

	Pages
MÉTHODOLOGIE	
DES MODÈLES DE SIMULATION	
EN HYDROGÉOLOGIE	
INTRODUCTION.....	1
Première partie.....	5
I - HISTORIQUE.....	7
1 - Notions de modèle, de système - Terminologie.....	7
2 - Méthode du modèle et méthode expérimentale.....	9
2.1 - Principe de la méthode du modèle-comparaison avec la méthode expérimentale.....	9
2.2 - Caractéristiques de la méthode du modèle.....	10
2.3 - Limitations de la méthode du modèle.....	12
3 - Les étapes de l'élaboration d'un modèle.....	13
3.1 - Caractérisation.....	13
3.1.1 - Définition.....	13
3.1.2 - Principes de description et de classification des systèmes.....	13
3.1.3 - Divers types de modèles.....	18
3.1.4 - Résultats de la caractérisation.....	23
3.2 - Identification..... par	23
3.2.1 - Définitions - Généralités.....	23
3.2.2 - La méthode de M. BONNET	24
3.2.3 - La méthode inverse.....	24
3.3 - Vérification.....	25
3.4 - Exploitation.....	27
4 - Qualités d'un modèle.....	27
4.1 - Généralités - Distance objet-modèle.....	27
4.2 - Conformité ou représentativité.....	28
4.3 - Spécificité - Généralité - Précision.....	29
4.4 - Sensibilité.....	30
5 - Conclusions - Avantages et difficultés de la méthode du modèle.....	30
II - LA METHODE DU MODELE EN HYDROGEOLOGIE.....	32
1 - Pourquoi des modèles en hydrogéologie.....	32
2 - Ce qui est modélisable en hydrogéologie. Prépondérance des modèles d'écoulement.....	33
2.1 - Place des modèles hydrogéologiques parmi les modèles hydrologiques. Historique. Situation actuelle.....	33
2.2 - Bases théoriques des modèles d'écoulement.....	38
2.2.1 - Définitions - Principes généraux.....	38
2.2.2 - Les lois de base.....	40
2.2.3 - Construction de l'équation du mouvement.....	44
2.2.4 - Hypothèses simplificatrices. Diverses formes.....	45
2.2.5 - Types de modèles.....	51
2.2.6 - Conclusions. Détermination du modèle conceptuel représentatif d'un écoulement réel.....	54

Série Documents n° 34 — 1982

Thèse Doctorat d'État en Sciences

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE — NANCY, 1978

Spécialité : géologie appliquée (hydrogéologie)



SOMMAIRE

	Pages
INTRODUCTION.....	1
<u>Première partie</u> : METHODOLOGIE.....	5
I - HISTORIQUE - PRINCIPES GENERAUX - VOCABULAIRE.....	7
1 - Notions de modèle, de système - Terminologie.....	7
2 - Méthode du modèle et méthode expérimentale.....	9
2.1 - Principe de la méthode du modèle-comparaison avec la méthode expérimentale.....	9
2.2 - Caractéristiques de la méthode du modèle.....	10
2.3 - Limitations de la méthode du modèle.....	12
3 - Les étapes de l'élaboration d'un modèle.....	13
3.1 - Caractérisation.....	13
3.1.1 - Définition.....	13
3.1.2 - Principes de description et de classification des systèmes.....	13
3.1.3 - Divers types de modèles.....	18
3.1.4 - Résultats de la caractérisation.....	23
3.2 - Identification.....	23
3.2.1 - Définitions - Généralités.....	23
3.2.2 - La méthode directe.....	24
3.2.3 - La méthode inverse.....	24
3.3 - Vérification.....	25
3.4 - Exploitation	27
4 - Qualités d'un modèle.....	27
4.1 - Généralités - Distance objet-modèle.....	27
4.2 - Conformité ou représentativité.....	28
4.3 - Spécificité - Généralité - Précision.....	29
4.4 - Sensibilité.....	30
5 - Conclusions - Avantages et difficultés de la méthode du modèle.....	30
II - LA METHODE DU MODELE EN HYDROGEOLOGIE.....	32
1 - Pourquoi des modèles en hydrogéologie.....	32
2 - Ce qui est modélisable en hydrogéologie. Prépondérance des modèles d'écoulement.....	33
2.1 - Place des modèles hydrogéologiques parmi les modèles hydrologiques. Historique. Situation actuelle.....	33
2.2 - Bases théoriques des modèles d'écoulement.....	38
2.2.1 - Définitions - Principes généraux.....	38
2.2.2 - Les lois physiques élémentaires.....	40
2.2.3 - Construction de l'équation du mouvement.....	44
2.2.4 - Hypothèses simplificatrices. Diverses formes de l'équation fondamentale.....	45
2.2.5 - Théorèmes principaux relatifs aux modèles d'écoulement en milieu poreux.....	51
2.2.6 - Conclusions. Détermination du modèle conceptuel représentatif d'un écoulement réel.....	54

