

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE	1
INTRODUCTION	5

PREMIÈRE PARTIE - EAUX ET SOLUTIONS

I - L'EAU ET SON POUVOIR SOLVANT	11
1. La molécule d'eau	11
2. Le pouvoir solvant de l'eau	16
II - LES ÉLÉMENTS EN SOLUTION AQUEUSE : DONNÉES GÉNÉRALES	21
1. Comportements élémentaires	21
1.1. Eléments alcalins et alcalino-terreux	21
1.2. Eléments de transition, notion de complexe	25
2. Complexants inorganiques	28
2.1. Composants anioniques OH^- et O^{2-}	29
2.2. Halogènes du groupe 17	29
2.3. Non-métaux du groupe 16	30
2.4. Le carbone, non-métal du groupe 14	34
2.5. Non-métaux des groupes 15 et 13	36
3. Complexants organiques	36
3.1. Interactions métal - substance organique	37
3.2. Substances organiques complexantes	38
3.3. Conditions d'action des complexants	40
4. Typologie de la complexation	43
4.1. Classification des ions de Pearson	44
4.2. Associations ioniques préférentielles	45
III - SOLUBILISATION ET DÉPÔT MINÉRAUX : DONNÉES GÉNÉRALES	47
1. Les entités en présence : solution, minéral et interface	47
1.1. Les solutions	47
1.2. Les minéraux	49
1.3. Les interfaces	52
2. Les phénomènes à l'interface minéral - solution	56
2.1. Interactions électrostatiques	56

2.2. Complexation de surface, les mécanismes.....	58
2.3. Complexation de surface, les modèles.....	61
2.4. Complexation de surface, l'approche structurale.....	64
2.4.1. <i>Complexation de surface des cations</i>	65
2.4.2. <i>Complexation de surface des anions</i>	70
2.4.3. <i>Complexation de surface organique</i>	73
2.5. Adsorption compétitive et co-adsorption.....	74
3. La dissolution minérale.....	78
3.1. Les mécanismes fondamentaux.....	78
3.2. Catalyseurs de la dissolution.....	81
3.2.1. <i>L'effet soluté</i>	81
3.2.2. <i>L'effet redox</i>	84
3.3. Inhibiteurs de la dissolution.....	86
3.4. Vitesse de dissolution.....	87
4. Le dépôt minéral.....	89
4.1. La précipitation minérale.....	90
4.2. La sorption.....	92
4.2.1. <i>L'absorption</i>	93
4.2.2. <i>La précipitation de surface</i>	95
4.2.3. <i>Sorption organique</i>	102

DEUXIÈME PARTIE - LES FLUIDES HYDROTHERMAUX ET LA SPÉCIATION MÉTALLIQUE

IV - NATURE DES FLUIDES HYDROTHERMAUX.....	107
1. Définitions.....	107
2. L'origine de l'eau, composé volatil majeur.....	107
2.1. Analyse isotopique de l'eau : notation, standards et paramètres isotopiques.....	108
2.2. Les grands types d'eaux naturelles : caractéristiques isotopiques.....	111
2.2.1. <i>L'eau océanique (marine)</i>	111
2.2.2. <i>Les eaux météoriques</i>	115
2.2.3. <i>Les eaux interstitielles</i>	116
2.2.4. <i>Les eaux métamorphiques</i>	117
2.2.5. <i>Les eaux magmatiques</i>	119
2.2.6. <i>L'eau organique</i>	120
2.3. L'eau dans les systèmes-source.....	120
2.3.1. <i>La source hydrosphérique</i>	121
2.3.2. <i>Les sources sédimentaires et métamorphiques</i>	121
2.3.3. <i>La source magmatique</i>	123
2.4. Les systèmes hydrothermaux actifs : caractéristiques isotopiques.....	128

