

SCIENCES SUP

Cours et exercices corrigés

Licence 3 • Master • Capes • Agrégation

GÉOCHIMIE

Géodynamique et cycles



*Albert Jambon
Alain Thomas*

DUNOD

046308

(15)

GL 111



GÉOCHIMIE

Géodynamique et cycles

Cours et exercices corrigés

Albert Jambon

Professeur à l'université
Pierre et Marie Curie (Paris 6)

Alain Thomas

Maître de conférences à l'université
Pierre et Marie Curie (Paris 6)



046308

DUNOD

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	IX
PARTIE I	
FONDEMENTS DE LA GÉOCHIMIE	
Chapitre 1 • Concepts et processus	3
1.1 Mélanges géochimiques	3
1.1.1 Mélange binaire simple	3
1.1.2 Topologie des diagrammes de mélanges	6
1.2 Séparations de phases et fractionnement	9
1.2.1 Fusion partielle	10
1.2.2 Cristallisation fractionnée, distillation de Rayleigh	11
1.2.3 Un processus complexe : assimilation-cristallisation fractionnée	13
Chapitre 2 • Outils et méthodes	17
2.1 Éléments-traces	18
2.1.1 Un principe fondamental : le partage	18
2.1.2 Les spectres d'expression de la signature géochimique	23
2.1.3 Exemples de signature géochimique	32
2.2 Isotopes des éléments légers	36
2.2.1 Généralités	36
2.2.2 Fractionnements isotopiques	38
2.2.3 Fondements de l'hydrologie isotopique	41
2.2.4 Processus hydrothermaux	45
2.2.5 Paléotempératures	45
2.3 Isotopes radioactifs ; radioactivité naturelle	50
2.3.1 Principes de la désintégration radioactive	50
2.3.2 Isotopes radioactifs de courte période	52
2.3.3 Isotopes radioactifs de longue période ; chronomètres	57
2.4 Isotopes radiogéniques	65
2.4.1 Introduction : fractionnement et évolution isotopique	65
2.4.2 La référence chondritique	67
2.4.3 La différenciation du manteau primitif	67
2.4.4 Origines des granitoïdes	70
2.4.5 Traçage des mélanges	70

COMPOSITION ET STRUCTURATION CHIMIQUE DE LA TERRE

Chapitre 3 • La Terre dans l'Univers	75
3.1 Les processus de nucléosynthèse	75
3.1.1 Nucléosynthèse primordiale	76
3.1.2 Nucléosynthèse stellaire	76
3.1.3 Nucléosynthèse stellaire finale : types p et r	78
3.2 Composition du Soleil, des météorites et de la Terre	81
3.2.1 Le Soleil	81
3.2.2 Les météorites	85
3.2.3 La Lune et les autres planètes	91
3.2.4 La Terre comparée aux autres objets du système solaire	93
3.3 Évolution et différenciation des planètes.	
Un modèle de formation du système solaire	93
3.3.1 Les radioactivités éteintes	94
3.3.2 Cosmologie et isotopes de l'oxygène	94
3.3.3 La formation des planètes	96
3.3.4 Accrétion homogène ou accrétion hétérogène ?	96
Chapitre 4 • Terre globale et manteau primitif	98
4.1 La Terre : éléments majeurs	98
4.1.1 Le noyau	99
4.1.2 Le manteau primitif	103
4.2 Le manteau primitif : éléments-traces	109
4.2.1 Éléments réfractaires	109
4.2.2 Éléments volatils	109
4.2.3 Éléments sidérophiles	111
Chapitre 5 • La Terre objet différencié	113
5.1 Présentation des différents réservoirs	113
5.2 La croûte continentale	114
5.2.1 Composition de la croûte supérieure	114
5.2.2 Composition de la croûte continentale inférieure et moyenne	120
5.2.3 La croûte globale	122
5.3 La croûte océanique	124
5.3.1 La croûte basaltique fraîche	125
5.3.2 Variabilité des MORB	126
5.3.3 Altération hydrothermale	128
5.4 Le manteau	132
5.4.1 Variabilité du manteau	132
5.4.2 Les pôles géochimiques	136
5.5 Les enveloppes fluides	139
5.5.1 L'atmosphère	139
5.5.2 L'océan	141

