

LA GESTION ACTIVE DES AQUIFÈRES

Michel Detay



21656/1

MASSON



GL75

La gestion active des aquifères

Michel DETAY

Docteur ès sciences,
responsable du programme de recherche
appliqué à la gestion des ressources en eau,
Lyonnaise des Eaux

21656 $\frac{1}{2}$



21656/1

MASSON 

Paris Milan Barcelone

Table des matières

CONTENTS	XI
AVANT-PROPOS	XIII
I – NOTIONS D’HYDROGÉOLOGIE	1
1.1 L’histoire de l’eau	1
1.1.1 L’eau en tant que mythe	2
1.1.2 Les étapes de la domestication de l’eau	4
1.1.3 L’histoire de l’hydrogéologie	7
1.1.4 L’eau dans le cosmos	11
1.1.5 Origine de la vie dans l’eau et Histoire naturelle	15
a) Évolution et enseignements	16
b) La contingence	16
c) Les extinctions de masse	17
d) Rembobinez — redéroulez	18
e) Iconographie et regard sur le monde	19
f) Hasard et déterminisme	19
1.2 Le cycle de l’eau	20
1.2.1 Mécanismes et bilans des échanges thermiques	22
1.2.2 L’évapotranspiration	24
a) Variabilité de l’évapotranspiration	24
b) La mesure de l’évapotranspiration	25
1.3 L’alimentation naturelle des aquifères	27
1.3.1 Alimentation à partir d’un cours d’eau	27
1.3.2 Alimentation par infiltration des eaux de pluie	28
1.4 Les caractéristiques des aquifères	33
1.5 Définition des paramètres hydrogéologiques	36
1.5.1 Porosité	38
1.5.2 Perméabilité	39
1.5.3 Paramètres hydrodynamiques	41
a) Transmissivité	41
b) Coefficients d’emmagasinement et de remplissage	42
c) Diffusivité	43
d) Gradient hydraulique	44
e) Vitesse d’écoulement	45
1.6 Conditions aux limites	46
1.7 Bilan d’un aquifère	47
1.7.1 Définition des éléments du bilan	48
a) Bilan de flux	49
b) Bilan de matière	50
c) Mesure de l’infiltration	51
1.7.2 Notions de réserve et de ressource en eau	53
a) Réserve	54
b) Ressource	56

1.7.3 Surexploitation d'une nappe	57
1.7.4 Exploitation régulatrice d'une nappe	58
1.7.5 Aspects quantitatifs et qualitatifs de la ressource en eau	59
1.8 Études préalables à l'exploitation d'un aquifère	60
1.9 Caractéristiques physico-chimiques des eaux	61
1.9.1 Les eaux souterraines	62
1.9.2 Les eaux de surface	63
1.10 Conclusion	64
II – LA GESTION ACTIVE DES AQUIFÈRES	
2.1 Action quantitative	67
2.1.1 Importance de la mesure	68
2.1.2 L'irrigation	69
2.1.3 Restauration de l'équilibre d'une nappe	69
2.1.4 Accroissement de la ressource et stockage	70
2.1.5 Protection de l'environnement	70
2.1.6 Régulation du débit des rivières	73
2.1.7 Barrages de réalimentation et d'infero-flux	74
2.1.8 Stockage karstique	74
2.1.9 Le captage des sources littorales sous-marine	77
2.1.10 La fracturation hydraulique	78
2.2 Action qualitative	78
2.2.1 La dénitrification in situ provoquée	79
a) La méthode des couplets de puits	79
b) La méthode « Daisy »	80
c) Nitreddox	81
d) Méthode mixte	82
e) Conclusion sur ces méthodes	83
2.2.2 Déferrisation et démanaganisation in situ provoquée	84
2.2.3 Élimination des eaux usées	89
a) Infiltration des eaux pluviales	89
b) Epuration des eaux usées	90
c) Injection d'eaux chaudes	91
2.2.4 Stockage d'énergie thermique	93
2.2.5 Dépollution d'un aquifère	94
2.3 Aspect opérationnels	96
2.3.1 Lutte contre la subsidence	96
2.3.2 Infiltration d'eau provenant de la fonte des neiges	98
2.3.3 Les techniques de réhabilitation de sites	99
2.3.4 ASR - un nouvel outil de gestion active d'aquifère	100
2.3.5 Le concept de gestion rationnelle d'un réservoir souterrain	103
2.3.6 Virus et micro-organismes dans les hydrosystèmes	104
2.3.7 Giardia et Cryptosporidium	108
2.3.8 La gestion des zones humides	110
2.4 Approche économique des diverses méthodes de gestion	111
2.4.1 Comparaison stockage souterrain-stockage superficiel	111
2.4.2 Comparaison avec une unité de traitement des eaux superficielles	113
2.4.3 Comparaison avec une adduction d'eau	114
2.5 Rentabilité d'une alimentation artificielle	115
2.5.1 Coût de l'investissement et de l'entretien	115
a) Acquisition des terrains	115
b) Coût des travaux de réalisation	115
c) Fonctionnement et entretien	116
d) Coût global d'une opération d'alimentation artificielle	119

