

SCIENCES SUP



Cours et exercices corrigés

Licence 3 • Master • Capes • Agrégation

GÉOCHIMIE

Géodynamique et cycles



***Albert Jambon
Alain Thomas***

DUNOD

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)

DUNOD

Consultez nos parutions sur dunod.com



Illustration de couverture : Fotolia

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2009
ISBN 978-2-10-054216-1

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos

IX

PARTIE 1

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 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

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

AVANT-PROPOS

Contrairement aux trois autres planètes internes (auxquelles on peut ajouter la Lune) la Terre apparaît extrêmement active aussi bien au niveau de ses enveloppes externes (océan et atmosphère) qu'internes (croûte, manteau, noyau). L'observation montre qu'il s'agit d'un objet différencié en **réservoirs** plus ou moins concentriques : le noyau métallique, le manteau et la croûte silicatés, l'océan et l'atmosphère. Les géochimistes considérant que cette structure n'est pas le résultat du hasard, cherchent à en comprendre la logique : comment ces différentes enveloppes se sont-elles mises en place, comment interagissent-elles et leurs compositions évoluent-elles ? Cette question est beaucoup plus qu'académique : l'action de l'Homme sur son environnement est devenue sensible, il est important de comprendre comment le système terrestre réagit aux contraintes qui lui sont imposées. Les historiens de la Terre nous apprennent qu'elle a subi dans le passé des évolutions majeures, parfois lentes (l'évolution de la vie, par exemple) parfois brusques (la crise Crétacé-Tertiaire, la plus populaire mais certainement pas la plus importante) : les modifications récentes de l'environnement s'en rapprochent-elles ? Au cours des dernières décennies la géochimie a montré sa capacité à appréhender un certain nombre des questions majeures de la dynamique terrestre et ceci justifie la rédaction de cet ouvrage.

Dans un premier temps, nous verrons comment il est possible de déterminer la composition chimique globale de la Terre ainsi que la composition des réservoirs qui la constituent. L'évolution séculaire est un aspect très important pour la connaissance de la Terre à tel point que les études historique et dynamique sont reconnues comme les piliers des sciences géologiques. Les isotopes radioactifs et leurs descendants radiogéniques aussi bien pour la chronologie que pour les traçages constituent des outils privilégiés de cette approche. La dynamique à court terme sera présentée dans l'étude des cycles géochimiques qui décrivent quantitativement les réservoirs et leurs interactions mutuelles. Une difficulté dans la présentation pédagogique vient du fait que les réservoirs externes sont l'objet de processus à courte échelle de temps contrairement aux processus internes beaucoup plus lents. Cette dualité est une caractéristique fondamentale du fonctionnement de la planète.

La première partie de cet ouvrage exposera la méthodologie qui sera mise en œuvre par la suite pour étudier la chimie de la planète Terre (deuxième partie) puis la géodynamique globale et les cycles géochimiques internes et externes (troisième partie).

La bibliographie, des photos couleurs sont disponibles sur le site web Dunod.com.

Partie 1

Fondements de la géochimie

La géochimie moderne allie deux approches fondamentales : d'une part l'utilisation des propriétés particulières de certains éléments chimiques, d'autre part la manipulation de concepts unitaires permettant de systématiser quantitativement le comportement des systèmes (ensemble de réservoirs interactifs) dans les cycles globaux. La première partie de cet ouvrage consistera donc à exposer les grandes lignes de ces deux approches. Les deuxième et troisième parties en seront des applications.

CONCEPTS ET PROCESSUS

1

OBJECTIFS

- L'évolution chimique de la Terre procède par des mécanismes souvent complexes pouvant être décomposés en **processus unitaires**. Le principe fondamental en est le **bilan de masse** que l'on appliquera à quelques processus de différenciation terrestre simples mais fondamentaux : mélange, fusion et cristallisation.

1.1 MÉLANGES GÉOCHIMIQUES

Les séparations de phases (cristallisation des carbonates marins, explosion volcanique...) et les mélanges (exutoire d'un fleuve dans l'océan, dépôt d'un sédiment...) constituent des cas de figure extrêmement commun dans la nature. La géochimie permet souvent d'analyser ces processus de façon quantitative. Nous allons rappeler ici comment le mélange de deux composés quelconques en proportions quelconques, peut être abordé de façon quantitative.