2.3 - Principaux types d'écoulement.....	54
2.3.1 - Ecoulements monophasiques captifs.....	55
2.3.2 - Ecoulements à interface : surface libre, biseau salé.....	56
2.3.3 - Ecoulements polyphasiques de fluides immiscibles.....	59
2.3.4 - Ecoulements de fluides miscibles.....	62
2.3.5 - Autres phénomènes couplés à l'écoulement en masse de l'eau.....	65
2.3.6 - Le problème du choix du bon modèle conceptuel..	70
2.4 - Principaux types de "système".....	73
2.4.1 - Généralités - Principes de classification.....	73
2.4.2 - Systèmes homogènes (modèles analytiques).....	76
2.4.3 - Systèmes hétérogènes bidimensionnels (nappes)..	77
2.4.4 - Systèmes multicouches.....	79
2.4.5 - Systèmes tridimensionnels.....	81
2.4.6 - Proposition d'une classification des systèmes hydrogéologiques naturels.....	81
3 - Les outils disponibles pour une modélisation pratique : les principaux types de modèles (opérationnels).....	83
3.1 - Position du problème.....	83
3.2 - Les modèles analytiques.....	83
3.3 - Les modèles analogiques.....	84
3.4 - Les modèles numériques.....	87
3.5 - Comparaison entre modèles opérationnels (analogiques et mathématiques).....	90
4 - Principales qualités des modèles de nappe. Présentation d'une chaîne de modèles numériques.....	91
4.1 - Généralités.....	91
4.2 - Le problème de la construction de modèles numériques optimaux.....	92
5 - Conclusions. Objectifs et conditions d'emploi des modèles en hydrogéologie.....	93
5.1 - Emploi des modèles pour identification des paramètres..	94
5.2 - Emploi des modèles pour la compréhension des phénomènes	94
5.3 - Emploi des modèles pour la représentation de systèmes (hydrogéologiques réels).....	95
III - LES ETAPES DE LA METHODE DU MODELE, APPLIQUEE AUX NAPPES...	97
1 - Principes généraux de la méthodologie proposée.....	97
2 - Conception et construction du modèle : caractérisation.....	98
2.1 - Généralités.....	98
2.2 - L'analyse des données naturelles.....	99
2.2.1 - Structure de la nappe.....	99
2.2.2 - Typologie de l'écoulement et du système.....	101
2.2.3 - Paramètres structuraux.....	103
2.2.4 - Conditions aux limites des systèmes.....	105
2.2.5 - Conditions internes - singularités.....	109
2.2.6 - Les lignes de changement de nature d'écoulement	110
2.2.7 - Analyse des comportements - Régimes d'écoulement - Définition des références.....	111
2.3 - Résultats de la caractérisation - Le choix du (ou des) modèle (s).....	113
2.3.1 - Choix d'une stratégie de modélisation.....	113
2.3.2 - Choix des caractéristiques du (ou des) modèle (s).....	114

3 - Identification (ou calage) et vérification (de la représentativité).....	116
3.1 - Généralités - Considérations théoriques.....	116
3.1.1 - Le problème inverse selon la théorie des équations aux dérivées partielles.....	117
3.1.2 - Le problème inverse par les théories d'optimisation.....	121
3.2 - Propositions pour une stratégie d'identification.....	122
3.3 - Règles pratiques d'identification.....	123
3.3.1 - Tests de cohérence.....	123
3.3.2 - Identification des paramètres.....	124
3.3.3 - Vérification.....	126
4 - Exploitation des modèles calés.....	127
4.1 - Généralités.....	127
4.2 - Principaux problèmes d'exploitation - Réflexions sur la notion de "ressources".....	131
4.2.1 - Généralités.....	131
4.2.2 - Traitement par modèles du problème d'exploitation optimale des ressources en eau souterraine.....	131
5 - Conclusions - Rappel des caractéristiques fondamentales de la méthode du modèle appliquée aux nappes.....	135

