

Alain Dassargues

HYDROGÉOLOGIE APPLIQUÉE

Science et ingénierie
des eaux souterraines

DUNOD

Direction artistique : Élisabeth Hébert
Conception graphique : Élisabeth Riba
Mise en page : Lumina Datamatics, Inc.

© Dunod, 2020
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-081890-7

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Préface

Hydrogéologie : je voudrais commencer ici par une petite perspective historique. Tout le monde connaît (ou croit connaître !) le cycle de l'eau : il pleut, l'eau qui tombe ruisselle, grossit le débit des rivières et s'infiltre dans le sol. Cette eau finit par aboutir aux rivières ou à la mer, où elle s'évapore, forme des nuages et retombe en pluie... C'est ce que l'on appelle le cycle de l'eau *per ascensum*, l'eau monte au ciel puis retombe en pluie... Mais cette vision du cycle de l'eau est en fait assez récente, elle ne date que du XVII^e siècle ! Auparavant, et cela depuis les grands philosophes grecs, en particulier Aristote, on vivait sur la croyance d'un cycle dit *per descensum* où l'eau de nos rivières et de nos sources nous viendrait de la mer, qui s'infiltrerait directement dans les terres le long des côtes avec un trajet descendant, puis remonterait aux sources et aux rivières... !

À bien y réfléchir, ce cycle est faux, mais n'est pas idiot ! D'abord, il faut expliquer pourquoi les rivières coulent quand il ne pleut pas. Quand il pleut, tout le monde voit couler l'eau vers les ruisseaux puis les rivières, on comprend aisément comment ça marche. Mais s'il cesse de pleuvoir pendant un jour, dix jours, cent jours et plus, et que les rivières coulent toujours ? Que se passe-t-il ? Ensuite, autre problème, les rivières se jettent dans la mer avec des débits souvent énormes, et le niveau de la mer ne monte pas ! Que se passe-t-il ? Le cycle *per descensum* est capable d'expliquer ces deux mystères : l'eau de la mer s'infiltre dans les terres, c'est pourquoi le niveau de la mer ne monte pas, puis elle ressort par les sources et alimente ainsi les rivières, c'est pourquoi les rivières coulent quand il ne pleut pas !

Mais il y a quand même deux petits problèmes : l'eau de mer est salée, l'eau des sources et des rivières est douce ; comment cela se fait-il ? Ensuite, l'eau dans ce cycle remonte des points bas (la mer) vers les points hauts (les sources en altitude des rivières) sous forme de « veines » : pourquoi ? Sur ces deux questions, pour les philosophes grecs, c'est l'évaporation de l'eau de mer dans le sous-sol par la chaleur contenue dans la terre qui expliquait l'absence de sel, cette eau évaporée remontant dans le sol sous forme de vapeur et se condensant dans des grottes en altitude où il fait froid, et coulant ensuite vers les sources... C'est intéressant, mais c'est faux !

À la décharge des philosophes grecs, il faut savoir qu'ils avaient sous leurs yeux un exemple de migration d'eau de mer dans les terres, exemple qui est cependant unique ou très rare. Il s'agit de l'île de Céphalonie, dans le mer Ionienne, où au port d'Argostoli, on peut voir de l'eau de mer s'engouffrer dans les terres dans un canal et disparaître dans le sous-sol. Le courant y est si vif qu'au XIX^e siècle, on y avait installé des moulins, les « moulins de la mer ». On explique aujourd'hui ce phénomène par une forte infiltra-

tion d'eau de pluie sur les hautes montagnes qui couronnent l'île (1 628 m), cette eau de pluie descend en profondeur, se mélange à l'eau de mer venant du canal cité et ressort de l'autre côté de l'île par des sources d'eaux saumâtres en mer. L'eau de mer est ainsi « aspirée » par cette eau douce par effet Venturi. Ce mécanisme a été mis en évidence par une coloration de l'eau du canal, faite en 1963 par une équipe d'hydrogéologues autrichiens (J. Zoetl et V. Maurin), le colorant étant ressorti en mer.

Il reste cependant de cette théorie grecque ancienne une idée fausse bien ancrée dans la tête des gens, à savoir que l'eau dans la terre circule sous forme de « veines » isolées, comme le sang dans le corps d'un homme, et que pour trouver de l'eau, il faut trouver la « veine » par où elle passe, c'est ce que proposent les sourciers¹. En réalité, l'eau souterraine circule en général en « nappe » et pas en veine, à quelques exceptions notables près, comme dans les milieux calcaires dits « karstifiés », où existent en effet des « veines », des rivières souterraines...

Mais revenons au cycle de l'eau *per ascensum*. Cette théorie a été établie par un Français, Pierre Perrault (1611-1680), qui publia en 1674 un ouvrage² où il démontrait que la quantité d'eau de pluie tombée annuellement sur le bassin de la Seine, était très largement supérieure au volume d'eau écoulé en un an par la Seine vers la mer, qu'il avait estimé. Il n'y avait donc pas besoin de faire venir de l'eau de mer *per descensum* pour expliquer le débit des rivières quand il ne pleut pas, c'est tout simplement l'infiltration de l'eau de pluie dans le sous-sol qui alimente les nappes d'eau souterraines, lesquelles alimentent ensuite les sources et les rivières, cet écoulement souterrain étant très lent... L'eau qui manque à l'exutoire de la Seine par rapport aux quantités apportées par la pluie, est en fait celle qui est évaporée ou transpirée par la végétation.

