

Table des matières

PARTIE 1	1
PRINCIPES FONDAMENTAUX DE LA GEOCHIMIE DES EAUX	1
Chapitre 1 – La matière : de l’atome à la molécule	3
1 – 1 – Structure de la matière	3
1 – 1 – 1 – Atome	3
1 – 1 – 2 – Élément – masse atomique	4
1 – 1 – 3 – Nuage électronique	5
1 – 1 – 4 – Remplissage des niveaux énergétiques	6
1 – 2 – Propriétés de l’atome	8
1 – 2 – 1 – Dimension	8
1 – 2 – 2 – Énergie d’ionisation	9
1 – 2 – 3 – Electronégativité.....	9
1 – 3 – Classification périodique des éléments	10
1 – 3 – 1 – Les gaz rares (colonne 18).....	11
1 – 3 – 2 – Les alcalins (colonne 1).....	12
1 – 3 – 3 – Les alcalino-terreux (colonne 2).....	12
1 – 3 – 4 – Les halogènes (colonne 17).....	12
1 – 3 – 5 – Famille du bore (colonne 13)	13
1 – 3 – 6 – Famille du carbone (colonne 14).....	13
1 – 3 – 7 – Famille de l’azote (colonne 15).....	13
1 – 3 – 8 – Famille de l’oxygène (colonne 16).....	14
1 – 3 – 9 – Les éléments de transition (colonnes 3 à 12).....	14
1 – 4 – La liaison chimique.....	15
1 – 4 – 1 – Définition – Orbitale moléculaire.....	15
1 – 4 – 2 – Moment dipolaire permanent	16
1 – 4 – 3 – Liaison covalente.....	17
1 – 4 – 4 – Liaison ionique.....	18
1 – 4 – 5 – Liaison covalente polarisée	18
1 – 4 – 6 – Liaison métallique	18
1 – 4 – 7 – Forces de van der Waals.....	18
1 – 5 – Les états de la matière - brefs rappels	20
1 – 5 – 1 – État gazeux	20
1 – 5 – 2 – État liquide	20
1 – 5 – 3 – État solide	20
1 – 6 – Exercices	21

1 – 7 – Correction	22
Chapitre 2 – Notions de thermodynamique – Notion d'équilibre.....	25
2 – 1 – Description d'un système thermodynamique.....	25
2 – 1 – 1 – Notion de système	25
2 – 1 – 2 – Variables d'état – variables thermodynamiques.....	26
2 – 1 – 3 – Fonctions d'état	27
2 – 1 – 4 – Equilibre thermodynamique	27
2 – 2 – Equilibre chimique – potentiel chimique	28
2 – 2 – 1 – Mélange de différentes phases	29
2 – 2 – 2 – Réaction chimique	29
2 – 3 – Potentiel chimique – Constante d'équilibre	30
2 – 3 – 1 – Cas des gaz parfaits	30
2 – 3 – 2 – Constante d'équilibre – Loi d'action de masse	30
2 – 3 – 3 – Phases condensées – solides et liquides	31
2 – 3 – 4 – Coefficient d'activité.....	31
2 – 4 – Détermination indirecte des fonctions d'état et de la constante d'équilibre	33
2 – 5 – Loi d'action de masse – Variations de $K_{(T,P)}$	34
2 – 5 – 1 – Variation de $K_{(T,P)}$ avec la température, $P = c^{te}$ et composition c^{te}	34
2 – 5 – 2 – Variation de $K_{(T,P)}$ avec la pression, $T = c^{te}$ et composition c^{te}	35
2 – 6 – Principes de modération - Facteur d'équilibre	36
2 – 6 – 1 – Loi de van't Hoff.....	37
2 – 6 – 2 – Loi de Le Châtelier.....	37
2 – 6 – 3 – Loi de Guldberg et Waage.....	37
2 – 7 – Exercices	38
2 – 8 – Correction	38
Chapitre 3 – La molécule d'eau.....	41
3 – 1 – Le solvant « eau »	41
3 – 2 – Les espèces solubles dans l'eau	43
3 – 3 – Les espèces insolubles – composés apolaires	43
3 – 4 – Les gaz et les solides.....	44
3 – 5 – Notions de concentration	45
3 – 5 – 1 – La mole.....	45
3 – 5 – 2 – Concentration d'un composé.....	45
3 – 5 – 3 – Concentration élémentaire - concentration moléculaire.....	45
3 – 5 – 4 – Electroneutralité	47
3 – 6 – Exercices	47
3 – 7 – Correction	47