1.1.1 Mélange binaire simple

Au Piton de la Fournaise, on rencontre des laves appelées picrites. Ce sont des roches contenant des cristaux d'olivine (jusqu'à 25 % environ) dans une matrice basaltique. Les pétrologues ont longtemps débattu de la signification de ces roches. Nous suivrons les interprétations d'Albarède *et al.* (1997) documentées par de nombreuses données géochimiques. Ces auteurs proposent que les picrites résultent très simplement du mélange d'un basalte avec des cumulats (très riches en olivine) produits de magmas basaltiques ayant subi une cristallisation fractionnée. Nous allons voir que l'analyse géochimique permet de vérifier cette hypothèse.

Dans un diagramme figurant la teneur en Ni en fonction de MgO, cumulats et basaltes se placent aux deux extrémités d'un segment le long duquel se situent tous les points représentatifs des picrites : cumulats et basaltes sont deux pôles du mélange binaire (figure 1.1). Cette propriété découle simplement du principe de bilan de masse. Nous avons pour une picrite de masse M constituée du mélange d'une masse M_1 de cumulats et M_2 de basalte, la relation

$$M = M_1 + M_2 \quad (11.1)$$

et si l'on considère la fraction massique de cumulats dans le mélange $M_1/M = X$, il vient :

$$M_2/M = 1 - X$$

Nous avons écrit le bilan de masse global, mais nous pouvons aussi écrire le bilan pour les constituants chimiques et leur fraction massique dans les roches. Par exemple :

$$\begin{aligned} (\text{Ni})_p &= (\text{Ni})_1 X + (\text{Ni})_2 (1-X) \\ \text{soit } (\text{Ni})_p &= X[(\text{Ni})_1 - (\text{Ni})_2] + (\text{Ni})_2 \end{aligned}$$

D'où l'on tire la fraction X de cumulats :

$$X = \frac{(\text{Ni})_p - (\text{Ni})_2}{(\text{Ni})_1 - (\text{Ni})_2} \quad (11.2)$$

Une relation équivalente peut être écrite pour MgO ou même pour n'importe quel élément chimique :

$$X = \frac{(\text{MgO})_p - (\text{MgO})_2}{(\text{MgO})_1 - (\text{MgO})_2} \quad (11.3)$$

En regroupant (11.2) et (11.3) il vient :

$$(\text{Ni})_p = \frac{(\text{MgO})_p}{(\text{MgO})_1 - (\text{MgO})_2} + \left[(\text{NiO})_2 - \frac{(\text{MgO})_2}{(\text{MgO})_1 - (\text{MgO})_2} \right] \quad (11.4)$$

de la forme $(\text{Ni})_p = a(\text{MgO})_p + b$

La relation entre Ni et MgO pour l'ensemble des picrites est donc bien un segment de droite ($\text{Ni}_2 < \text{Ni}_p < \text{Ni}_1$) dont nous venons de dériver l'équation.

Quel intérêt y a-t-il à formaliser le problème de cette façon ? Pour une picrite donnée si le modèle est correct n'importe quel élément C vérifiera la relation (11.2) soit :

$$(C_p - C_2) = X (C_1 - C_2) \quad (11.5)$$

Dans une roche on peut donc vérifier que le modèle de mélange (figure 1.2) est correct et l'on obtient la fraction de cumulats incorporé par la picrite (figure 1.2). Une autre façon de considérer un mélange et d'étudier un ensemble de roches et montrer que deux éléments quelconques suivent une relation du type (11.5)

$$(Y)_p = a(X)_p + b \quad (11.6)$$

et donc la série des picrites génère une droite dans un diagramme à deux composants Y et X . Ceci pourrait permettre de déterminer les concentrations d'un élément dans des pôles (1) et (2) si elles étaient inconnues. La figure illustre ce principe en comparant le Ni à Al_2O_3 d'une part et au Ce (cérium) d'autre part (figure 1.2).

