

HYDROGÉOLOGIE QUANTITATIVE ET OPÉRATIONNELLE

De la théorie à la pratique

Yvan Rossier



Table des matières

Première partie : Aspects théoriques

Chapitre 1 - Écoulement	3
I. Potentiel hydraulique - Charge - Loi de Darcy - Emmagasinement	
- Équation de continuité	3
1. Potentiel hydraulique - Charge	4
2. Loi de Darcy - Aspect transmissif de l'aquifère	6
a. Expression de la loi de Darcy	6
b. Généralisation de la loi de Darcy	12
3. Emmagasinement - Aspect capacitif de l'aquifère	13
a. Emmagasinement nappe libre	13
b. Emmagasinement - Nappe captive	16
4. Emmagasinement et perméabilité - Équation de continuité	18
a. Expression de l'équation de continuité en nappe captive	19
b. Expression de l'équation de continuité en nappe libre	20
II. Analyse hydrogéologique	23
1. Définition	23
2. Schéma abstrait	24
3. Résolution	24
4. Lien entre schéma abstrait et résolution : réalisation	27
5. Réalité objective	30
6. Lien entre réalisation et réalité objective : confrontation	31
7. Production de résultats	31
8. Intention préalable	36
III. Solutions analytiques de l'équation de diffusivité	36
1 Régime permanent	36
a. Écoulement sans perturbation ou écoulement naturel	36
b. Écoulement autour d'un puits	43
c. Rabattement dans un puits en pompage	50

d. Tranchée	51
2. Régime transitoire	55
a. Écoulement autour d'un puits en nappe libre ou captive en dehors de tout écoulement naturel	56
b. Écoulement autour d'un puits en nappe semi captive en dehors de tout écoulement naturel	61
c. Écoulement autour d'un puits en nappe libre ou captive superposé à un écoulement naturel	64
d. Bassin d'infiltration	74
3. Superpositions et miroirs	79
a. Superpositions spatiales	79
b. Superpositions dans le temps : variation du débit de pompage	86
c. Miroirs et images	88
Chapitre 2 - Transfert de masse en solution	101
I. Processus de transport associés aux écoulements	101
II. Mécanismes de transport	102
1. L'advection	102
2. Diffusion moléculaire	104
3. Dispersion cinématique	105
III. Prise en compte des phénomènes d'adsorption et de dégradation simple	107
1. Adsorption	107
2. Cas de la dégradation du premier ordre	108
IV. Formulation générale advective-diffusive	109
V. Solutions des équations de transport	110
1. Approche numérique	110
2. Approche analytique	112
a. Cas unidimensionnel - Milieu semi-infini - Injection instantanée	113
b. Cas unidimensionnel - Milieu infini - Injection instantanée	115
c. Cas unidimensionnel - Injection continue - Milieu semi-infini ou réponse à un échelon de concentration	116

d. Solution unidimensionnelle - Milieu infini - Injection continue	119
e. Domaine bidimensionnel - Injection instantanée	124
f. Cas bidimensionnel - Injection continue	127
g. Domaine tridimensionnel - Injection instantanée et quasi ponctuelle	131
h. Espace tridimensionnel - Injection continue	136
i. Superposition spatiale	142
j. Créneau	143
k. Domaine radial convergent - Injection continue	145
l. Domaine radial convergent - Injection instantanée - Traçage	147
m. Exercices supplémentaires concernant le transfert de masse en solution	151
 Chapitre 3 - Transfert d'énergie - Géothermie basse température	 153
I. Processus de transport d'énergie associés aux écoulements	153
II. Mécanismes intervenant dans le transport d'énergie	154
1. La convection	154
2. La conduction	155
3. La dispersion cinématique ou la conduction thermique apparente ou équivalente dans l'aquifère	155
4. Quantité emmagasinée	157
5. Formulation générale convective-diffusive - Expression de l'équation régissant le transfert d'énergie	157
III. Solutions de l'équation du transfert d'énergie - Géothermie basse température sur aquifère	160
1. Solutions numériques	160
2. Solutions analytiques	166
a. Première solution	167
b. Seconde solution	169
c. Superpositions	172

Deuxième partie : Applications pratiques

Chapitre 4 - Rôle des différents paramètres intervenant dans le transfert de masse	177
I. Énoncé	177
1. Les outils nécessaires	177
2. Sensibilité sur les différents phénomènes intervenant dans le transfert de masse en solution	178
II. Corrigé	183
Chapitre 5 - Pratique et interprétation des essais de pompage	197
I. Énoncé et problématique	197
1. Nécessité d'acquérir des caractéristiques physiques	197
2. Pratique de l'essai de pompage	197
3. Les outils et données nécessaires	199
4. Choix des méthodes d'interprétation	200
a. Interprétation de Theis	201
b. Interprétation de Theis-Jacob	201
c. Interprétation de la remontée	202
5. Contrôle des résultats obtenus	203
II. Corrigé	204
1. Interprétations	205
a. Interprétation selon la méthode de Theis-Jacob	205
b. Interprétation selon la méthode de Theis	206
c. Interprétation de la remontée de Theis	207
2. Contrôle des résultats obtenus	208
a. Contrôle des résultats issus de la méthode de Theis-Jacob	208
b. Contrôle des résultats issus de la méthode de Theis	209
c. Contrôle des résultats issus de la méthode de la remontée de Theis	211