3. Les constituants volatils moléculaires mineurs	130
3.1. Espèces moléculaires volatiles mineures des fluides magmatiques.....	131
3.1.1. <i>Les gaz volcaniques</i>	132
3.1.2. <i>Les inclusions fluides magmatiques</i>	135
3.1.3. <i>Modélisation thermodynamique</i>	136
3.1.4. <i>Les éléments volatils mineurs dans les magmas</i>	137
3.2. Molécules volatiles des fluides métamorphiques	142
4. Sels majeurs dissous et constituants anioniques	143
4.1. Compositions des fluides hydrothermaux s.s.	144
4.2. Sources des solutés des fluides géothermaux	146
4.3. Géochimie isotopique du soufre et du carbone dans les fluides hydrothermaux	150
4.4. Un homologue expérimental des fluides hydrothermaux : le système NaCl - H ₂ O.....	153
V - PHYSICO-CHIMIE DES FLUIDES HYDROTHERMAUX	161
1. Le pH : valeurs, sources et contrôles de l'acidité	161
1.1. Les pH mesurés.....	161
1.2. Sources de l'acidité.....	163
1.3. Contrôle de l'acidité ; les réactions d'éponte.....	167
1.3.1. <i>Assemblages minéraux et types d'altération</i>	167
1.3.2. <i>Assemblages minéraux-tampon de pH, capacité-tampon de pH des fluides</i>	168
2. Les conditions redox.....	170
VI - LA SPÉCIATION ÉLÉMENTAIRE HYDRIQUE	177
1. Les facteurs de la spéciation hydrique	178
2. Spéciation hydrique des éléments principaux des gangues : Si (Ge), Al (Ga), Ca, Mg, (Ba, Sr), alcalins	181
2.1. Le silicium, Si, et le germanium, Ge.....	181
2.2. L'aluminium, Al, et le gallium, Ga	186
2.3. Les alcalins : sodium Na, potassium K, césium Cs, rubidium Rb, lithium Li.....	195
2.4. Le béryllium, Be	196
2.5. Le calcium, Ca, le baryum, Ba, et le strontium, Sr.....	198
2.6. Le magnésium, Mg.....	202
3. Spéciation hydrique des métaux "ferreux" : Fe, Mn, Ni, Co, V, Ti, (Cr).....	203
3.1. Le titane, Ti.....	203
3.2. Le fer, Fe	204
3.3. Le manganèse, Mn.....	206
3.4. Le nickel, Ni, et le cobalt, Co.....	209

3.5. Le vanadium, V	210
3.6. Le chrome, Cr	212
4. Spéciation hydrique des métaux précieux : Au, Ag, Pt, Pd.....	212
4.1. L'or, Au	212
4.2. L'argent, Ag	218
4.3. Les éléments du groupe du platine : platine, Pt et palladium, Pd	221
5. La spéciation hydrique des métalloïdes : Sb, As, Bi, Hg	226
5.1. L'antimoine, Sb	226
5.2. L'arsenic, As	229
5.3. Le bismuth, Bi.....	230
5.4. Le mercure, Hg	232
6. La spéciation hydrique des métaux "pneumatolytiques" : Sn, W, Mo.....	235
6.1. L'étain, Sn	235
6.2. Le tungstène, W.....	239
6.3. Le molybdène, Mo, et le rhénium, Re	242
7. La spéciation hydrique des métaux de base :	
Zn(Cd, In), Pb(Tl), Cu	243
7.1. Le zinc, Zn, le cadmium, Cd, et l'indium, In.....	243
7.2. Le plomb, Pb, et le thallium, Tl	249
7.3. Le cuivre, Cu	253
8. Spéciation hydrique des terres rares : Y, Sc, Nb et Ta, Zr et Hf	258
8.1. Lanthanides Ln, yttrium Y et scandium Sc.....	258
8.2. Le niobium, Nb, et le tantale, Ta.....	266
8.3. Le zirconium, Zr, et le hafnium, Hf.....	267
9. Spéciation hydrique des métaux radioactifs : U et Th.....	267
9.1. L'uranium, U.....	267
9.2. Le thorium, Th.....	273

TROISIÈME PARTIE - LES SYSTÈMES HYDROTHERMAUX

VII - LES SYSTÈMES HYDROTHERMAUX : DONNÉES GÉNÉRALES	277
1. Manifestations, dimensions et durée des systèmes hydrothermaux.....	277
2. Typologie des systèmes hydrothermaux.....	279
3. La mobilité hydrothermale	280
3.1. Voies de cheminement.....	281
3.2. Types de flux fluide.....	282
3.2.1. Les flux advectifs	282
3.2.2. Les flux convectifs.....	284
3.2.3. Les flux expulsifs	286
3.3. Vitesses de flux.....	290

