

# TABLE DES MATIÈRES

<b>PRÉFACE</b> .....	1
<b>INTRODUCTION</b> .....	5

## PREMIÈRE PARTIE - EAUX ET SOLUTIONS

<b>I - L'EAU ET SON POUVOIR SOLVANT</b> .....	11
1. La molécule d'eau .....	11
2. Le pouvoir solvant de l'eau .....	16
<b>II - LES ÉLÉMENTS EN SOLUTION AQUEUSE : DONNÉES GÉNÉRALES</b> .....	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 $\text{OH}^-$ et $\text{O}^{2-}$ .....	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
<b>III - SOLUBILISATION ET DÉPÔT MINÉRAUX : DONNÉES GÉNÉRALES</b> .....	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

<b>IV - NATURE DES FLUIDES HYDROTHERMAUX.....</b>	<b>107</b>
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 <sub>2</sub> O.....	153
<b>V - PHYSICO-CHIMIE DES FLUIDES HYDROTHERMAUX</b> .....	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
<b>VI - LA SPÉCIATION ÉLÉMENTAIRE HYDRIQUE</b> .....	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

<b>VII - LES SYSTÈMES HYDROTHERMAUX : DONNÉES GÉNÉRALES</b> .....	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

<b>VIII - LES SYSTÈMES HYDROTHERMAUX OCÉANIQUES</b> .....	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
<b>IX - LES SYSTÈMES HYDROTHERMAUX CONTINENTAUX</b> .....	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
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	505
<b>INDEX</b> .....	575