



Olivier Atteia

CHIMIE ET POLLUTIONS

DES EAUX SOUTERRAINES

Lavoisier
TEC & DOC

2-628-3-1

2-628-3-1



Chimie et pollutions des eaux souterraines

Olivier Atteia

Professeur

ENSEGID (École Nationale Supérieure en Environnement,
Géoressources et Ingénierie du Développement durable)
Institut Polytechnique de Bordeaux

Table des matières

Introduction	IX
--------------------	----

Première partie

Chimie des milieux

Chapitre 1

Les grands processus

1. Cycle de l'eau	3
2. Pourquoi l'eau de pluie est-elle acide... ?	5
3. ...et la mer est-elle salée ?	10
3.1. Solubilité	11
3.2. Utilisations du produit de solubilité	12
4. Énergie et vivant	14
5. Pollutions, quantités et vecteurs	15

Chapitre 2

Le sol, interface majeure de l'environnement

1. Le matériau de base : les roches et les minéraux en grain	20
1.1. Granites et gneiss	20
1.2. Basaltes et roches basiques	21
1.3. Roches carbonatées	21
1.4. Évaporites	22
1.5. Molasse, brèches et conglomérats	22

1.6. Oxydes et hydroxydes	22
2. Grands types de sols	22
2.1. Rendzines, ranker, andosols et sols peu développés	24
2.2. Sols bruns	24
2.3. Podzols	25
2.4. Gleys et pseudo-gleys	25
2.5. Sols calcaires et calciques	26
2.6. Tourbières.	26
2.7. Toposéquences.	27
3. Couleur, texture et structure	27
3.1. Couleur	27
3.2. Texture	27
3.3. Structure.	28
4. Constituants des sols	29
4.1. Argiles.	29
4.1.1. Briques de base	30
4.1.2. Calcul des charges dans les argiles	30
4.1.3. Gibbsite et brucite	31
4.1.4. Kaolinite et structures similaires.	31
4.1.5. Minéraux 2:1 : illites, smectites et vermiculites	32
4.1.6. Chlorite et interstratifiés.	32
4.1.7. Sépiolite et palygorskite (attapulgite).	34
4.2. Carbone et matière organique.	34
4.2.1. Origine	34
4.2.2. Composition et difficultés d'analyse	35
5. Altération et acidification des sols.	37
5.1. Diagrammes d'équilibre	37
5.1.1. Construction des diagrammes d'équilibre	38
5.1.2. Utilisation des diagrammes d'équilibre	39
5.2. Échange d'ions.	40
5.3. Acidification et évolution des sols	44
6. Activité biologique des sols	47
6.1. Distribution des êtres vivants	47
6.2. Flux de matière recyclés par la végétation	48
Références bibliographiques	50

Chapitre 3

Aquifères karstiques

1. Relief karstique	53
2. Chimie des eaux.	55
3. Dissolution des carbonates	55
3.1. Système ouvert	56
3.2. Système fermé	57
3.3. Comparaison des deux systèmes	58
4. Précipitation des carbonates, stalactites, stalagmites et sources incrustantes	59
5. Réseau karstique et écoulement	60

6. Variation de la composition chimique des eaux	62
7. Traçage	63
8. Comportement lors des crues	64
9. Transport de polluants et vulnérabilité	65
Références bibliographiques	68

Chapitre 4

Aquifères poreux superficiels

1. Écoulement et transport dans les nappes	71
1.1. Loi de Darcy	71
1.2. Transport	74
1.3. Résolution des équations	76
1.4. Phase solide et facteur de retard	81
1.5. Modèles numériques	82
2. Réactions chimiques majeures dans les nappes	85
2.1. Les échanges avec les sols	85
2.2. Réactions d'oxydoréduction	86
2.3. Séquence redox	86
2.4. Oxygène	87
2.5. Azote	88
2.6. Fer	89
2.7. Soufre	90
2.8. Carbone	91
2.9. Hydrogène	93
2.10. Séquence redox et concept de PFAE	94
2.11. Relations entre réactions redox et acide-base	95
Références bibliographiques	97

Chapitre 5

Aquifères profonds – Des temps de résidence de milliers d'années

1. Hydrodynamique des nappes profondes	99
1.1. Confinement et compressibilité	100
1.2. Systèmes aquifères multicouches des bassins sédimentaires	101
1.3. Des structures géologiques parfois complexes	102
1.4. Paléohydrogéologie	103
2. Des compositions d'eaux très variées	104
3. Processus physicochimiques modifiant la composition de l'eau	106
3.1. Mélange d'eaux	106
3.2. Diffusion	107
3.3. Échange avec les épontes	108
3.4. Osmose	109
3.5. Équilibres eau-roche	110
3.5.1. Indice de saturation	110
3.5.2. Minéraux très solubles	112
3.5.3. Réactions redox	113