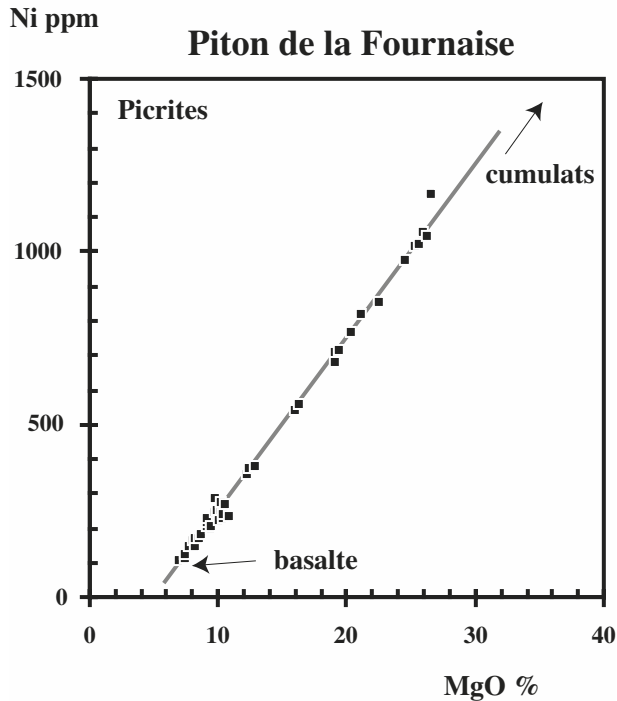


Figure 1.1 – Mélange binaire simple.

Dans un diagramme MgO : Ni les échantillons de picrites du Piton de la Fournaise (Réunion) se placent sur une ligne de mélange entre cumulates (riches en olivine) et basalte (d'après Albarède et al. 1997).

L'exemple de la Fournaise est idéal à cause du nombre élevé d'échantillons ainsi que du nombre d'éléments analysés (45). En l'absence d'informations suffisantes, une distillation ou une cristallisation fractionnée, entre autres, (§ 1.2.2) peuvent conduire à un ensemble de produits dont les points représentatifs s'alignent, à peu de choses près, sur une droite bien qu'il ne s'agisse pas de processus de mélange. D'autre part, lorsqu'un autre processus intervient après le mélange (cristallisation par exemple) les relations simples sont perturbées. Pour ces raisons, on préfère souvent des diagrammes plus sophistiqués.

Piton de la Fournaise

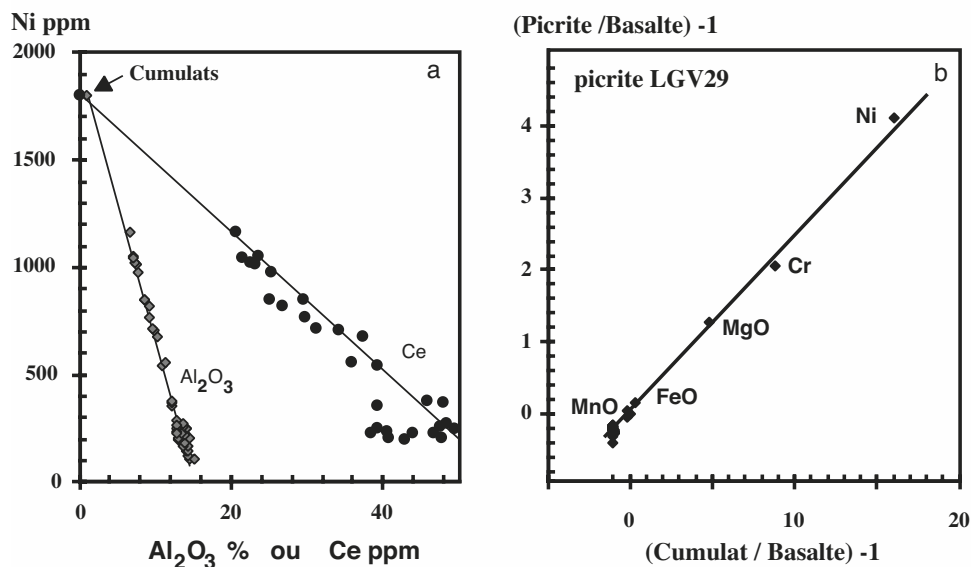


Figure 1.2 – Deux façons de représenter un mélange.

a) Pour un ensemble d'échantillons résultant de mélanges à des degrés divers, la relation entre deux éléments (Ni et Al_2O_3 ou Ni et Ce par exemple) correspond à un segment joignant les deux pôles. b) Si l'on choisit un échantillon (picrite LGV29) résultant du mélange de deux pôles connus (ici cumulats et basaltes) tous les éléments doivent selon l'équation (11.5) se placer selon une droite passant par l'origine et dont la pente indique la fraction de cumulats incorporés dans l'échantillon considéré [données de Albarède et al. 1997].

