et de la Vologne, à l’intersection de ces deux rivières, ainsi qu’à l’aval de la Moselle à Epinal. Cette structure peut fournir des données nécessaires à la bonne quantification des volumes échangés entre la nappe et les rivières ;
- La réalisation de campagnes piézométriques avec un suivi régulier des hauteurs piézométriques et des prélèvements avec la création d’une base de données pour archiver ces informations sont d’une importante utilité.

En ce qui concerne la modélisation : l'état actuel des modèles utilisés dans ce travail, aussi bien dans l'approche directe que dans le problème inverse, bien que jugés satisfaisants, peut être considéré encore incomplet et imprécis localement. Leur amélioration nous semble fortement intéressante afin d'obtenir des éléments de réponse aux questions que l'on se pose quant à la description spatio-temporelle de l'écoulement :

- En raison de l'hétérogénéité de l'aquifère, une modélisation tridimensionnelle par approche directe pourrait s'avérer pertinente afin de mettre en relief la variabilité verticale des paramètres hydrodynamiques ;
- Une simulation à l'aide d'un modèle multi-couche représentant les grès vosgiens et les autres séries du grès de l'ensemble des GTI peut être envisageable, si l'on dispose d'assez de données ;
- Afin d'apprécier la pertinence de la paramétrisation multi-échelle, une amélioration de cette technique pour l'identification d'autres paramètres plus complexes tels que la hauteur libre d'eau dans la rivière, les conditions aux limites type Neuman et la recharge s'avère d'une grande importance ;
- Une modélisation inverse 3D peut, éventuellement, être incontournable dans la mesure où elle permettra de comprendre les perturbations induites sur la piézométrie par les ouvrages souterrains.

,

Afin d'étudier le comportement hydrodynamique d'un aquifère gréseux hétérogène, une méthodologie originale a été élaborée. La démarche traite à la fois les écoulements superficiels et plus amplement les écoulements souterrains. L'étude est développée sur la nappe libre des Grès du Trias Inférieur (GTI) à l'amont d'Épinal (Nord-Est de la France). Une description des caractéristiques structurales de l'aquifère d'étude est présentée. Des processus qui interviennent directement ou indirectement, et à des degrés divers, dans l'hydrologie du bassin de la Moselle sont évoqués. Une modélisation du type milieux poreux équivalent à grande échelle a été retenue pour représenter l'aquifère à l'échelle régionale. Différents scénarii ont été testés pour simuler l'hydrodynamique de cet aquifère par approche directe. Cette zone dispose de données très rares. Afin de résoudre ce problème, la contrainte d'étendre le domaine en aval d'Épinal où la nappe devient captive est nécessaire. Dans cette dernière partie, il existe des données "abondantes" grâce aux études hydrogéologiques antérieures. Plusieurs hypothèses sont envisagées en fonction de la nature du régime de l'écoulement et de la disponibilité des données requises pour la modélisation. L'importance du choix des conditions aux limites, la variabilité spatiale et temporelle des écoulements, les limites de l'aquifère et la variation des échanges nappe-rivière sur les résultats sont évoqués. L'étude du problème inverse est basée sur un modèle d'écoulement utilisant une paramétrisation multi-échelle appliquée aux transmissivités et aux conditions aux limites. Cette technique a permis d'estimer les transmissivités à partir des charges mesurées. Différentes combinaisons ont été testées pour identifier le maillage le plus approprié et l'influence des données utilisées. L'analyse de la piézométrie et son évolution ont permis de "valider" la pertinence de cette procédure pour une simulation fine et correcte de l'écoulement.

To study the hydrodynamic behavior of an heterogeneous sandstone aquifer, an original methodology was elaborated. This step treats at the same time superficial flows and particularly underground flows. The study is developed on the unconfined Lower Triassic Sandstone aquifer (GTI) than the upstream of Épinal (Northeast of France). This aquifer forms part of the catchment area of the Moselle in which the hydric and hydrological phenomena are complex. A description of the structural characteristics of aquifer studied is presented. Processes which occur directly or indirectly in the basin of Moselle hydrology are evoked. The equivalent porous medium modelisation on a large scale, was retained to represent the aquifer on a regional scale. Different scenarios are tested to simulate the hydrodynamic of this aquifer by direct approach. However, data concerning this formation are rare. In order to solve this problem, the obligation to extend the field downstream from Épinal where the aquifer becomes confined is necessary. In this last part, a lot of data due to the various previous hydrogeologic studies exist. Several hypothesis are considered according to groundwater flow state (steady or non-steady) and the data availability for modeling. The importance of the boundary-conditions choice, the space and temporal variability of the flows, the limits of the aquifer and the variation of the aquifer-river leakage on results are evoked. Inverse modelling is based on a flow model using a downscaling approach applied to the transmissivities and boundary conditions. This technique allows to estimate the transmissivities starting from the measured piezometric heads. Various combinations were tested to identify the most suitable mesh and the influence of the used data. The analysis of piezometry and its change allowed "to validate" the pertinence of this procedure for a fine and correct flow simulation.