Chapitre 6 - Questionnements divers	215
I. Énoncé	215
1. Compréhension de divers aspects théoriques	215
2. Détermination de l'aptitude d'un ouvrage à être utilisé dans une barrière hydraulique	216
3. Impact sur un aquifère de remblais contaminés déposés dans une carrière	218
4. Faisabilité d'un système de pompes à chaleur	221
II. Corrigé	221
1. Compréhension de divers aspects théoriques	221
2. Détermination de l'aptitude d'un ouvrage à être utilisé dans une barrière hydraulique	223
3. Impact sur un aquifère de remblais contaminés déposés dans une carrière	227
4. Faisabilité d'un système de pompes à chaleur	232
Chapitre 7 - Superpositions et miroirs	237
I. Énoncé	237
1. Superpositions - Premières applications	237
2. Rabattement de nappe	238
3. Dimensionnement et impact d'un système ouvert de géothermie basse énergie	242
II. Corrigé	244
1. Superpositions - Premières applications	244
2. Rabattement de nappe	248
3. Dimensionnement et impact d'un système ouvert de géothermie basse énergie	256
Chapitre 8 - Dimensionnement d'un système de remédiation par pompage	263
I. Énoncé	263
II. Corrigé	266

Chapitre 9 - Transfert de masse en solution	273
I. Énoncé	273
1. Transfert de masse depuis un site potentiellement contaminé	273
2. Transfert de masse - Aquifère Drac-Isère	278
II. Corrigé	280
1. Transfert de masse depuis un site potentiellement contaminé	280
2. Transfert de masse - Aquifère Drac - Isère	287
Annexes	
I. Outils permettant de rendre compte de la distribution des écoulements	303
II. Établissement d'une carte piézométrique	304
III. Procédures pour la mise en œuvre d'essais de pompage	309
1. Ce que l'on cherche	309
2. Cas où la transmissivité nous intéresse seule	309
3. En plus de la transmissivité, on veut avoir accès au coefficient d'emmagasinement	310
4. Reconnaissances des caractéristiques physiques de l'aquifère et des conditions aux limites	311
5. Reconnaissance des caractéristiques physiques d'un aquifère hétérogène	311
6. Détermination de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement	312
7. Utilisation de la dérivée	312
Références	319
Scripts Python	323
I. Liste des scripts utilisés dans cet ouvrage	323
II. Scripts python	324
1. Nappe_captive_écoulement_naturel_dupuit	324

2. Nappe_libre_ecoulement_naturel_dupuit	325
3. Compare_libre_captif-ecoulement-natuel-dupuit	326
4. Nappe_capt_ecoulement_puits_dupuit	327
5. Nappe_libre_ecoulement_puits_Dupuit	328
6. Tranchée_v2.py	330
7. Debit_tranchee.py	332
8. Theis.py	333
9. Theis_temps.py	334
10. Theis_distance.py	336
11. Theis_distance_contour	337
12. SemiCaptif_libre.py	339
13. Theis-ecoulementNaturel_sansLignesDeCourant.py	340
14. capture.py	341
15. isochrones.py	343
16. isochrones_unPoint.py	344
17. Hantush_infiltration_VueDeDessus	345
18. Hantush_infiltration_VueDeDessus_gradient_naturel	347
19. Hantush_Infiltration_UneCoupe_gradient_naturel.py	350
20. Hantush_Infiltration_montée.py	353
21. PlusieursPuitsHBis.py	354
22. Puits_multiples_rabattements_Aux_puits.py	356
23. Remontée_selon_hollandais.py	359
24. Diffusion_pure_1D.py	360
25. C_1D_continu_distance.py	361
26. C_1D_instantanée_distance.py	363
27. C_1d_continu_temps	365
28. C_1d_instantane_temps.py	366
29. C_1d_continu_temps_semi_inf_VG.py	368
30. Convolution_1D_Infini_Continue_Creneau.py	370
31. Instantanee_2D.py	372
32. 2D_instantané_panacheEtEvolPoints.py	373
33. Continu_2d.py	375
34. 2D-Continu-EvolutionDeCENUnpoint-FonctionDuTemps.py	376
35. Domenico_3D_XY_inst.py	379
36. Domenico_3D_XZ_inst.py	382
37. Domenico_3D_YZ_inst.py	384
38. Domenico_3D_temps_instantanee.py	387

39. Domenico_3D_XY.py	389
40. Domenico_3D_XZ.py	391
41. Domenico_3D_YZ.py	394
42. Domenico_3D_temps.py	396
43. Domenico_3D_XY_superposition.py	399
44. Radial_Convergent_RaimondiEtLau.py	401
45. Radial_convergent_observe_calcul	403
46. Transfert_radial_convergent.py	405
47. Pompage_scatter_theis	406
48. GeothermieOuvert-Kinzelbach.py	408
49. GeothermieOuvert-Kinzelbach-temps	410
50. GeothermieOuvert-kinzelbach-superposition	411
51. GeothermieOuvert-modelePlan	414