Deuxième partie : UN EXEMPLE D'APPLICATION DE LA METHODE DU MODELE : L'AMENAGEMENT DU BASSIN HYDROGEOLOGIQUE DU BAS LOUKKOS (MAROC)..... 137

I - CONTEXTE GENERAL	139
1 - Situation géographique et conditions naturelles.....	139
2 - Projet d'aménagement - Conduite des études.....	139
3 - Conclusion.....	141
II - ANALYSE DES DONNEES - CARACTERISATION.....	144
1 - Historique sommaire des études et travaux de reconnaissance..	144
2 - Présentation synthétique des connaissances hydrogéologiques - Nouvelle conception de la cartographie hydrogéologique.....	144
3 - Analyse des données - (caractérisation s.s.).....	148
3.1 - Structure de l'aquifère - Géométrie du réservoir.....	148
3.2 - Typologie de "l'écoulement" et du "système".....	152
3.4 - Limites - Conditions aux limites.....	152
3.5 - Conditions internes.....	153
3.5.1 - Conditions de débits par zones.....	154
3.5.2 - Conditions de niveau liées à la piézométrie : drainage par les oueds "indigènes".....	156
3.5.3 - Conditions ponctuelles : prélèvements.....	157
3.5.4 - Lignes de crête - bassins hydrogéologiques.....	158
3.5.5 - Autres singularités : biseau salé.....	158
3.6 - Analyse des comportements observés : piézométrie, hydrométrie - Définition des "références".....	159
3.7 - Problèmes posés par les aménagements prévus.....	163

4 - Résultats de la caractérisation - Description des modèles mis en oeuvre.....	164
4.1 - Choix d'une stratégie de modélisation.....	165
4.2 - Choix des caractéristiques des modèles.....	166
4.2.1 - <i>Forme</i>	166
4.2.2 - <i>Maillage et précision</i>	166
4.2.3 - <i>Conditions imposées</i>	168
4.2.4 - <i>Paramètres</i>	168
III - CALAGE DES MODELES.....	169
1 - Cas des bassins du Dradère et du Soueïre.....	169
1.1 - Position du problème.....	169
1.2 - Démarche détaillée de calage.....	171
1.3 - Résultats.....	175
2 - Cas du R'Mel de Larache.....	180
2.1 - Position du problème.....	180
2.2 - Démarche détaillée.....	181
2.3 - Résultats.....	181
IV - EXPLOITATION DES MODELES.....	188
1 - Rappel des problèmes posés - Définition des réponses à apporter.....	188
2 - Exploitation des modèles du Dradère-Soueïre.....	188
2.1 - Adaptation des modèles.....	188
2.2 - Calcul des implantations.....	188
2.2.1 - Rappel de la méthode et des données du problème	188
2.2.2 - Application au Dradère-Soueïre.....	188
2.3 - Définition du dispositif de captage par simulation sur modèle.....	188
2.3.1 - Pour le Dradère.....	188
2.3.2 - Pour le secteur Soueïre.....	188
2.4 - Etudes des risques de défaillance.....	188
2.4.1 - Position du problème.....	188
2.4.2 - Données de base.....	188
2.4.3 - Hypothèses complémentaires - Démarche d'étude..	188
2.4.4 - Résultats pour le bassin du Dradère.....	188
2.4.5 - Résultats pour le bassin de Soueïre.....	188
2.4.6 - Conclusions générales.....	188
3 - Exploitation du modèle de R'Mel de Larache.....	208
3.1 - Reprise du calage.....	208
3.1.1 - Analyse des données complémentaires recueillies	208
3.1.2 - Objectifs et démarche de la reprise du calage..	208
3.1.3 - Résultats.....	208
3.2 - Détermination de l'exploitation optimale de la nappe...	204
3.2.1 - Position du problème.....	204
3.2.2 - Définition des données de base du schéma d'aménagement.....	204
3.2.3 - Démarche mise en oeuvre pour déterminer le dispositif optimal.....	207
3.2.4 - Résultats.....	208
3.3 - Conclusion sur l'exploitation de la nappe du R'Mel.....	208
V - CONCLUSIONS METHODOLOGIQUES TIREES DE L'EXEMPLE DES ETUDES D'AMENAGEMENT DU BASSIN DU BAS LOUKKOS.....	241