VIII - LES SYSTÈMES HYDROTHERMAUX OCÉANIQUES	291
1. Le contexte géotectonique global.....	291
1.1. Les données de surface : types de rides et segmentations	291
1.2. Structure de la jeune croûte océanique.....	295
1.3. Construction de la croûte océanique.....	298
1.3.1. <i>Chambre magmatique et croûte gabbroïque</i>	298
1.3.2. <i>Complexe filonien et épanchements laviques</i>	305
2. Caractères généraux de l'hydrothermalisme océanique	310
3. La circulation hydrothermale passive :	
manifestations superficielles et caractères généraux du support.....	312
3.1. Les manifestations superficielles	312
3.2. Le facteur perméabilité	317
3.2.1. <i>Perméabilité de la croûte ignée</i>	317
3.2.2. <i>Perméabilité du revêtement sédimentaire</i>	319
4. La circulation hydrothermale passive : modèles mathématiques	321
4.1. Les modélisations globales.....	321
4.2. Modélisations régionales.....	325
4.3. Modélisations locales / multifactorielles.....	328
4.3.1. <i>L'effet sédiment</i>	328
4.3.2. <i>L'effet topographique</i>	331
4.3.3. <i>L'effet perméabilité</i>	333
5. La circulation hydrothermale active : manifestations de surface.....	333
5.1. Les dépôts métallifères	335
5.2. Les émissions fluides	337
5.2.1. <i>Les panaches chroniques</i>	338
5.2.2. <i>Les mégapanaches</i>	341
5.2.3. <i>Les suintements</i>	344
5.3. Distribution des champs hydrothermaux	345
5.4. Les budgets thermiques.....	346
5.5. Chronologie des manifestations superficielles.....	348
6. La circulation hydrothermale active : aspects principaux	350
6.1. Modèles conceptuels de circulation hydrothermale active.....	350
6.2. Sites d'implantation des systèmes hydrothermaux axiaux.....	354
6.3. Géométrie globale des systèmes hydrothermaux axiaux.....	356
6.4. Porosités et perméabilités.....	360
6.5. Sources thermiques	364
6.6. Altération crustale et zones de réactions hydrothermales	367
6.6.1. <i>Les zones de recharge</i>	368
6.6.2. <i>La zone de réaction de haute température (ZRHT) :</i>	
<i>conditions générales</i>	371

6.6.3. La zone de réaction de haute température (ZRHT) : <i>position dans l'espace</i>	372
6.6.4. La zone de réaction de haute température (ZRHT) : <i>les transferts thermiques et fluides</i>	375
6.6.5. Les zones de décharge.....	381
6.7. Caractères majeurs des fluides.....	383
6.7.1. Températures.....	383
6.7.2. Compositions chimiques globales.....	387
6.7.3. Salinités et chlorinités.....	393
6.8. Séparation de phases et mobilité des produits.....	395
6.8.1. Séparations de phases sous- et super-critiques.....	396
6.8.2. Cantonnement profond des saumures.....	398
6.9. Temps de résidence souterraine des fluides.....	403
6.10. Systèmes hydrothermaux axiaux et taux d'expansion des dorsales.....	404
7. La circulation hydrothermale active : modèles mathématiques.....	410
7.1. Les modèles de convection cellulaire.....	411
7.2. Les modèles tubulaires.....	427
7.2.1. Calculs de balance thermique.....	428
7.2.2. Contrôles de la perméabilité.....	430
7.2.3. Simulation de modèles conceptuels.....	433
IX - LES SYSTÈMES HYDROTHERMAUX CONTINENTAUX	439
1. Caractères généraux des systèmes hydrothermaux continentaux de connexion magmatique.....	440
1.1. Originalité des systèmes.....	440
1.2. Configuration générale des systèmes.....	442
1.3. Durée de vie des systèmes.....	445
2. Circulation hydrothermale profonde liée au magmatisme acide.....	446
2.1. Les modélisations mathématiques.....	447
2.2. Les systèmes dominés par l'eau liquide.....	453
2.2.1. Caractères généraux.....	453
2.2.2. Autoscellement et autorégulation.....	460
2.2.3. Altérations hydrothermales.....	461
2.3. Les systèmes dominés par l'eau-vapeur.....	462
2.3.1. Le modèle théorique.....	464
2.3.2. Le système géothermal des Geysers (Californie).....	465
2.3.3. Le système géothermal de Lassen (Californie).....	470
3. Circulation et manifestations hydrothermales superficielles.....	472
3.1. Structure hydrologique superficielle.....	472
3.2. Eaux chlorurées profondes.....	475
3.3. Vapeurs.....	476

3.4. Eaux sulfatés acides et altération argileuse avancée	476
3.5. Eaux bicarbonatées et altération argileuse	478
4. L'hydrothermalisme continental lié au magmatisme basique de rift	479
4.1. Le modèle global	479
4.2. Les systèmes hydrothermaux de la Fosse Salton (Californie)	480
5. Les systèmes hydrothermaux amagmatiques	485
5.1. Les systèmes hydrothermaux amagmatiques locaux.....	485
5.1.1. <i>Le système hydrothermal de South Fork (Idaho)</i>	486
5.1.2. <i>Le système hydrothermal de Balaruc-les-Bains (S-France)</i>	488
5.2. Les systèmes hydrothermaux amagmatiques régionaux.....	490
5.2.1. <i>Systèmes hydrothermaux régionaux des bassins sédimentaires</i>	491
5.2.2. <i>Systèmes hydrothermaux régionaux des ceintures orogéniques</i>	494
5.2.3. <i>Systèmes hydrothermaux régionaux des socles</i>	501
BIBLIOGRAPHIE	505
INDEX	575