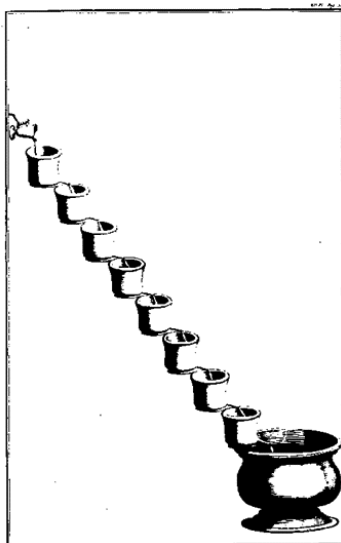
Presque au même moment, c'est un physicien anglais, Edmond Halley (1656-1742), qui donna son nom à la comète homonyme, qui démontra en 1687, pour la mer Méditerranée, que la quantité d'eau qui s'évapore chaque année à la surface de la mer est supérieure au volume d'eau apporté annuellement par les fleuves. Il avait estimé l'évaporation sur la mer en la mesurant dans un bac, et le débit des fleuves se jetant dans la Méditerranée. La différence entre l'eau évaporée et celle arrivant en Méditerranée par les fleuves est comblée par une entrée d'eau de l'Atlantique dans la Méditerranée par Gibraltar, ce courant d'eau entrant, en surface, s'accompagnant d'un courant profond sortant, amenant à l'Atlantique de l'eau plus salée, ce qui permet à la Méditerranée de conserver une salinité constante. Pas besoin là non plus de faire intervenir un flux *per descensum* de la mer vers la terre pour expliquer la stabilité du niveau des mers... !

Mais... nous arrivons au siècle des Lumières, il faut faire de la science expérimentale et « prouver » la validité des nouvelles théories, ou des anciennes. Un océanographe italien, Louis Ferdinand de Marsilli, membre de l'Académie royale des sciences de Paris et professeur à l'université de Bologne dont il avait été le créateur, se charge de « prouver » que la théorie *per descensum* d'Aristote est la bonne. Pour cela, il la modifie légèrement : l'eau de mer remontant de l'océan dans les continents ne s'évapore plus et ne se condense donc plus dans des grottes, elle est tout simplement filtrée par le « sable des plages », et cette filtration en extrait le sel ! Pour prouver sa théorie, Marsilli construit

1. Voir l'ouvrage controversé *Le signal du sourcier* par Yves Rocard, Dunod, 1962.

2. Pierre Perrault, *De l'origine des fontaines : Lettre à M. Huguens au sujet des expériences*, Paris, Pierre Le Petit, 1674.

un dispositif expérimental (voir figure ci-après) dans lequel il constitue une cascade de pots de fleurs (il y en aura 19) dont on remplit le premier d'eau de mer, laquelle s'écoule dans le second, et ainsi de suite jusqu'au dernier. Selon la nouvelle théorie, l'eau filtrée du dernier pot serait devenue douce. Voici ce qu'il écrit au sujet de son expérience¹ :



DE LA MER. PARTIE II. 33

ON suivit le même ordre dans la filtration par le sable, où la quantité d'eau de quatorze livres se réduisit également au poids de cinq livres deux onces. Sa couleur se changea en celle de vin blanc un peu chargé. Le poids de vingt-quatre onces diminua à vingt-trois, & cinq dragmes selon la balance, & selon l'Aréomètre à une once trois dragmes, & quarante-un grains, ce qui veut dire huit grains de moins. Cette diminution du goût salé & du poids, qui se trouve plus grande dans la filtration par le sable, qu'en celle qui se fait par la terre, montre qu'il est le plus propre à purifier l'eau; & comme ordinairement, sur le Rivage de la Mer, il y a quantité de sable, on ne doit pas s'étonner si l'eau, qui lui passe au travers, quoi qu'en une petite distance, devient sur le champ presque infide.

Experience
de la filtration
de l'eau de la
mer par le
sable

Marsilli prétend donc que le « sable de plage » filtre le sel de l'eau de mer, car il voit sa densité diminuer le long du trajet d'un pot au suivant, ainsi que son goût salé. Il a fait deux expériences, l'une avec de la « terre de jardin », l'autre avec du « sable de plage » qui est, dit-il, plus efficace pour enlever le sel. Selon lui, si dans son expérience, l'eau

1. *Histoire Physique de la Mer*, Louis Ferdinand, comte de Marsilli, membre de l'Académie royale des sciences de Paris, à Amsterdam, aux dépens de la Compagnie, M DCC XXV (1725).

n'est pas encore totalement douce, c'est que le nombre de pots de fleurs n'est pas assez élevé ! La théorie d'Aristote est donc la bonne, dit-il : « ...*l'eau, qui passe au travers [du sable], quoiqu'en une petite distance, devient sur le champ presque insipide* » ! En réalité, le sable est incapable de retenir le sel, ce qui a pu se passer dans l'expérience est que l'eau contenait des matières fines en suspension qui, elles, ont pu être filtrées.

Il faut savoir cependant que cette théorie du cycle *per descensum* refait parfois surface... J'ai eu ainsi connaissance, dans les années 2015, d'une arnaque que proposait une entreprise européenne dans un État très aride de l'Inde, il s'agissait de faire des forages très profonds pour aller rechercher cette eau d'origine marine, entrée dans le sous-sol à grande profondeur, s'y étant réchauffée jusqu'à ébullition, et la vapeur s'étant ensuite condensée dans des niveaux moins profonds, plus froids. Les autorités politiques ont décidé de tester cette méthode « nouvelle » pour trouver de l'eau, malgré les avis négatifs des scientifiques indiens. Un forage profond fut financé et payé à l'entreprise. Arrivé à 500 m de profondeur, et n'ayant rien trouvé, le forage fut arrêté un soir, le matériel de forage évacué dans la nuit, et l'entreprise criminelle évaporée à jamais !