Annexes	143
Masse de l'atmosphère	143
Contenu en eau de l'air	143

PARTIE 3

GÉODYNAMIQUE CHIMIQUE ET CYCLES GÉOCHIMIQUES

Chapitre 6 • L'énergie interne de la Terre	147
6.1 Énergie dissipée à la surface	147
6.1.1 Conduction : gradient géothermique et flux de chaleur	147
6.1.2 Autres pertes d'énergie	150
6.1.3 Bilan des pertes énergétiques	151
6.2 Sources de l'énergie interne	151
6.2.1 Effets de la gravité : les marées	152
6.2.2 La radioactivité	153
6.2.3 Rémanence de chaleur fossile	155
6.2.4 Production de chaleur dans le noyau	156
6.3 Implications pour la dynamique interne	156
6.3.1 La convection thermique	157
6.3.2 Structure de la Terre et convection	158
Chapitre 7 • L'énergie externe de la Terre	160
7.1 Distribution de l'Énergie solaire	160
7.1.1 Énergie reçue de l'espace	160
7.1.2 Nature spectrale des rayonnements solaire et terrestre	162
7.1.3 De quelle énergie la surface terrestre dispose-t-elle ?	163
7.1.4 Processus atmosphériques	165
7.2 Pression anthropique sur le climat	169
7.2.1 Principe du forçage radiatif	170
7.2.2 Le bilan en 2005	171
7.3 Implications dynamiques du bilan énergétique	173
7.3.1 Le moteur thermique : transfert de chaleur vers les pôles	173
7.3.2 L'atmosphère	176
7.3.3 L'océan	180
7.3.4 Le transfert global	184
Chapitre 8 • Cycles biogéochimiques	185
8.1 Notion de cycle et de modèle	185
8.2 Définition des concepts fondamentaux	187
8.2.1 Système ouvert ou fermé et échelles de temps	187
8.2.2 Boîte	188
8.2.3 Échanges	189
8.2.4 État stationnaire	189
8.2.5 Temps de séjour	190

Table des matières

8.3	Aperçus sur les applications à quelques problèmes courants	191
8.3.1	Réponse d'un système stationnaire à un changement des apports	191
8.3.2	Bilans de masse avec échanges inconnus	193
8.3.3	Recyclage interne	194
8.4	Intérêt et limitations de ces approches	195
8.4.1	Fonctionnement d'un système aquatique	195
8.4.2	Remarques plus générales	198
8.4.3	Bilan	198
Chapitre 9	Cycle de l'eau	203
9.1	Le cycle global	203
9.1.1	Les réservoirs	203
9.1.2	Les échanges	205
9.1.3	Les durées	206
9.1.4	Les cheminements	207
Chapitre 10	Dégradation de la surface terrestre	214
10.1	Introduction	214
10.1.1	L'altération dans le cycle global de la matière	214
10.1.2	Altération et érosion	216
10.2	Les raisons de la dégradation des roches	217
10.2.1	Contraintes physiques	217
10.2.2	Entre physique et chimie, la surface des solides	218
10.2.3	Contraintes chimiques	219
10.3	De la roche au sol	220
10.3.1	Composition de la surface terrestre	220
10.3.2	Le sol	220
10.4	Altération chimique des minéraux	223
10.4.1	Altérabilité	223
10.4.2	Production d'acides dans les sols	224
10.4.3	Deux modes de disparition des minéraux	226
10.5	Altération des aluminosilicates	230
10.5.1	Exemple type de l'attaque carbonique	231
10.5.2	Différents aboutissements	231
10.6	Altération des carbonates	236
10.6.1	Une altération efficace	236
10.6.2	Des résidus utiles	236
10.7	De la roche au fleuve	236
Chapitre 11	Transport de la matière solide	241
11.1	Introduction	241
11.1.1	Points de repère globaux	241
11.1.2	Les particules	242