CONCLUSIONS GENERALES.....	243
BIBLIOGRAPHIE.....	247
ANNEXE I - RAPPELS DE PHYSIQUE : PRESENTATION DES PRINCIPALES EQUATIONS DE TRANSFERT EN MILIEU POREUX.....	
277	277
Première partie : Notions et bases théoriques fondamentales.....	281
Deuxième partie : Principales équations aux dérivés partielles du mouvement de l'eau en milieu poreux.....	325
ANNEXE II - RAPPELS SUR LA RESOLUTION NUMERIQUE DES EQUATIONS DE L'ECOULEMENT PAR LA METHODE DES DIFFERENCES FINIES - Constitution d'une chaîne de modèles opérationnels...	
357	357
I - Principe de base.....	388
II - Présentation d'une chaîne de modèles pour la simulation des "nappes" : Sirena.....	404
III - Principes pour l'établissement d'une bibliothèque de modèles	436

LISTE DES FIGURES

	Pages
1 - Schéma fonctionnel de la méthode du modèle	10
2 - Enchaînement des principales étapes de la méthode du modèle appliquée aux systèmes hydrogéologiques	14
3 - Relations entre un système et son environnement - Décomposition en sous-systèmes	16
4 - Principales causes du bruit dans la réponse d'un système	20
5 - Représentation dans l'espace des paramètres. Conformité	26
6 - Décomposition du cycle hydrologique en ses principaux systèmes	34
7 - Principaux modèles utilisés pour l'analyse des systèmes hydrologiques	26
8 - Principales échelles (ou systèmes élémentaires) pour l'étude phénoménologique des transferts en milieu poreux	39
9 - Conditions d'application des lois élémentaires et de l'équation du mouvement. Principaux paramètres et notations	42
10 - Schéma des conditions d'écoulement en couche stratiforme	46

11 - Condition de Dupuit et Boussinesq-Forchheimer. Définition conditions d'application	48
12 - Définition hydrodynamique d'un système hydrogéologique : conditions d'application du théorème d'unicité	53
13 - Schématisation d'un écoulement à interface	56
14 - Assimilation de la surface libre à une interface	57
15 - Schéma d'un biseau salé à interface nette	58
16 - Equilibre des phases dans un système polyphasique	59
17 - Schéma d'un écoulement miscible	62
18 - Représentation schématique du tenseur de dispersion	64
19 - Notions principales et conditions d'application pour un modèle hydro-élastique	69
20 - Comportements d'un système soumis à excitation instantanée. Notion de pseudopermanent	75
21 - Conditions d'assimilation d'un système réel à un monocouche	78
22 - Principales occurrences hydrogéologiques d'écoulements tri-dimensionnels	82
23 - Signification et définition de la notion de transmissivité en fonction des conditions d'écoulement et de milieu	104
24 - Classification et modes de représentation cartographique des limites des systèmes aquifères	108
25 - Définition du régime d'écoulement à partir de l'analyse des variations piézométriques mesurées	112
26 - Choix du maillage en fonction de l'incertitude sur les données et de l'erreur de discrétisation	115
27 - Méthode inverse : conditions de cohérence entre variables, paramètres et conditions aux limites	118
28 - Comportement piézométrique caractéristique d'une nappe libre en climat tempéré	124
29 - Un exemple de vérification de la représentativité d'un modèle (cas de la nappe des Triffas)	128
30 - Organigramme schématique de l'évaluation du bilan et des ressources par la méthode du modèle	130
31 - Principales contraintes à l'exploitation d'un système hydrogéologique	134
32 - Carte de situation de la zone étudiée	140
33 - Schéma de l'aménagement hydroagricole du Bas Loukkos	142
34 - Sources du Bas-Dradère	145