Chapitre 4 – Réactions acido-basiques	49
4 – 1 – Définition	49
4 – 2 – Force d'un acide.....	50
4 – 3 – Fonctions multiples.....	50
4 – 4 – Propriétés acido-basiques de l'eau.....	51
4 – 5 – Calcul du pH de solutions simples.....	51
4 – 5 – 1 – Acides forts, bases fortes.....	51
4 – 5 – 2 – Acides faibles, bases faibles.....	51
4 – 5 – 3 – Exercices d'application	52
4 – 5 – 4 – Exercices d'application - Résolution.....	53
4 – 6 – Résolution graphique du calcul de pH.....	57
4 – 6 – 1 – Tracé d'un diagramme de Sillén	58
4 – 6 – 2 – Tracé d'un diagramme de Sillén - Résolution.....	58
4 – 7 – Systèmes acido-basiques naturels.....	62
4 – 7 – 1 – Couples actifs	62
4 – 7 – 2 – Réserve alcaline.....	62
4 – 7 – 3 – Système carbonate.....	63
4 – 8 – L'alcalinité : importance du système carbonate.....	65
4 – 8 – 1 – Définition	65
4 – 8 – 2 – Lien alcalinité réserve alcaline	66
4 – 8 – 3 – Contrôle de l'alcalinité et interprétation.....	67
4 – 9 – Exercices.....	68
4 – 10 – Correction	70
Chapitre 5 – Réactions d'oxydo-réduction.....	79
5 – 1 – Définition	79
5 – 2 – Caractéristiques.....	79
5 – 2 – 1 – Couple redox	79
5 – 2 – 2 – Bilan d'oxydo-réduction.....	80
5 – 2 – 3 – Potentiel redox.....	81
5 – 3 – Équilibre redox – Représentation graphique.....	81
5 – 3 – 1 – Notion de pe	81
5 – 3 – 2 – Diagramme de Sillén appliqué aux équilibres redox.....	82
5 – 3 – 3 – Exercice d'application.....	82
5 – 3 – 4 – Exercice d'application - Résolution	82
5 – 3 – 5 – Diagramme pe-pH.....	85
5 – 4 – Réactions d'oxydo-réduction en milieu naturel.....	85
5 – 4 – 1 – Propriété et stabilité redox de l'eau.....	85

5 – 4 – 2 – Incidence sur le comportement des éléments	86
5 – 4 – 3 – Occurrence d'une réaction redox.....	87
5 – 5 – Conditions redox et activité biologique	87
5 – 6 – Diversité de la matière organique	90
5 – 6 – 1 – Origine de la MO.....	90
5 – 6 – 2 – Caractérisation de la MO – substances humiques	91
5 – 6 – 3 – Caractérisation de la MO – rapports C/N/P/S	92
5 – 7 – Exercices	94
5 – 8 – Correction	95
Chapitre 6 – Réactions de dissolution-précipitation.....	101
6 – 1 – Définition	101
6 – 2 – Représentation des domaines de stabilité.....	102
6 – 3 – Influence du pH – Oxydes et hydroxydes	102
6 – 3 – 1 – Solubilité de l'hydroxyde de fer (III)	102
6 – 3 – 2 – Solubilité de la silice	103
6 – 4 – Influence de la pression – Fontaines pétifiantes	104
6 – 5 – Conditions de précipitation	105
6 – 5 – 1 – Retard à la précipitation	105
6 – 5 – 2 – Coprécipitation	106
6 – 5 – 3 – Coexistence de plusieurs phases minérales	109
6 – 6 – Avancement de l'interaction eau-roche	109
6 – 7 – Géothermomètres	111
6 – 7 – 1 – Géothermomètre du silicium	111
6 – 7 – 2 – Géothermomètre Na-K.....	112
6 – 7 – 3 – Géothermomètre Ca/K ²	113
6 – 7 – 4 – Géothermomètre Li/Na.....	114
6 – 8 – Exercices	114
6 – 9 – Correction	115
Chapitre 7 – Réactions de complexation	119
7 – 1 – Les complexes.....	119
7 – 2 – Diversité des ligands	120
7 – 3 – Complexes multiples – complexes mixtes	121
7 – 3 – 1 – Complexes multiples	121
7 – 3 – 2 – Complexes mixtes	123
7 – 4 – Quantification et prédiction des réactions.....	123
7 – 4 – 1 – Caractéristiques des ligands naturels.....	123
7 – 4 – 2 – Détermination analytique des caractéristiques des ligands	124