Mais revenons à *Hydrogéologie appliquée* d'Alain Dassargues. Rassurez-vous, ce traité sur les eaux souterraines est scientifiquement rigoureux, basé sur des faits établis et conforme aux lois de la physique et de la mécanique des fluides ! Si nous étions encore au siècle des Lumières, ce livre ferait partie intégrante de *L'Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert ! Feuilletez la table des matières, tout sur les eaux souterraines y est dit, expliqué, illustré ! C'est le traité le plus complet de notre discipline, tout à fait à jour jusqu'aux résultats les plus récents, avec des composantes importantes provenant des disciplines connexes, comme les bilans hydrologiques, la géochimie des eaux, la pollution, la subsidence des terrains sous l'effet des pompages, le transport de la chaleur et la modélisation... Ce livre constitue un support de cours précieux pour l'enseignement, depuis le premier cycle jusqu'au doctorat, et aussi pour la recherche et l'ingénierie. Ce que j'apprécie également beaucoup dans ce traité est la double composante du discours, mêlant la rhétorique scientifique du sujet avec la didactique des applications, je veux dire la science de l'ingénieur. Tout cela est très bien écrit, clair et limpide. Déjà publié en anglais en 2018, cette nouvelle version française permettra à une fraction importante de la communauté scientifique mondiale de partager une même vision moderne de l'Hydrogéologie quantitative !

Paris, le 8 avril 2020

Ghislain de Marsily

Professeur émérite à Sorbonne Université et à l'École des mines de Paris

Membre de l'Académie des sciences de France et Membre étranger,

US National Academy of Engineering

Table des matières

Préface	III
Avant-propos	XVII
Remerciements	XIX
1 Introduction générale	1
1.1 Ressources en eaux douces et eaux souterraines	1
1.2 Vision anthropocentrique	2
1.3 Hydrogéologie au sein de l'hydrologie	3
1.4 Zones partiellement et totalement saturées	4
1.5 Recherche d'eau souterraine	4
1.6 Contenu de cet ouvrage	5
1.7 Bibliographie	8
2 Bilan hydrologique et eaux souterraines	11
2.1 Cycle de l'eau et estimation d'un bilan hydrique	11
2.2 Précipitations	16
2.2.1 Moyennes temporelles	16
2.2.2 Moyennes spatiales	17
2.3 Évapotranspiration	18
2.3.1 Évaporation	18
2.3.2 Transpiration	19
2.3.3 Mesures de l'évapotranspiration (ET)	19
2.3.4 Équations d'estimation de l'évapotranspiration (ET)	22
2.4 Recharge	30
2.4.1 Introduction	30
2.4.2 Méthode de fluctuation de la surface libre	32
2.4.3 Méthode du bilan en chlorure	33

2.5 Débit de base	35
2.6 Bibliographie	40
3 Terminologie et situations typiques	49
3.1 Terminologie	49
3.2 Exemples de conditions hydrogéologiques	54
3.2.1 Aquifères séparés par des couches peu perméables : infiltrations latérales et verticales	54
3.2.2 Aquifère compartimenté par une tectonique récente en horst/graben	55
3.2.3 Aquifères dans des formations géologiques faillées et charriées	55
3.2.4 Bedrock fracturé et colluvium de lithologie variable	57
3.2.5 Aquifère perché et aquifère hétérogène du bedrock	57
3.2.6 Interactions entre aquifères influencées par les activités humaines	57
3.2.7 Aquifère crayeux libre et semi-captif drainé par des galeries	58
3.2.8 Système hydrogéologique karstique	58
3.2.9 Direction d'écoulement dans un aquifère calcaire et influence d'un niveau de base	60
3.2.10 Importance d'une interprétation géologique	60
3.3 Bibliographie	63
4 Écoulement en milieu souterrain saturé	65
4.1 Élément de volume représentatif (EVR)	65
4.2 Porosités	68
4.2.1 Porosité totale	68
4.2.2 Porosité effective	71
4.2.3 Teneur en eau	76
4.3 Hauteurs piézométriques	76
4.3.1 Introduction	76
4.3.2 Équation simplifiée de Bernoulli et hauteur piézométrique	77
4.3.3 Mesures de la hauteur piézométrique	78
4.4 Loi de Darcy et conductivité hydraulique	79
4.4.1 Loi expérimentale de Darcy	79

4.4.2 Débit spécifique et vitesses d'écoulement	81
4.4.3 Conductivité hydraulique et perméabilité intrinsèque	81
4.4.4 Loi de Darcy en 3D	84
4.5 Hétérogénéité : valeurs de conductivités équivalentes et moyennes	86
4.5.1 Valeurs équivalentes moyennes de conductivité hydraulique pour un écoulement parallèle ou perpendiculaire aux couches géologiques	86
4.5.2 Conductivités hydrauliques moyennes géostatistiques	88
4.6 Application de la loi de Darcy en milieux hétérogènes et fracturés	88
4.6.1 Écoulement local et régional	88
4.6.2 Conductivité hydraulique et écoulement en milieu fracturé	93
4.7 Limitations et validité de la loi de Darcy	95
4.8 Concept de transmissivité	98
4.9 Équations de l'écoulement permanent en milieu poreux (saturé)	99
4.10 Variation d'emménagement en conditions saturées	101
4.10.1 Coefficient d'emménagement spécifique	101
4.10.2 Contrainte effective et principe de Terzaghi	102
4.10.3 Coefficient d'emménagement spécifique et développement de l'équation de conservation	103
4.11 Équations de l'écoulement transitoire en milieu poreux (saturé)	106
4.11.1 Équations 3D d'écoulement	106
4.11.2 Équations d'écoulement 2D vertical	107
4.11.3 Coefficient d'emménagement	107
4.11.4 Équations 2D d'écoulement horizontal en aquifère captif	109
4.11.5 Équations 2D d'écoulement horizontal en aquifère libre	110
4.12 Bibliographie	110
5 Mesure des conductivités hydrauliques	113
5.1 Introduction	113
5.2 Essais de laboratoire	114
5.2.1 Relations empiriques basées sur la granulométrie	114
5.2.2 Perméamètre à hauteur piézométrique constante	115
5.2.3 Perméamètre à hauteur piézométrique variable	116
5.2.4 Essais œdométriques et triaxiaux	116