3.5.4. Équilibre des carbonates	114
3.5.5. Silicates	115
3.5.6. Équilibres multiples	116
3.5.7. Calcite et dolomite	117
3.6. Échange d'ions	118
3.7. Éléments traces	119
4. Utilisation des isotopes	120
4.1. Origines des isotopes	120
4.2. Datation	122
4.3. Isotopes stables d'éléments majeurs	123
4.4. Éléments traces et gaz rares	124
4.5. Séries radioactives de l'uranium	125
5. Application de la géochimie à la gestion des nappes profondes	125
5.1. Origine de la salinité	125
5.2. Évolution progressive des teneurs	126
5.3. Modélisation	127
6. Eaux thermales et géothermomètres	129
Références bibliographiques	131

Deuxième partie

Pollutions diffuses

Chapitre 6

Les polluants – Modes d'apport et de transfert

1. Classer les pollutions	137
2. Apports atmosphériques	140
2.1. Les eaux de pluies à l'intérieur des terres	140
2.2. Activités anthropiques	141
2.3. Dépôts secs et humides	142
2.4. Pluies acides	144
3. Notions d'écoulements dans la zone non saturée	146
3.1. Dynamique générale de l'eau dans les sols	146
3.2. Quelques bases théoriques	148
3.2.1. Remontée capillaire	148
3.2.2. Relation entre potentiel et teneur en eau	149
3.2.3. Conductivité hydraulique et loi d'écoulement	151
3.3. Processus à l'échelle d'une parcelle	152
3.3.1. Méthodes de mesure	152
3.3.2. Infiltration et ressuyage	155
3.3.3. Évapotranspiration	156
3.3.4. Ruissellement	158
4. Modèles numériques	160
Références bibliographiques	162

Chapitre 7

Nitrates et cycle de l'azote

1. Rôle des nutriments	165
2. Cycle de l'azote	166
2.1. Nitrification	167
2.2. Dénitrification	168
2.3. Minéralisation et réorganisation	170
3. Stocks et flux d'azote sur les parcelles agricoles	173
4. Approche à plus grande échelle	178
5. Modèles numériques	180
Références bibliographiques	182

Chapitre 8

Pesticides

1. Substances, quantités épandues et contaminations des eaux	185
2. Toxicité et valeurs limites	187
3. Un transport facilité vers les eaux de surface et l'atmosphère	190
3.1. Ruissellement	190
3.2. Exemple régional	192
3.3. Volatilisation et « <i>spray-drift</i> »	193
3.4. Modes d'action	194
4. Devenir dans les sols	195
4.1. Sorption	195
4.2. Écoulement préférentiel dans les sols	196
4.3. Dégradation dans le sol	197
4.4. Modélisation	200
5. Estimer le risque pour les eaux souterraines	203
5.1. Substances phares	203
5.2. Quantités de pesticides et paramètres majeurs	203
5.3. Indice global	204
5.4. Transport dans les nappes	207
Références bibliographiques	208

Troisième partie

Pollutions ponctuelles

Chapitre 9

Sites pollués – De la toxicité au calcul de risque

1. Toxicité	213
1.1. Toxicité aiguë	214
1.2. Toxicité des substances cancérigènes	215
1.3. Exposition et dose reçue	216

1.4. Calcul du risque	218
1.5. Toxicités spécifiques	219
1.6. Différences entre toxicité et valeurs limites	220
2. Sites pollués	220
3. Différentes approches du risque	221
4. Règlementation française	223
4.1. Rappel sur l'ancien (ESR EDR) et retour d'expérience	223
4.2. Connexion avec la réglementation existante	224
4.3. Grands principes	224
4.3.1. Mesures d'urgence	224
4.3.2. Schéma conceptuel	224
5. IEM 225	
6. Plan de Gestion	227
7. SSL (<i>Soil Screening Levels</i>)	228
8. EQRS et ARR	230
Références bibliographiques	232

Chapitre 10

Polluants métalliques et éléments traces

1. Introduction	235
2. Groupes d'éléments et concentrations moyennes	236
3. Origine des métaux	239
3.1. Apports atmosphériques	239
3.2. Apports provenant de l'épandage agricole	240
3.3. Apports d'origine industrielle	241
3.4. Modification des cycles biogéochimiques	242
3.5. Boues d'épuration	242
4. Comportement physicochimique	244
4.1. Diagrammes pe-pH	247
4.1.1. Intérêt et limites des diagrammes	247
4.1.2. Construction des diagrammes pe-pH	248
5. Sorption	252
6. Complexation	256
7. Spécificité de certains métaux	257
7.1. Arsenic	257
7.2. Chrome	259
7.3. Plomb	261
7.4. Cuivre	262
7.5. Cadmium et zinc	263
8. Nappes contaminées	264
8.1. Arsenic et chrome	264
8.2. Métaux lourds et matière organique	265
8.3. Mines acides	266
Références bibliographiques	269

Chapitre 11

Pollutions organiques

1. Classification	273
1.1. Dérivés pétroliers et BTEX.	275
1.2. Solvants chlorés	276
1.3. Phénols et autres substances organiques	276
1.4. HAP, PCB, furanes et dioxines.	276
2. Propriétés physiques	277
2.1. Densité	277
2.2. Solubilité	278
2.3. Volatilisation et diffusion	280
2.4. Hydrophobicité et sorption.	282
2.5. Distribution entre phases	284
3. Développement des panaches de pollution	285
3.1. Zone source	285
3.2. Forme des panaches, traceurs et retard.	287
4. Zonage redox.	289
4.1. Modélisation des réactions redox au sein d'un panache	291
4.2. Bilan d'électrons	293
4.3. Évolution temporelle.	294
4.4. Méthode d'investigation	294
Références bibliographiques	296