7 – 5 – Exercices	126
7 – 6 – Correction	126
Chapitre 8 – Interaction solide – solution	131
8 – 1 – Mécanismes de sorption/désorption	131
8 – 2 – Dissous, colloïdes, particules	132
8 – 3 – Diversité des phases sorbantes	132
8 – 3 – 1 – Les oxydes et hydroxydes métalliques	133
8 – 3 – 2 – Les argiles	134
8 – 3 – 3 – Les autres phases minérales, la matière organique et les bactéries ..	135
8 – 3 – 4 – Les particules mixtes	136
8 – 4 – Propriétés des surfaces sorbantes	136
8 – 4 – 1 – Développement d’une charge de surface	137
8 – 4 – 2 – Influence des conditions réactionnelles	137
8 – 5 – Mécanismes réactionnels	138
8 – 5 – 1 – Echange d’ions – coefficient de partage	138
8 – 5 – 2 – Isothermes d’adsorption	139
8 – 5 – 3 – Modèles de distribution d’affinité	141
8 – 5 – 4 – Modèles de complexation de surface	141
Chapitre 9 – Cinétique de la réaction chimique	143
9 – 1 – Définition quantitative de la vitesse de réaction	143
9 – 1 – 1 – Réaction simple	143
9 – 1 – 2 – Réactions homogènes – réactions hétérogènes	143
9 – 1 – 3 – Réaction réversible	144
9 – 1 – 4 – Ordre d’une réaction	144
9 – 2 – Réactions d’ordre 0	144
9 – 3 – Réactions d’ordre 1	145
9 – 4 – Réactions d’ordre 2	146
9 – 4 – 1 – Vitesse proportionnelle au carré d’un seul réactif	146
9 – 4 – 2 – Vitesse proportionnelle au produit des 2 réactifs	147
9 – 5 – Réactions réversibles	148
9 – 6 – Détermination de la vitesse d’une réaction	148
9 – 6 – 1 – Température - Energie d’activation	148
9 – 6 – 2 – Catalyseur, inhibiteur	149
9 – 6 – 3 – Mécanisme des réactions	149
9 – 7 – Oxydation/réduction du fer	150
9 – 7 – 1 – pH et température – équation de Nernst	150
9 – 7 – 2 – Force ionique, pH et température – Observations	151

9 – 8 – Exercices	153
9 – 9 – Correction	154
Chapitre 10 – Modélisation - Spéciation	159
10 – 1 – Des modèles pour quoi faire	159
10 – 2 – Spéciation – biodisponibilité – toxicité.....	160
10 – 3 – Biodisponibilité	162
10 – 4 – Spéciation : de la théorie à la pratique.....	165
PARTIE 2	169
GEOCHIMIE DES EAUX CONTINENTALES	169
Chapitre 1 – Origine et régulation de la composition des eaux continentales....	171
1 – 1 – Cycle de l'eau.....	171
1 – 1 – 1 – Propriété de l'eau - densité	171
1 – 1 – 2 – Répartition de l'eau entre les différents réservoirs.....	172
1 – 1 – 3 – Circulation des eaux – notion de bassin versant.....	173
1 – 2 – Evolution de la composition des eaux au cours de leur circulation.....	173
1 – 2 – 1 – Erosion - Altération.....	174
1 – 2 – 2 – Eléments majeurs / éléments traces	175
1 – 2 – 3 – Impact de la variation de la teneur en pCO ₂ atmosphérique	177
1 – 3 – Composition chimique des eaux de surface	180
1 – 3 – 1 – Dissous/particulaire	180
1 – 3 – 2 – Caractérisation des conditions redox d'une eau	181
1 – 4 – Rapides notions d'hydrologie et d'hydrogéologie.....	181
Chapitre 2 – Les eaux de pluies.....	183
2 – 1 – Origine de leur composition chimique.....	183
2 – 1 – 1 – Les aérosols.....	183
2 – 1 – 2 – Caractéristiques générales de la composition des eaux de pluies.....	184
2 – 2 – Variabilité temporelle et spatiale de la chimie des pluies	186
2 – 2 – 1 – Variabilité à l'échelle d'un événement pluvieux.....	186
2 – 2 – 2 – Variabilité saisonnière	187
2 – 2 – 3 – Etagement avec l'altitude.....	188
2 – 3 – Exercices	189
2 – 4 – Correction	191
Chapitre 3 – Les sols.....	193
3 – 1 – La formation des sols.....	193
3 – 2 – Cycle biogéochimique sous forêt	194
3 – 2 – 1 – Impact du couvert végétal sur les eaux d'infiltration	195
3 – 2 – 2 – Plantes et altération	197

