

Laura Sigg
Philippe Behra
Werner Stumm



Chimie des milieux aquatiques

Cours et exercices corrigés

5^e édition

RESSOURCES



NUMÉRIQUES

Master
Écoles d'ingénieurs

DUNOD

TABLE DES MATIÈRES

Préface	IX
Prologue	XI
Avant-Propos	XII
Remerciements	XV
Chapitre 1. La composition chimique des eaux naturelles	1
1.1 Introduction	1
1.2 Cycle global de l'eau	2
1.3 Les processus d'altération	4
1.4 Interaction entre les organismes et l'eau	4
1.5 Processus chimiques et composition des eaux	7
1.6 L'eau et ses propriétés particulières	12
Exercices d'application	17
Chapitre 2. Acides et bases	23
2.1 Introduction	23
2.2 Théorie acide-base	24
2.3 La force d'un acide ou d'une base	25
2.4 Concentrations des acides et des bases en fonction du pH	27
2.5 Les calculs d'équilibre	29
2.6 pH en tant que variable principale ; diagramme log-log pour la représentation et la solution des problèmes d'équilibre	35
2.7 Courbes de titrage acide-base	43
2.8 La capacité de neutralisation d'un acide et d'une base	46
2.9 Convention de pH et d'activité	47
2.10 Précipitations atmosphériques acides	51
Exercices d'application	56

Table des matières

Chapitre 3. Équilibres des carbonates	58
3.1 Introduction	58
3.2 Systèmes des carbonates ouvert et fermé ; modèles pour les eaux naturelles	60
3.3 Alcalinité et acidité	73
3.4 Le pouvoir tampon du système carbonaté	79
3.5 Dosage analytique de l'alcalinité et de l'acidité	80
Exercices d'application	85
Chapitre 4. Interactions eau - atmosphère	88
4.1 Introduction	88
4.2 Équilibres gaz-eau ; signification pour la chimie des nuages, des pluies et des brouillards	89
4.3 La genèse d'une gouttelette de brouillard	104
4.4 Aérosols	106
4.5 Acidification et restauration des eaux de surface	108
Exercices d'application	115
Chapitre 5. Application des données thermodynamiques et de la cinétique	117
5.1 Données thermodynamiques	117
5.2 Enthalpie libre de réaction, potentiel chimique et équilibre chimique	117
5.3 Calcul des constantes d'équilibre à d'autres températures et pressions	122
5.4 Cinétique - Introduction	124
5.5 Réactions élémentaires	128
5.6 Théorie de l'état de transition ; le complexe activé	135
5.7 Étude d'un cas : hydratation de CO ₂	137
5.8 Exemple : Cinétique d'absorption de CO ₂ ; échange gazeux entre l'atmosphère et l'eau	139
Exercices d'application	142
Chapitre 6. Métaux en solution aqueuse	145
6.1 Introduction	145
6.2 La chimie de coordination et sa signification pour la spéciation des ions métalliques dans les eaux naturelles	146
6.3 Calculs d'équilibre de la complexation des métaux	152
6.4 Modèles simples pour la spéciation des métaux dans les eaux naturelles	160
6.5 Complexation avec les acides humiques et fulviques	163
6.6 Formation de complexes avec des colloïdes et particules	168
6.7 Solubilité des métaux	168
6.8 Cinétique de la complexation	169

6.9	Spéciation et détermination analytique	172
6.10	Interactions des métaux avec les algues	174
	Exercices d'application	180
Chapitre 7. Précipitation et dissolution ; activité des phases solides		183
7.1	Introduction : précipitation et dissolution des phases solides en tant que mécanisme de régulation de la composition des eaux naturelles	183
7.2	Équilibres de solubilité des hydroxydes	186
7.3	Solubilité des carbonates	188
7.4	Solubilité des sulfures	192
7.5	Solubilité de SiO_2 et des silicates	193
7.6	Influence de la température, de la force ionique, de la pression et de la taille des particules sur la solubilité	198
7.7	Quelle phase solide contrôle la solubilité ?	199
7.8	Les phases solides sont-elles en équilibre de solubilité ?	207
7.9	Cinétique de germination et de dissolution d'une phase solide	210
	Exercices d'application	214
Chapitre 8. Réactions d'oxydoréduction		216
8.1	Introduction	216
8.2	Définitions - Oxydation et réduction	217
8.3	Le cycle global des électrons (photosynthèse, respiration)	218
8.4	Équilibre d'oxydoréduction et intensité d'oxydoréduction	221
8.5	Calculs simples des équilibres d'oxydoréduction	225
8.6	Réactions d'oxydoréduction catalysées par des microorganismes	232
8.7	Cinétique des processus d'oxydoréduction	238
8.8	Oxydation par l'oxygène	250
8.9	Réactions photochimiques d'oxydoréduction	254
8.10	Mesure du potentiel d'oxydoréduction dans les eaux naturelles	260
8.11	Électrode de verre ; électrodes ioniques spécifiques	264
8.12	Utilisation d'oxydants pour la désinfection de l'eau	265
	Exercices d'application	269
Chapitre 9. Chimie aux interfaces		273
9.1	Introduction	273
9.2	Particules dans les eaux naturelles	274
9.3	Interactions à l'interface solide-eau	276
9.4	Sorption à partir de la solution	278
9.5	Surfaces d'oxydes	282

Table des matières

9.6	Charge électrique de surface	288
9.7	Minéraux argileux - Échange d'ions	294
9.8	Spectroscopie moléculaire d'espèces chimiques adsorbées	300
9.9	Chimie de surface et réactivité ; cinétique de dissolution et formation de phases solides	303
9.10	Stabilité des colloïdes	313
9.11	Sorption des composés hydrophobes	317
9.12	Nanoparticules manufacturées	319
9.13	Conclusions et limites	320
	Exercices d'application	322
Chapitre 10. Traitement de l'eau ; applications des processus aux interfaces		329
10.1	Introduction	329
10.2	Floculation, coagulation	330
10.3	Filtration	338
10.4	Flottation	345
10.5	Adsorption sur charbon actif	345
10.6	Corrosion des métaux : processus électrochimiques	347
Chapitre 11. Les eaux souterraines : cas du transport réactif		353
11.1	Introduction	353
11.2	Mécanismes physico-chimiques influençant le transport des métaux	357
11.3	Considérations hydrodynamiques	363
11.4	Lien entre le terme de sorption et la concentration en solution ?	368
11.5	Modélisation du transport réactif de solutés en traces : couplage chimie-transport	383
11.6	Cinétique de transfert de matière entre les phases liquide et solide	387
11.7	Exemple de migration de micropolluants métalliques	391
11.8	Transport de colloïdes	403
	Exercices d'application	406
	Appendice	410
Chapitre 12. Cycles biogéochimiques des éléments dans les milieux aquatiques		411
12.1	Répartition de substances dans l'environnement	411
12.2	Régulation biologique de la composition des eaux naturelles	412
12.3	Cycle du carbone	413
12.4	Cycle biogéochimique du phosphore	420
12.5	Cycle de l'azote ; problèmes causés par les composés de l'azote	421
12.6	Cycle global du soufre	428

12.7 Cycles d'éléments traces métalliques dans les eaux	429
12.8 Illustration du cycle biogéochimique d'un élément trace volatil : le mercure	436
12.9 Composés xénobiotiques dans les milieux aquatiques	440
12.10 Processus biogéochimiques dans les lacs	452
12.11 Processus biogéochimiques dans les rivières	461
Exercices d'application	471
Solutions numériques des exercices	473
Annexe 1	480
Annexe 2	481
Références bibliographiques	487
Index	497