Quatrième partie

Approfondissement et applications

Chapitre 12

Législation, prélèvement et analyses

1. La législation française concernant les qualités des eaux	301
1.1. Comment est structurée la loi	301
1.2. Les domaines d'intervention des différentes lois	302
1.3. La loi sur l'eau	302
1.3.1. Forages et captages.	303
1.3.2. Rejets	303
1.3.3. Distribution	304
1.3.4. Analyse et prélèvement.	304
1.3.5. Information et actions.	304
1.4. La loi sur les ICPE	304
1.4.1. Infrastructures	305
1.4.2. Contrôle des émissions	305
1.4.3. Surveillance	306
1.5. Lois sur les déchets	306
1.6. Épandage des boues	308

1.7. Contrôle des émissions d'origine agricole	308
1.8. Organismes de contrôle	309
1.9. Situation vis-à-vis des sols pollués	311
2. Un prélèvement des eaux adapté	312
2.1. Quand et où prélever ?	312
2.2. Mesures dans les sols	315
2.3. Mesures à effectuer sur site	316
2.4. Potentiel redox	318
2.5. Particules et filtration	319
2.6. Prétraitement des échantillons avant analyse	320
3. Qualité analytique	321
3.1. Introduction	321
3.2. Types d'analyses, préparation	321
3.3. Qualité d'une analyse	322
3.3.1. Limite de détection d'un appareil	322
3.3.2. Reproductibilité	323
3.3.3. Exactitude	324
3.3.4. Standards	324
3.3.5. Interférences	324
3.3.6. Matrice	325
3.3.7. Polluants organiques	325
Références bibliographiques	325

Chapitre 13

Réhabilitation des sites pollués

1. Classification des techniques de réhabilitation	327
2. Excavation et confinement	328
3. Techniques physiques	329
4. Traitement sur site	333
5. Réactions chimiques <i>in situ</i>	334
5.1. Injection de réactifs	334
5.2. Barrière réactive	336
6. Techniques spécifiques aux métaux	338
7. Biodégradation <i>in situ</i> et atténuation naturelle	340
7.1. Principe	340
7.2. Dégradation des BTEX	340
7.3. Dégradation des solvants chlorés	341
7.4. Zonage et cinétique mesurées <i>in situ</i>	342
7.5. Modélisation	344
7.6. Ajouts de réactifs, l'atténuation naturelle « influencée »	345
7.7. Limites de la méthode	345
7.8. Une méthodologie d'approche de l'atténuation naturelle	346
8. Conclusion	347
Références bibliographiques	348

Chapitre 14

Compléments de chimie

1. Thermodynamique d'une réaction chimique	351
1.1. Combinaison des réactions	353
1.2. Relations entre activité et concentration	354
2. Échanges entre phases	355
2.1. Dissolution et précipitation	355
2.2. Équilibre gaz-solution	357
2.3. Équilibres avec une phase organique	358
3. Acides et bases	359
3.1. pH	360
3.2. pKa	360
3.3. Courbes de titrage	360
3.4. Calculer le pH de solutions types	362
3.5. Carbonates	364
3.5.1. Système gaz-liquide	365
3.5.2. Équilibres en phase liquide	365
3.5.3. Équilibres liquide-solide	366
3.5.4. Système ouvert-système fermé	367
3.6. Composition de l'eau en système ouvert	367
3.6.1. En l'absence de calcite	367
3.6.2. En présence de calcite	368
3.7. Composition de l'eau en système fermé	369
4. Complexation	370
5. Réactions d'oxydoréduction	373
5.1. Nombre d'oxydation et écriture des réactions	373
5.2. Énergie des réactions et potentiel redox	375
5.3. Échelle des potentiels	376
5.4. p_e	379
6. Notions de cinétique des réactions	380
7. Réactions de surface	382
7.1. Complexation	382
7.2. Adsorption et pH_{zpc}	382
7.3. Types de surfaces	384
7.4. Rôle du pH	385
7.5. Isothermes	386
Références bibliographiques	387

Chapitre 15

Modèles géochimiques

1. Hypothèses de base	389
2. Résolution des équations	390
3. Méthode de travail	392
4. Exemples	393
4.1. Complexes	393

4.2. Précipitation de calcite, entartrage-incrustation	394
4.3. Équilibres multiples et température.	398
4.4. Géothermomètres	400
4.5. Échange d'ions et adsorption.	401
4.6. Matière organique et séquence redox.	405
4.7. Dégradation des BTEX	407
4.8. Dégradation séquentielle des solvants chlorés.	407
4.9. Diagrammes pe-pH et modèle géochimique	410
4.10. Transport réactif : le cas d'une mine acide	412
4.11. Autres potentialités des modèles.	414
Références bibliographiques	414

Annexes

Annexe 1	418
Annexe 2	420
Index	421