35 - Exemple des études d'aménagement du Bas Loukkos	149
a - Bassin de Larache (modèle R'Mel)	
b - Bassin de Larache (modèle Soueïre-Dradère)	
36 - Excédents annuels à la station de Larache	154
37 - Variations piézométriques - variations de l'alimentation	160
38 - Modèle d'ensemble de la nappe du Dradère - Représentation de l'état actuel	176
39 - Modèle Dradère Sud - Représentation de l'état actuel	177
40 - Modèle Soueïre - Représentation de l'état actuel	178
41 - Modèle R'Mel de Larache. Premier calage	184
42 - Modèle Dradère Sud - Simulation de l'exploitation projetée	188
43 - Modèle Soueïre - Simulation de l'exploitation projetée	188
44 - Modèle du Dradère Sud - Prévision de l'état du biseau dans diverses conditions d'alimentation	196
45 - Variations du débit drainé par l'oued Dradère (rive droite)	205
46 - Modèle du R'Mel de Larache. Résultats du calage après campagne de mesure 1974	225
47 - Aménagement du R'Mel de Larache - Détermination du régime optimal de captage. 1ère option, configuration maximale	229
48 - Aménagement du R'Mel de Larache - Détermination du régime optimal de captage. 1ère option, configuration réduite	233
49 - Aménagement du R'Mel de Larache - Détermination du régime optimal de captage, 2ème option	236
50 - Aménagement du R'Mel de Larache - Détermination du régime optimal de captage, 3ème option	239

LISTE DES TABLEAUX

	Pages
I - Principales échelles (ou systèmes élémentaires) pour l'étude phénoménologique des transferts en milieu poreux	39
II - Correspondance entre terminologie de la théorie du modèle et terminologie mathématique	53
III - Rappel des principaux modèles proposés pour la représentation des écoulements en "nappe libre"	72
IV - Equivalence entre modèles conceptuels (lois) variables et paramètres pour les phénomènes de transport d'électricité en milieu conducteur et les phénomènes de transfert d'eau en milieu poreux saturé.	86

V - Matrice d'utilisation des données pour la caractérisation et la construction d'un modèle	100
VI - Questionnaire et code réponse pour l'établissement d'une typologie écoulement-système	102
VII - Choix de la technique de prévision en fonction du régime d'écoulement	132
VIII - Inventaire des sources du Bas Dradère	145
IX - Forages des bassins du Dradère et du Soueïre soumis à un essai de débit	146
X - Résultats des jaugeages sur les principales stations de la plaine du R'Mel	162
XI - Récapitulation des modèles réalisés	167
XII - Calage du modèle Dradère total (maille 1 000 m)	172
XIII - Calage du modèle Dradère Sud (maille 500 m)	173
XIV - Calage du modèle Soueïre (maille 500 m)	174
XV - Résultats de l'optimisation d'exploitation (secteur Dradère)	190
XVI - Résultats de l'optimisation d'exploitation (secteur Soueïre)	192
XVII - Aménagement hydroagricole du Bassin du Bas Loukkos - Dispositifs d'exploitation retenus : secteur Dradère	194
XVIII - Aménagement hydroagricole du Bassin du Bas Loukkos - Dispositifs d'exploitation retenus : secteur Soueïre	194
XIX - A - Excédents mensuels à la station de Larache	199
B - Excédents de 3 années hydrologiques	201
C - Classement des excédents pour des séquences de 3 années hydrologiques	202
XX - Rabattements maximaux relevés pour les trois périodes (fréquences 1/2, 1/10, 1/35) (secteur Dradère)	206
XXI - Evolution mensuelle des rabattements aux puits pour la dernière année de la période de fréquence 1/10 (secteur Dradère)	207
XXII - Evolution mensuelle des rabattements aux puits pour la dernière année de la période 1/2 (secteur Dradère)	209
XXIII - Rabattements maximaux relevés pour les trois périodes (fréquences 1/2, 1/10, 1/35) (secteur Soueïre)	213
XXIV - Evolution mensuelle des rabattements pour la dernière année de la période de fréquence 1/2 (secteur Soueïre)	214
XXV - Evolution mensuelle des rabattements pour la dernière année de la période de fréquence 1/10 (secteur Soueïre)	216

XXVI - Variations de débits du Soueire (en l/s)	218
XXVII - Aménagement de la plaine du R'Mel - Résultats des calculs d'optimisation par programmation linéaire, 1ère option	231
XXVIII - Aménagement de la plaine du R'Mel - Optimisation des dispositifs par programmation linéaire, 1ère option	234
XXIX - Aménagement de la plaine du R'Mel - Optimisation des dispositifs par programmation linéaire, 2ème option	237
XXX - Aménagement de la plaine du R'Mel - Optimisation des dispositifs de captage par programmation linéaire, 3ème option	240

INTRODUCTION