5.3 Slug tests	117
5.3.1 Interprétation	118
5.4 Essais de pompage	120
5.4.1 Conception, procédures et mesures	121
5.4.2 Interprétation en régime permanent	123
5.4.3 Interprétation en régime transitoire	130
5.5 Autres méthodes de mesure	150
5.5.1 Essai Lugeon ou essai entre packers	150
5.5.2 Essai Lefranc	152
5.5.3 Solution de Jacob et Lohman pour des puits artésiens	153
5.5.4 Infiltromètre ou méthode de Porchet	153
5.5.5 Mesures au perméamètre à air	154
5.6 Bibliographie	156
6 Subsidence et tassements induits	161
6.1 Introduction	161
6.2 Variation de la contrainte effective avec la pression	162
6.3 Couplage écoulement souterrain - géomécanique en milieu poreux saturé	164
6.3.1 Variation du coefficient d'emmagasinement spécifique	165
6.3.2 Variation de la perméabilité	166
6.4 Exemples de villes « subsidentes »	169
6.4.1 Venise	169
6.4.2 Les Pays-Bas	169
6.4.3 Bangkok	170
6.4.4 Mexico	171
6.4.5 Shanghai	172
6.5 Nouvelles méthodes de mesure et de remédiation	175
6.6 Bibliographie	176
7 Introduction à la qualité des eaux souterraines et à l'hydrochimie	179
7.1 Introduction et unités	179
7.1.1 Phases et constituants	180
7.1.2 Unités de concentration	182

7.2 Solutés naturels et caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines	185
7.2.1 Constituants majeurs et mineurs	185
7.2.2 Résidu sec, conductivité électrique et carbone organique dissous	186
7.2.3 Électroneutralité ou équilibre des charges électriques	188
7.2.4 pH et réactions aqueuses	188
7.2.5 Système carbonaté, pHs, indice de saturation de Langelier et dureté	189
7.2.6 Alcalinité	191
7.2.7 Potentiel redox (E_h)	192
7.2.8 Dissociation, dissolution et précipitation, altération des roches	193
7.2.9 Capacité d'échange cationique, rapport d'adsorption du sodium	194
7.3 Graphiques, diagrammes et analyses multivariées des compositions chimiques des eaux souterraines	195
7.3.1 Diagrammes à barres et diagrammes circulaires conventionnels	195
7.3.2 Diagramme semi-log de Schoeller	197
7.3.3 Diagramme de Stiff	197
7.3.4 Diagramme de Piper	199
7.3.5 Analyses en composantes principales et cartes auto-organisantes	200
7.4 Standards et normes de qualité des eaux souterraines	201
7.4.1 Contexte général	201
7.4.2 Standards et normes de potabilité	202
7.5 Stratégies de surveillance et d'échantillonnage	204
7.5.1 Échantillonnage global et échantillonnage multiniveau	204
7.5.2 Procédure et représentativité de l'échantillonnage	206
7.6 Bibliographie	207

8 Transport de contaminants, temps de résidence, prévention et remédiation **211**

8.1 Introduction	211
8.2 Transport de soluté	212

8.2.1 Diffusion	212
8.2.2 Advection	214
8.2.3 Dispersion	216
8.2.4 Adsorption-Désorption	227
8.2.5 Dégradation	231
8.2.6 Équation de conservation de la masse de soluté au sein de l'eau souterraine	232
8.2.7 Effet d'eau immobile/diffusion matricielle	236
8.2.8 Transport réactif de soluté	239
8.3 Transport de contaminants non aqueux	243
8.3.1 Solubilité des produits non aqueux dans les eaux souterraines	244
8.3.2 Affinité des produits non aqueux pour la matrice solide et l'eau souterraine	244
8.3.3 Mobilité dans l'air des produits non aqueux en zone non saturée	246
8.3.4 Mobilité liquide des produits non aqueux en zones non saturée et saturée	246
8.4 Assainissement <i>in situ</i> des eaux souterraines contaminées	252
8.4.1 Nettoyage, confinement, stabilisation de la source	253
8.4.2 Système de pompage, traitement et réinjection	254
8.4.3 Extraction de vapeur et pulvérisation d'air	254
8.4.4 Bioremédiation	255
8.4.5 Barrières et zones réactives	256
8.4.6 Phytoremédiation	256
8.5 Essais de traçages	256
8.5.1 Configurations d'essais de traçages	258
8.5.2 Traceurs, injection, échantillonnage	262
8.6 Temps de transport et de résidence	264
8.6.1 Âge de l'eau souterraine pour un écoulement piston : un concept idéalisé	265
8.6.2 Âge de l'eau souterraine : un terme trompeur	265
8.6.3 L'approche statistique pour calculer des âges : moyenne et temps de résidence	266

8.7 Datations par isotopes et traceurs environnementaux	269
8.7.1 Isotopes stables	270
8.7.2 Isotopes radioactifs	278
8.8 Vulnérabilité et protection des eaux souterraines	282
8.8.1 Zones de protection	282
8.8.2 Cartes de vulnérabilité et sensibilité	284
8.9 Bibliographie	289
9 Écoulement et transport en milieu partiellement saturé	305
9.1 Introduction	305
9.2 Pressions capillaires	306
9.3 Écoulement partiellement saturé	309
9.3.1 Conductivité hydraulique en conditions partiellement saturées	309
9.3.2 Loi de Darcy-Buckingham en zone partiellement saturée	312
9.3.3 Coefficient d'emménagement généralisé en zone partiellement saturée	312
9.3.4 Équation de Richards pour l'écoulement partiellement saturé	312
9.4 Contamination et transport en conditions partiellement saturées	313
9.4.1 Transport de solutés en zone partiellement saturée	314
9.4.2 Contamination et écoulement multiphasique	315
9.5 Bibliographie	318
10 Salinisation, écoulement et transport dépendant de la densité	321
10.1 Salinisations	321
10.1.1 Dissolution d'évaporites	321
10.1.2 Évapotranspiration	322
10.1.3 Contamination par des eaux marines	326
10.1.4 Mesures de terrain et échantillonnage	328
10.2 Concept d'interface eau douce - eau salée	331
10.3 Équations couplées d'écoulement et de transport dépendants de la densité	332
10.3.1 Équation d'écoulement dépendant de la densité	333