e) Coûts comparés de la recharge par bassins et par fossés d'infiltration	122
2.5.2 Revenus apportés par une alimentation artificielle	122
2.5.3 Optimisation d'une opération de recharge	124
a) Dispositifs d'injection	126
b) Dispositifs d'infiltration	129
c) Optimisation d'une opération d'injection-pompage pour dépolluer un aquifère	130
2.5.4 Exemples de coûts pour diverses réalisations	131
a) Aménagement de Bâle (Suisse)	131
b) Région de Los Angeles	132
c) Grand Prairie (Arkansas)	132
d) Aménagements en Haute-Garonne	132
e) Le coût de la recharge avec des eaux résiduaires	132
2.6 Conclusion	136
III – INTERFACES ET RÉACTEURS	139
3.1 Le réacteur sol-zone non saturée-nappe	139
3.1.1 Paramètres de l'autoépuration naturelle des sols	140
a) paramètres physiques	140
b) paramètres chimiques	141
c) paramètres biologiques	143
d) paramètres hydrodynamiques et hydrocinématiques	143
3.1.2 Évaluation du pouvoir épurateur des sols	147
3.1.3 La filtration dans le sol et l'aquifère	150
3.1.4 Rétention des germes pathogènes	157
3.1.5 Élimination de la matière organique	159
3.1.6 Réactions aérobies et anaérobies	160
3.1.7 Rétention de l'Azote et du phosphore	162
3.1.8 Rétention des micropolluants organiques	163
a) L'adsorption	164
b) la volatilisation	164
c) La dégradation	164
3.1.9 Rétention des éléments à l'état de traces	166
a) Arsenic	167
b) Cadmium et zinc	167
c) Cuivre et chrome	168
d) Plomb et mercure	168
e) Bore et fluor	168
f) Le mercure	168
g) Le cas des éléments radioactifs	169
3.1.10 Variation du taux de sels dissous	171
3.1.11 Paramètres organoleptiques	172
3.1.12 Les pesticides	174
3.1.13 Conclusion	176
3.2 Le réacteur rivière-nappe ou l'effet de berge	181
3.2.1 Principe de la réalimentation induite	183
3.2.2 Processus impliqués dans la réalimentation induite	184
a) Les phénomènes physico-chimiques affectant le transport des solutés	185
b) Les processus liés à l'activité biologique	186
3.2.3 Les résultats bibliographiques	186
a) Les expériences suisses	188
b) Les expériences néerlandaises et allemandes	190
c) Les expériences en Hongrie	191
d) Les expériences en France	191
3.2.4 Les processus d'épuration lors des transferts rivière-nappe	191
3.2.5 L'exemple de la Seine à Rangiport	194