3 – 2 – 3 – Activité microbienne et altération	197
3 – 2 – 4 – Plantes et organismes vivants associés.....	198
3 – 3 – Exercice	199
3 – 4 – Correction	199
Chapitre 4 – Les rivières et les fleuves.....	201
4 – 1 – Capacité de transport des fleuves.....	201
4 – 1 – 1 – Principaux fleuves mondiaux – volume d’eau	201
4 – 1 – 2 – Transport des matières en suspension	202
4 – 1 – 3 – Transport des substances dissoutes	206
4 – 2 – Variabilité temporelle	207
4 – 2 – 1 – Hydrologie.....	207
4 – 2 – 2 – Activité biologique – pH et oxygène dissous	209
4 – 2 – 3 – Activités humaines	211
4 – 3 – Exercices	213
4 – 4 – Correction	215
Chapitre 5 – Les lacs	221
5 – 1 – Circulation des eaux.....	221
5 – 1 – 1 – Bilan hydrique	221
5 – 1 – 2 – Compartiments acteurs	222
5 – 1 – 3 – Régime thermique - Stratification	222
5 – 1 – 4 – Classification des lacs	224
5 – 2 – Processus biologiques / chimiques.....	225
5 – 2 – 1 – Photosynthèse et respiration.....	225
5 – 2 – 2 – Evolution trophique d’un lac.....	226
5 – 3 – Les particules et les sédiments	227
5 – 3 – 1 – Les matières en suspension : colloïdes et particules	227
5 – 3 – 2 – Les sédiments	228
5 – 4 – Les lacs de zone aride	230
5 – 5 – Les lacs de barrage (réservoir).....	230
5 – 6 – Exercices	232
5 – 7 – Correction	235
Chapitre 6 – Comportement des nutriments	239
6 – 1 – Cycles en milieu continental.....	239
6 – 1 – 1 – Le carbone	239
6 – 1 – 2 – L’azote.....	240
6 – 1 – 3 – Le phosphore	241
6 – 2 – Eutrophisation	243

6 – 2 – 1 – Phosphore – Cas du Léman	244
6 – 2 – 2 – Rivières amont-aval - Action des STEP à Paris	245
6 – 2 – 3 – Phosphore et azote – Cas de la Loire moyenne	246
6 – 2 – 4 – Réhabilitation des lacs eutrophes et les sédiments	247
6 – 3 – Impact des zones humides	247
Chapitre 7 – Comportement des métaux traces et métalloïdes	251
7 – 1 – Transport sous forme dissoute – sous forme particulaire.....	251
7 – 1 – 1 – Eaux de sols.....	251
7 – 1 – 2 – Dans les rivières	252
7 – 2 – Importance du fer dans les systèmes aquatiques.....	253
7 – 3 – Lac de barrage – travaux de maintenance et crues.....	255
7 – 4 – Exercices	255
7 – 5 – Correction	260
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	263
ANNEXES	281
Annexe 1. Tableau de Mendeleïev	283
Annexe 2. Les différentes unités de mesures physiques (BIPM, 2019).	285
Annexe 3. Données thermodynamiques.....	289
INDEX	299