10.3.2 Équation de transport dépendant de la densité	334
10.3.3 Équations d'état ou équations constitutives	335
10.3.4 Approximation de Boussinesq et hypothèses habituelles pour les intrusions d'eaux marines	336
10.4 Bibliographie	336
11 Transfert de chaleur dans les aquifères et géothermie peu profonde	341
11.1 Introduction	341
11.2 Transfert de chaleur en milieu souterrain, équations et propriétés	343
11.2.1 Conduction thermique	343
11.2.2 Advection et convection thermiques	344
11.2.3 Dispersion thermique	346
11.2.4 Équation de conservation de la chaleur	347
11.2.5 Nombres adimensionnels pour évaluer les processus thermiques dominants	348
11.3 Aspects hydrogéologiques des projets géothermiques de faible profondeur	350
11.3.1 Introduction	350
11.3.2 Systèmes géothermiques peu profonds fermés	355
11.3.3 Systèmes géothermiques peu profonds ouverts	357
11.3.4 Systèmes géothermiques dans d'anciennes mines	358
11.4 Bibliographie	360
12 Stratégie et méthodologie de modélisation des eaux souterraines	365
12.1 Introduction et définitions	365
12.1.1 Objectifs et méthodologie	369
12.2 Modèle conceptuel	371
12.2.1 Processus à simuler	371
12.2.2 Parcimonie ou complexité	373
12.2.3 Régime permanent ou régime transitoire	373
12.2.4 Dimensionnalité du modèle	374
12.2.5 Choix conceptuels pour les milieux fracturés et karstifiés	378

12.2.6 Interactions avec les eaux de surface et modèles intégrés	380
12.2.7 Autres choix et hypothèses	381
12.3 Conditions initiales et conditions aux limites	382
12.3.1 Conditions initiales	382
12.3.2 Conditions aux limites	382
12.4 Implémentation du modèle et entrée des données	393
12.4.1 Géométrie et géologie	394
12.4.2 Paramètres hydrogéologiques	394
12.4.3 Sollicitations	394
12.4.4 Données historiques	395
12.5 Calibration, validation, étude de sensibilité, modélisation inverse	395
12.5.1 Optimisation	395
12.5.2 Étude de sensibilité	399
12.5.3 Modélisation inverse	403
12.5.4 Incertitude des prédictions	406
12.6 Introduction aux géostatistiques et probabilités en hydrogéologie	408
12.6.1 Variables aléatoires géostatistiques continues	408
12.6.2 Probabilité et approche bayésienne	410
12.6.3 Simulations de Monte-Carlo	412
12.6.4 Géostatistiques pour modéliser l'hétérogénéité	412
12.7 Prédictions basées sur l'apprentissage bayésien	416
12.8 Bibliographie	417
13 Principes des techniques de modélisation hydrogéologique	431
13.1 Introduction et terminologie	431
13.2 Techniques numériques pour la simulation de l'écoulement en milieu souterrain	433
13.2.1 Méthode des différences finies (<i>FDM</i>)	433
13.2.2 Méthode des éléments finis (<i>FEM</i>)	446
13.2.3 Méthode des volumes finis (<i>FVM</i>)	459
13.3 Techniques numériques pour la simulation du transport de soluté	460
13.3.1 Nombres adimensionnels de Peclet et de Courant	461
13.3.2 Schémas d'intégration temporelle	463

13.3.3 Méthodes eulériennes	463
13.3.4 Méthodes eulériennes-lagrangiennes	470
13.3.5 Méthode <i>random walk</i> (« marche aléatoire »)	474
13.3.6 Modélisation du transport réactif	476
13.4 Bibliographie	478
Index	485

Avant-propos

*“If we fail to get the water, then it’s ruin to the squatter,
For the drought is on the station and the weather’s growing hotter,
But, we’re bound to get the water deeper down.”* (Banjo Paterson)

L’eau ne nous appartient pas, nous ne faisons que l’emprunter (modification libre de la citation d’origine inconnue : « Nous n’héritons pas de la Terre de nos ancêtres, nous l’empruntons à nos enfants »). Si nous utilisons ou polluons l’eau, le défi consiste à la restaurer et à la restituer au moins en qualité et en quantité égales.

L’hydrogéologie fait référence à la géologie et à l’hydrologie, incluant les incertitudes des sciences naturelles et les techniques de quantification rigoureuses des sciences de l’ingénieur. Le travail de terrain et le contexte théorique sont également complémentaires. Tous ces aspects opposés mais complémentaires peuvent être considérés comme le yin et le yang des eaux souterraines¹.

L’hydrogéologie est souvent plus une question de méthodes que de résultats locaux, ces derniers cependant peuvent être d’une importance capitale pour le développement et le bien-être de la société humaine locale.

Même si la propagation des ondes de pression dans le sous-sol est très rapide, l’écoulement des eaux souterraines à travers les pores et les microfissures de la roche peut être considéré comme lent, ce qui permet à une série de processus biochimiques et physiques de se produire. L’éloge de la lenteur a une signification tout à fait spécifique pour les eaux souterraines.