11.2 Du continent vers l'océan	246
11.2.1 Les transports fluviaux	246
11.2.2 Les transports atmosphériques	257
11.3 Dans l'océan	263
11.3.1 La marge continentale	263
11.3.2 La sédimentation océanique	267
Chapitre 12 • Les éléments majeurs	273
12.1 Introduction	273
12.2 L'atmosphère	276
12.2.1 L'aérosol minéral	276
12.2.2 Les précipitations	278
12.3 Les fleuves	284
12.3.1 Mode de transport prédominant	284
12.3.2 Composition de l'eau fluviale	286
12.4 La marge continentale	290
12.4.1 Un milieu en question	290
12.4.2 Mise en évidence des échanges solide-liquide	292
12.4.3 Comportement des éléments	293
12.4.4 Les bassins évaporitiques	294
12.5 L'océan total	297
12.5.1 Comportement global des éléments	297
12.5.2 L'hydrothermalisme	301
12.5.3 Bilan de masse	306
Chapitre 13 • Les éléments-traces	312
13.1 Forme physicochimique des éléments	312
13.1.1 Éléments liés aux particules	313
13.1.2 Éléments dissous	313
13.2 Distribution des éléments entre les particules et la solution	315
13.2.1 De la croûte à l'eau du fleuve	315
13.2.2 Des équilibres solide-liquide ?	317
13.3 Transport par les fleuves	319
13.3.1 Affinité pour les particules	319
13.3.2 Le vecteur argileux	320
13.3.3 Impact anthropique	322
13.4 Les estuaires	324
13.5 L'atmosphère	325
13.5.1 Mesures directes	326
13.5.2 Milieux enregistreurs	329
13.6 L'océan	331
13.6.1 La marge	331
13.6.2 L'océan ouvert	332
Annexe : tableau des éléments-traces	342

Table des matières

Chapitre 14 • Interaction avec la biosphère : cycle du carbone	345
14.1 La chimie du carbone	345
14.1.1 Les espèces de carbone	345
14.1.2 Le carbone dans les trois phases	346
14.1.3 Équilibres et transformations chimiques	347
14.1.4 Introduction de CO ₂ dans l'océan	352
14.2 Le cycle du carbone	359
14.2.1 Les réservoirs	359
14.2.2 Le cycle géologique, lent	359
14.2.3 Le cycle contemporain, rapide	364
14.2.4 La perturbation anthropique	369
Chapitre 15 • Le long terme	377
15.1 Histoire de la différenciation du noyau	377
15.1.1 Le cas de la formation catastrophique	377
15.1.2 Le cas de la croissance continue du noyau	380
15.1.3 La croissance de la graine	381
15.2 Âge de la croûte continentale	381
15.3 La dynamique de la croûte océanique	387
15.4 Évolution du manteau	389
15.5 Exosphère (atmosphère et océan)	390
15.5.1 Le caractère « secondaire » de l'atmosphère terrestre	390
15.5.2 Les gaz rares et la dynamique du dégazage	390
15.5.3 Les gaz réactifs CO ₂ et H ₂ O	394
15.5.4 Évolution de l'atmosphère et apparition de l'oxygène	395
Bibliographie	398
Index	399



Albert Jambon
Alain Thomas

GÉOCHIMIE

Géodynamique et cycles

Ce manuel s'adresse aux étudiants en L3 et Master des Sciences de la Terre et de l'Univers, aux élèves ingénieurs ainsi qu'aux candidats aux concours de l'enseignement (Capes, Agrégation).

La Terre est une planète très active au niveau de ses enveloppes externes (océan et atmosphère) et internes (croûte, manteau, noyau). La géochimie contribue à comprendre le cycle de ces différentes enveloppes et à évaluer leurs interactions et l'évolution de leurs compositions.

Ce cours met en perspective l'évolution géochimique de la Terre depuis son accréation, il y a un peu plus de 4,5 milliards d'années. Il étudie également la composition chimique globale de la Terre ainsi que la composition des différents réservoirs qui la constituent.

Les outils privilégiés du géochimiste sont présentés : les isotopes radioactifs et leurs descendants radiogéniques sont essentiels pour définir une chronologie des événements et sont d'utiles traceurs du géodynamisme. Les éléments majeurs et traces, les isotopes des éléments légers complètent ce dispositif. La géodynamique globale et les cycles géochimiques internes et externes actuels et passés sont ainsi largement étudiés.

Des exercices corrigés complètent le cours.

ALBERT JAMBON
est professeur à
l'université Pierre et
Marie Curie (Paris 6).

ALAIN THOMAS
est maître de conférences
à l'université Pierre et
Marie Curie (Paris 6).

MATHÉMATIQUES

PHYSIQUE

CHIMIE

SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

INFORMATIQUE

SCIENCES DE LA VIE

SCIENCES DE LA TERRE



9 782100 516124

6673495

ISBN 978-2-10-051612-4