a) Caractéristiques hydrologiques.....	195
b) Caractérisation de la source Seine.....	195
c) Caractérisation du champ lointain d'infiltration.....	196
d) Caractérisation des sédiments superficiels.....	199
e) Conclusion.....	202
3.2.6 La filtration par les berges dans l'île du Grand Gravier.....	203
3.2.7 Conclusion.....	204
3.3 Les réacteurs en série - exemple du site de Flins-Aubergenville.....	206
3.3.1 Problématique.....	206
3.3.2 Méthode de travail.....	207
3.3.3 Résultats.....	219
3.3.4 Conclusion.....	226
3.4 Les réacteurs « artificiels ».....	226
3.4.1 Dégrossissage.....	227
3.4.2 Décantation-sédimentation.....	227
3.4.3 Flottation.....	228
3.4.4 Filtration.....	228
3.4.5 Coagulation-Floculation.....	230
3.4.6 Précipitations chimiques.....	233
a) La décarbonatation.....	233
b) La déferrisation et la démanganisation.....	233
3.4.7 Déminéralisation.....	234
3.4.8 Adsorption.....	234
3.4.9 Désinfection.....	235
a) Chloration.....	236
b) Ozonation.....	236
3.4.10 Traitement biologique.....	238
3.4.11 Élimination de l'azote.....	238
3.4.12 Élimination des Phosphates.....	240
3.4.13 Élimination de la matière organique.....	241
a) Adsorption sur charbon actif.....	241
b) Autres traitements.....	241
3.4.14 Élimination des métaux lourds.....	242
3.4.15 Autres paramètres.....	244
3.5 Conclusion.....	244
IV – LA RÉALIMENTATION ARTIFICIELLE DES AQUIFÈRES.....	247
4.1 Conditions de la réalimentation artificielle.....	248
4.1.1 Paramètres hydrologiques.....	248
4.1.2 Paramètres hydrogéologiques.....	249
4.2 Les différents types de recharge.....	250
4.2.1 La RAN en Europe.....	251
4.2.1 Recharge artificielle par injection directe.....	256
a) Avantages et inconvénients.....	256
b) Résultats antérieurs.....	257
4.2.2 Recharge artificielle par bassins d'infiltration.....	259
a) Avantages et inconvénients.....	259
b) Résultats antérieurs.....	259
c) Les différents types de bassins d'infiltration.....	262
d) Influence des caractéristiques d'un bassin sur l'infiltration.....	264
4.2.3 Alimentation artificielle induite.....	268
4.2.4 Les autres dispositifs d'alimentation artificielle.....	270
a) Inondation et irrigation.....	270
b) Canaux de dérivation.....	270
c) Aménagements de cours d'eau.....	271