Comme résumé par Jacob Bear (2011)², « ...la modélisation hydrogéologique à grande échelle à partir d’observations à petite échelle est un acte délicat. Le point de départ est l’utilisation d’une loupe pour observer et comprendre ce qui se passe très localement au sein des phases et des interfaces entre phases, puis, par une procédure d’homogénéisation, on obtient des modèles qui décrivent ces phénomènes en termes de quantités mesurables dans un domaine considéré comme un continuum. » (traduction libre)

1. Lipson, D.S. 2017. The Yin and Yang of Groundwater. *Groundwater* 55: 287.

2. Bear, J. *EOS* 92(6) 8/02/2011.

« Apprends les règles comme un professionnel afin de pouvoir les briser comme un artiste. » (Pablo Picasso)

Partager mes modestes connaissances et ma pratique dans le domaine des eaux souterraines a été une expérience très intéressante et importante pour moi. En écrivant ce livre, je me suis rendu compte que le sujet de chaque chapitre et même de chaque sous-chapitre pouvait nécessiter des ouvrages entiers pour être traité en détail. Par conséquent, l'un des principaux défis a été de rédiger une synthèse contenant (espérons-le) les informations les plus importantes pour le lecteur. Quel que soit le résultat, j'éprouve la satisfaction d'avoir fait de mon mieux...

Remerciements

Merci à mon épouse, à mes enfants et petits-enfants qui m'ont soutenu dans cette expérience. Le temps qui a été pris pour ce livre, l'a été en grande partie au détriment de celui que je leur aurais consacré.

Merci à mes collègues du groupe de recherche Hydrogéologie & Géologie de l'Environnement et de l'ensemble de l'Unité de recherche *Urban & Environmental Engineering* de l'université de Liège (Belgique), qui ont été très patients avec moi. Merci à mes nombreux collègues et amis avec qui j'ai discuté de certains sujets et contenus de ce livre. Parmi d'autres, je tiens à remercier tout particulièrement Serge Brouyère, Philippe Urban, Frédéric Nguyen, Pascal Goderniaux, Thomas Hermans, Okke Batelaan, Luk Peeters, Craig Simmons, Philippe Renard, Daniel Hunkeler, Philip Brunner, John Molson, Jean-Michel Lemieux et René Therrien pour les fructueux échanges d'idées. Merci aussi à Agathe Defourny d'avoir contribué à dessiner les figures.

Merci à l'université de Liège et au FNRS Belgique pour le semestre sabbatique accordé en 2017 qui m'a permis de me concentrer pendant quelques mois sur les thèmes principaux de ce livre.

Merci au lecteur, j'espère qu'il trouvera dans ce livre les informations théoriques et/ou pratiques dont il a besoin.



Introduction générale

Les eaux souterraines font généralement partie des ressources en eaux douces, indispensables à l'humanité mais également aux écosystèmes de notre environnement. Il n'est donc pas étonnant que nous en ayons une vision très anthropocentrique. L'hydrogéologie est l'hydrologie des eaux souterraines, dépendante des conditions géologiques. L'eau souterraine peut se retrouver en conditions de saturation totale ou partielle dans le milieu souterrain. Le contenu de cet ouvrage est présenté en résumé.

La disponibilité en eau, tout comme celle d'autres ressources minérales, des sols et de la nourriture est une préoccupation sociétale croissante car la population mondiale ne cesse d'augmenter. Pour l'eau, Il ne s'agit pas tant d'un problème mondial [1] que d'un problème régional de disponibilité pour satisfaire nos besoins afin d'améliorer la santé humaine, la sécurité alimentaire, la biodiversité des écosystèmes naturels et la production énergétique efficace. Entre ces quatre domaines principaux qui dépendent des ressources en eau, il y a de multiples effets croisés, rétroactions, interconnexions et couplages. Ceux-ci sont décrits dans le concept de « nexus » eau-énergie-alimentation ([2], [3]). L'émergence d'une pensée structurée en « nexus » (i.e. tenant compte des interdépendances) vient de la perception que la disponibilité des ressources naturelles peut un jour limiter le développement de notre bien-être et de nos communautés humaines en croissance. Par conséquent, des stratégies gagnantes pour tous doivent être développées pour préserver la durabilité environnementale tout en produisant des gains d'efficacité pour équilibrer la croissance imposée par la démographie [4]. Ce problème est particulièrement vrai pour l'utilisation de l'eau douce (i.e. l'eau continentale naturelle avec une teneur en ions limitée par rapport aux eaux saumâtres et aux eaux de mer) qui est essentielle pour chacun d'entre nous.

1.1 Ressources en eaux douces et eaux souterraines

Le stock mondial d'eau sur Terre est actuellement estimé à environ 1 387 millions de km³. En fait, ce n'est pas cette quantité qui est importante car plus de 96,5 % de ce stock

sont constitués d'eaux de mer. D'autres eaux salines se trouvent en profondeur ou dans des lacs salés pour environ 0,96 %. Cela signifie que l'eau douce sur Terre ne se trouve que dans les 2,54 % restants. Si l'on soustrait l'eau contenue dans les calottes glaciaires et les glaciers (1,75 %), la vapeur dans l'atmosphère, l'humidité du sol et le pergélisol (0,02 %), l'eau douce « facile à utiliser » qui reste ne représente que 0,77 % de l'eau sur Terre. Ensuite, et c'est le plus étonnant pour le grand public et les médias, la part des rivières et des lacs est inférieure à 0,01 % : les rivières et les lacs fournissent moins de 1,3 % de l'eau facile à utiliser. En d'autres termes, le rapport entre l'eau douce souterraine et l'eau douce de surface est d'environ 77 pour 1. Les données à l'échelle mondiale sont rares ou résultent souvent de calculs (de mise à l'échelle) basés sur des hypothèses implicites très simplistes. Par conséquent, ces estimations mondiales peuvent être relativement imprécises. Néanmoins, ces chiffres montrent clairement l'importance particulière des eaux souterraines pour les générations futures dans un monde où la population augmente. Une autre question cruciale se pose avec le changement climatique actuel : la répartition de l'eau change-t-elle entre les différents compartiments du cycle hydrologique [1] ?

L'eau douce est assez inégalement répartie, ce qui entraîne de nombreux problèmes locaux de disponibilité. Dans les zones arides, les eaux souterraines sont d'une importance cruciale, car les eaux de surface peuvent être très limitées si elles ne sont pas alimentées par la fonte saisonnière de glaciers en régions montagneuses. Les possibilités de renouvellement de ces réserves en eau souterraine doivent également être prises en compte. Là encore, dans les zones arides, la production d'eau à partir de très anciennes réserves d'eaux souterraines, appelées eaux souterraines « fossiles » (i.e. non renouvelées depuis des milliers d'années), soulève automatiquement la question de l'exploitation et du développement durables. Par exemple, dans le nord de la Mauritanie, dans le désert du Sahara, une ré-infiltration (recharge) équivalente à une « lame d'eau » de quelques mm/an (i.e. sur une base pluriannuelle et sur l'ensemble du territoire) serait suffisante pour équilibrer les pompages d'eaux souterraines nécessaires au développement actuel de la région. Cependant, déterminer si cette recharge de quelques mm/an se produit réellement dans les conditions climatiques actuelles n'est pas un problème simple. Cette question nécessite déjà une étude hydrologique très étendue et détaillée, impliquant de longues périodes de mesures et des interprétations rigoureuses.

1.2 Vision anthropocentrique

Comme mentionné plus haut, la recherche sur les ressources en eau, et en particulier sur les eaux souterraines, est le plus souvent motivée et soutenue par les besoins économiques et humains. Les sciences de l'eau « *ont des racines fondamentales et appliquées qui remontent à l'Antiquité. L'importance de l'eau en tant que ressource reste l'une des principales raisons d'étudier les processus hydrologiques* » [5]. Ainsi, l'hydrogéologie ne se réfère pas seulement aux sciences naturelles, mais aussi à l'ingénierie. L'hydrogéologie est soumise aux lois et aux incertitudes des sciences naturelles tout en étant le plus souvent utilisée pour assurer la conservation des écosystèmes et les divers besoins de l'humanité. L'ingénierie intervient car l'importance sociale et économique de l'approvisionnement en eau souterraine exige non seulement des réponses quantifiées, mais aussi des estimations de l'incertitude de ces réponses. Cependant, on constate que

1.3 Hydrogéologie au sein de l'hydrologie

« l'eau souterraine n'est pas visible dans les questions de politique, de gouvernance et de gestion comme elle doit l'être » [6], comparativement à son importance relative, ne fut-ce que pour la production d'eau potable.

Dans une approche globale DPSIR (*Driver Pressure State Impact Response*), les moteurs (*drivers*) sont clairement la croissance démographique et les changements climatiques et sociétaux. Les gestions mondiale et locale de l'eau doivent être efficaces pour assurer la « sécurité par rapport à l'eau » [7]. Cette gestion doit s'occuper aussi bien des questions de quantité que de qualité de ces ressources renouvelables. Il n'y a qu'une quantité limitée d'eau et il n'existe aucun substitut [8], car la désalinisation de l'eau de mer est basée sur des techniques qui ne sont pas encore suffisamment accessibles et durables pour être utilisées à grande échelle. Ainsi, la gestion de l'eau, et en particulier la rareté de l'eau, est l'un des défis les plus urgents auxquels l'humanité est confrontée aujourd'hui [9].

Lors de l'évaluation des besoins en eau, et en particulier en eau souterraine, les estimations et déclarations médiatiques peuvent être trompeuses et il existe souvent une confusion entre « eau utilisée », « eau consommée » et « eau produite » ou « eau prélevée » [10]. L'eau peut être utilisée plusieurs fois, assurant différentes fonctions ou services successifs avec traitement/épuration (eau recyclée) ou sans traitement (eau réutilisée). L'eau consommée désigne l'eau qui n'est pas recyclée (du moins localement) (i.e. évaporée, transpirée ou transformée en aliments). L'eau produite ou prélevée est extraite d'une source et une partie peut être effectivement recyclée ou réutilisée, tandis que l'autre partie est consommée.

De larges débats reviennent régulièrement dans les médias sur la privatisation et la commercialisation de l'eau. Cette question n'est pas discutée ici, mais il est logique de considérer théoriquement qu'un coût attribué à l'eau devrait garantir la force financière nécessaire et suffisante à améliorer la qualité des méthodes de gestion des ressources en eau au nom de tous [11]. Dans le même temps, un accès minimal à l'eau doit être garanti à tous, et par conséquent, le rôle des autorités locales est de déterminer l'équilibre délicat à trouver.

Face à la nécessaire durabilité (définie comme la capacité de répondre aux besoins actuels sans compromettre ceux des générations futures), le challenge vient de la croissance démographique qui lui est totalement opposée conceptuellement, du moins au niveau actuel de consommation des ressources. Les progrès technologiques devraient permettre d'atteindre le plus rapidement possible des niveaux inférieurs de consommation des ressources en eau, en encourageant la réutilisation et le recyclage.

1.3 Hydrogéologie au sein de l'hydrologie

L'**hydrologie** est l'étude scientifique de l'eau (en général). Il s'agit donc d'étudier le mouvement, la distribution et la qualité de l'eau sur les continents, y compris le cycle de l'eau, les ressources en eau et les aspects de durabilité environnementale. Cette étude intègre les propriétés de l'eau et les relations entre l'eau et les composantes biotiques de l'environnement. L'**hydrogéologie** est l'étude de l'hydrologie des eaux souterraines, en tenant compte notamment des conditions géologiques. Les hydrogéologues doivent donc maîtriser les méthodes et les techniques scientifiques relevant de différentes

spécialités des sciences et de l'ingénierie : géologie, physique, chimie, biologie, hydrologie de surface, hydraulique, mécanique des fluides et transfert de chaleur ainsi que la géostatistique, l'analyse des risques, la géotechnique, l'analyse numérique et l'informatique. Pour des interactions fructueuses avec d'autres spécialistes et chercheurs dans le domaine de l'eau et de l'environnement, des notions et connaissances en génie civil et environnemental et en gestion de l'eau peuvent également être essentielles.