d) Puits filtrants et fosses.....	271
e) Méthodes mixtes.....	272
f) Récupération des eaux météoriques.....	272
g) Réalimentation par barrage en caoutchouc gonflable.....	274
4.2.5 Études préliminaires à la création d'un site de RAN.....	275
4.3 Principe physique d'une alimentation artificielle.....	276
4.3.1 Équations régissant les écoulements d'eau souterraine.....	276
a) Loi de Darcy.....	276
b) Équation de conservation de masse.....	278
c) Équation de l'écoulement en milieu poreux.....	278
d) Équations à deux dimensions pour des problèmes plans.....	279
e) Loi de Darcy en milieu non saturé.....	280
f) Loi de conservation de la masse en milieu non saturé.....	282
4.3.2 Exemples de solutions de l'équation de diffusivité.....	283
a) Solution de Theis.....	283
b) Solution du « puits dans l'île ».....	284
c) Exemple de superposition.....	285
4.3.3 Effets induits d'une alimentation artificielle.....	285
4.3.4 Principes hydrodynamiques de l'injection.....	286
a) Principe de l'écoulement de l'eau injectée.....	286
b) Loi d'évolution de l'eau injectée.....	287
c) Détermination empirique du débit d'injection.....	290
4.3.5 Principes hydrodynamiques de l'infiltration.....	291
a) Vitesse et écoulement des eaux.....	292
b) Évolution du dôme piézométrique.....	297
c) Les phénomènes de colmatage.....	302
4.4 Utilisation d'eaux usées pour la réalimentation.....	303
4.4.1 Infiltration percolation.....	308
4.4.2 Étude de faisabilité.....	309
4.4.3 Dimensionnement d'un dispositif de RAN eaux usées.....	312
4.4.4 Pollution induite.....	314
4.4.5 Colmatage.....	317
4.4.6 Injection d'eau usée dans des aquifères captifs.....	319
4.4.7 Décontamination.....	320
4.4.8 Utilisation d'eau usée pour l'AEP.....	321
4.5 Conclusion.....	324
V – LE COLMATAGE.....	327
5.1 Le colmatage des bassins d'infiltration.....	327
5.1.1 Origines du colmatage.....	327
a) Colmatage par les matières en suspension.....	328
b) Colmatage biologique.....	331
c) Colmatage chimique.....	333
d) Action des algues.....	333
5.1.2 Prévention du colmatage.....	340
a) Décantation et filtration de l'eau de recharge.....	340
b) Addition de substances chimiques.....	341
c) Couverture végétale ou artificielle au fond du bassin.....	342
d) Gestion des bassins.....	343
5.1.3 Traitement du colmatage.....	347
5.1.4 Exemples de colmatage et de traitements.....	348
a) Site de Peoria (Illinois).....	348
b) Alimentation artificielle de la nappe de Croissy.....	349
5.2 Le colmatage des dispositifs d'injection.....	349
5.2.1 Origines du colmatage.....	349

a) Colmatage mécanique	350
b) Colmatage chimique	355
c) Colmatage biologique	358
5.2.2 Prévention du colmatage	359
a) Identification des causes du colmatage	359
b) Les crépines et le massif filtrant	361
c) Nature des eaux et traitements préalables	361
d) Gestion des forages d'injection	363
e) Prédiction du colmatage	364
5.2.3 Traitement du colmatage	364
a) Traitements mécaniques	365
b) Traitements chimiques	368
c) Conclusion	369
5.2.4 Exemples de colmatage et de traitements	370
a) Donzère-Mondragon	370
b) Région de Grand-Prairie (Arkansas)	371
c) Flins-Aubergenville (Yvelines - France)	372
5.3 Conclusion	374
VI – CONCLUSION GÉNÉRALE	377
ANNEXES	379
1. Force	379
2. Énergie	379
3. Puissance	380
4. Longueur	380
5. Surface	380
6. Volume	380
7. Masse	381
8. Température	381
9. Tableaux de conversion	381
ORIENTATION BIBLIOGRAPHIQUE	385
LISTE DES ABRÉVIATIONS	405
INDEX SÉLECTIF DES NOMS PROPRES	407
INDEX TERMINOLOGIQUE	411

L'ouvrage

La gestion active des aquifères appréhende le milieu naturel comme une dynamique de réacteurs biologiques, physico-chimiques et hydrauliques.

L'auteur présente l'objet et les principes opératoires de cette nouvelle approche de l'hydrogéologie : la quantification des flux, l'analyse physico-chimique et biologique, l'étude des principaux réacteurs et de leurs interfaces, les types d'actions sur les hydrosystèmes. Il décrit en particulier la réalimentation artificielle des aquifères dans ses aspects opérationnels et financiers.

Le public

Ingénieurs spécialistes des techniques hydrauliques, hydrogéologues et industriels exploitants d'aquifères.

L'auteur

*Docteur ès sciences, **Michel Detay** est responsable de la gestion et l'exploitation des eaux de la ville de Manille (Philippines). Il dirige en outre le programme de recherche appliqué à la gestion des ressources en eau de la Lyonnaise des Eaux.*

ISBN 2-225-85623-0



9 782225 856235