1.4 Zones partiellement et totalement saturées

L'eau souterraine est l'eau présente dans le sous-sol, dans les espaces poreux et les fractures des milieux géologiques. La partie de la lithosphère dans laquelle chaque vide (i.e. les pores, les fissures, les cavités) est totalement rempli d'eau est appelée la **zone saturée**. Au-dessus de la zone saturée, on trouve une zone partiellement saturée où ces vides contiennent de l'eau et de l'air. Pour cette dernière, d'autres termes sont aussi utilisés, tels que zone non saturée, zone à saturation variable ou zone vadose. La partie supérieure de la **zone partiellement saturée** est généralement la zone humide du sol ou zone racinaire dont l'épaisseur varie en fonction de la combinaison locale des conditions climatiques, lithologiques et topographiques. Dans la partie inférieure de la zone partiellement saturée, une frange capillaire peut être distinguée au-dessus de la zone saturée (figure 1.1). Dans cette frange, la saturation en eau est presque atteinte, mais les forces capillaires sont supérieures à celles de la gravité : l'eau qui remplit les pores et les fissures reste surtout fixée à la matrice solide par capillarité. L'épaisseur de cette **frange capillaire** est plus importante pour des dimensions uniformes et décroissantes des pores et des ouvertures de fissures. Des franges capillaires importantes peuvent donner lieu à une grande sensibilité du milieu par rapport à toute infiltration d'eau supplémentaire. Dans ce cas, le risque d'inondations induites par des eaux souterraines (souvent appelées « crues de nappes aquifères ») est très élevé car le niveau d'eau peut monter très rapidement dans le milieu à la moindre infiltration, et se retrouver au-dessus de la surface topographique.

Dans un forage ou dans un puits de pompage, la frange capillaire n'est le plus souvent pas détectée et donc négligée. Le niveau d'eau mesuré dans le puits donne la position de la **surface libre** séparant la zone saturée (où l'eau souterraine peut s'écouler par gravité) de la zone partiellement saturée (voir chapitres 4 et 9) (figure 1.1).

1.5 Recherche d'eau souterraine

En considérant le contexte géologique de la zone supérieure de la croûte terrestre, on peut trouver des eaux souterraines (presque) partout. Le plus grand défi est donc de trouver de l'eau souterraine en quantité suffisante pour être produite et répondre aux besoins locaux. Pour ce faire, on dépend des deux principales propriétés des milieux géologiques qui influencent l'écoulement des eaux souterraines : leur capacité à stocker et à conduire les eaux souterraines (voir chapitre 4). La prospection des eaux souterraines n'entre pas dans le cadre de ce livre, elle peut s'avérer complexe mais très efficace. La recherche d'eau par des techniques de « radiesthésie aquatique » et/ou par l'emploi de baguettes (ou assimilées) n'est pas pertinente. Plus de détails pourront être trouvés

1.6 Contenu de cet ouvrage

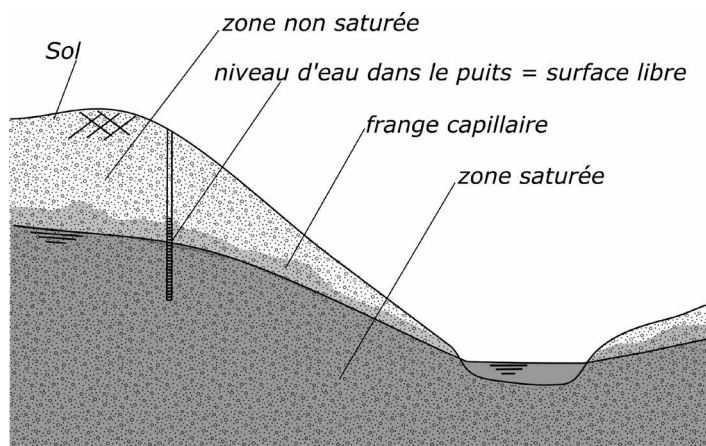


Figure 1.1 – Au-dessus de la zone saturée et de la surface libre, la frange capillaire est une zone d'épaisseur variable où le milieu est presque saturé, ensuite se retrouve la zone non saturée.

dans les nombreuses études réalisées à ce sujet ([12], [13], [14], [15], et [16] parmi beaucoup d'autres). Récemment, l'hydrogéophysique a pris beaucoup d'importance, avec le développement et l'utilisation de méthodes géophysiques et d'algorithmes d'inversion pour l'imagerie, la surveillance et la caractérisation des propriétés et processus hydrogéologiques. L'hydrogéophysique est de plus en plus utilisée pour de multiples applications environnementales telles que l'estimation de ressources locales en eau souterraine, la caractérisation de sites contaminés ou de sites d'enfouissement, l'étude préalable à l'installation de systèmes géothermiques peu profonds ([17], [18], [19], [20], [21], [22], [23] et [24] parmi d'autres).

1.6 Contenu de cet ouvrage

Outre cette introduction, le contenu de ce livre est divisé en douze chapitres.

Le **chapitre 2** présente les équations du cycle de l'eau et du bilan hydrique en accordant une attention particulière à l'évaluation de la recharge des aquifères et aux réserves drainables d'eau souterraine dans un bassin hydrologique. Les termes de précipitation et d'évapotranspiration réelle sont discutés en mettant l'accent sur les dangers de l'utilisation de valeurs moyennes. Les méthodes de fluctuation de la surface libre et de bilan massique des chlorures sont introduites pour l'évaluation de la recharge. L'interprétation des courbes de récessions en termes de débit de base est présentée pour estimer les réserves d'eau souterraine drainables dans un bassin.

La terminologie et différents exemples d'occurrences d'eaux souterraines sont présentés au **chapitre 3**, montrant l'importance d'une compréhension géologique approfondie pour en déduire l'information hydrogéologique préalable aux autres investigations.

Les principaux concepts et lois utilisés pour caractériser l'écoulement des eaux souterraines dans les milieux poreux géologiques saturés sont décrits au **chapitre 4**. La