1.1.2 Topologie des diagrammes de mélanges

Nous verrons par la suite que le rapport de deux isotopes d'un même élément n'est pas affecté par les processus pétrogénétiques (fusion, cristallisation...). Si l'on mélange deux réservoirs de composition isotopique différente, le produit aura une composition isotopique intermédiaire dépendant uniquement des proportions des deux pôles. Si ce mélange subit ensuite une évolution (cristallisation, etc.) sa composition chimique changera mais pas sa composition isotopique. On voit donc l'intérêt de la mesure de ces rapports pour tester des mélanges éventuels en s'affranchissant de « perturbations » secondaires. L'île de Heard est située dans le sud de l'océan Indien sur le plateau des Kerguelen. Comme toutes les îles océaniques, la composition chimique de ses laves nous informe sur le manteau qui lui a donné naissance par fusion partielle. Les compositions isotopiques des laves de l'île montrent une très bonne cohérence (figure 1.3) sans relation simple avec la composition chimique des roches qui probablement résultent d'une cristallisation fractionnée. Quelles informations peut-on tirer de cette relation ? Pour cela, il convient de considérer les relations entre rapports d'éléments dans le cas d'un mélange.

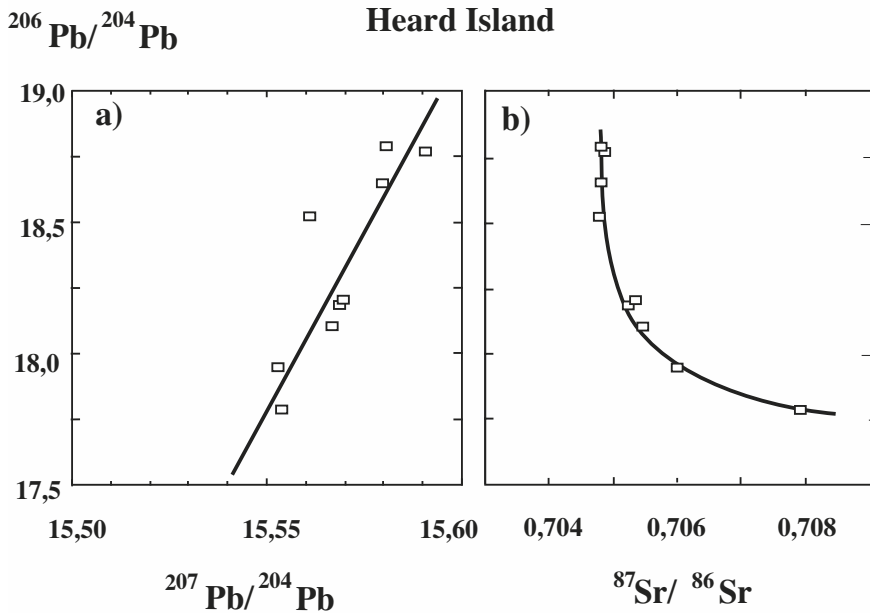


Figure 1.3 – a-b Les compositions isotopiques pour les laves de l’île de Heard (plateau des Kerguelen) sont en accord avec un mélange de deux sources.

On notera que la source des MORB ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,7025$) ne peut pas constituer l’un des pôles car l’asymptote se situe à une valeur supérieure à 0,704 (d’après Barling et Goldstein, 1990).

Pour tester si un ensemble d’analyses (de plusieurs éléments dans une série d’échantillons) peut correspondre à un mélange, on utilise très souvent un diagramme du rapport de deux éléments en fonction du rapport de deux autres. Quelques propriétés des mélanges peuvent se lire facilement sur ce type de diagramme. Les équations (1.1-2) s’appliquent à tous les constituants d’un système, donc en particulier à quatre éléments A, B, C et D quelconques et nous considérons les rapports de concentration C_A/C_B et C_C/C_D . Pour simplifier les mathématiques, on décide de placer dans notre diagramme le premier pôle du mélange à l’origine des coordonnées et le deuxième pôle aux coordonnées (1,1). Cela revient à effectuer le changement de coordonnées suivant :

$$X = \frac{(C_A/C_B) - (C_A/C_B)_1}{(C_A/C_B)_2 - (C_A/C_B)_1} \quad Y = \frac{(C_C/C_D) - (C_C/C_D)_1}{(C_C/C_D)_2 - (C_C/C_D)_1} \quad (1.4)$$

où les indices se rapportent aux deux pôles (figures 1.4 et 1.5) ; on peut montrer que l’équation d’une courbe de mélange entre les pôles (1) et (2) s’écrit alors :

$$X/(1 - X) = k Y/(1 - Y) \quad (1.5)$$

avec $k = (C_B/C_D)_1 / (C_B/C_D)_2$, constante connue si les pôles le sont.

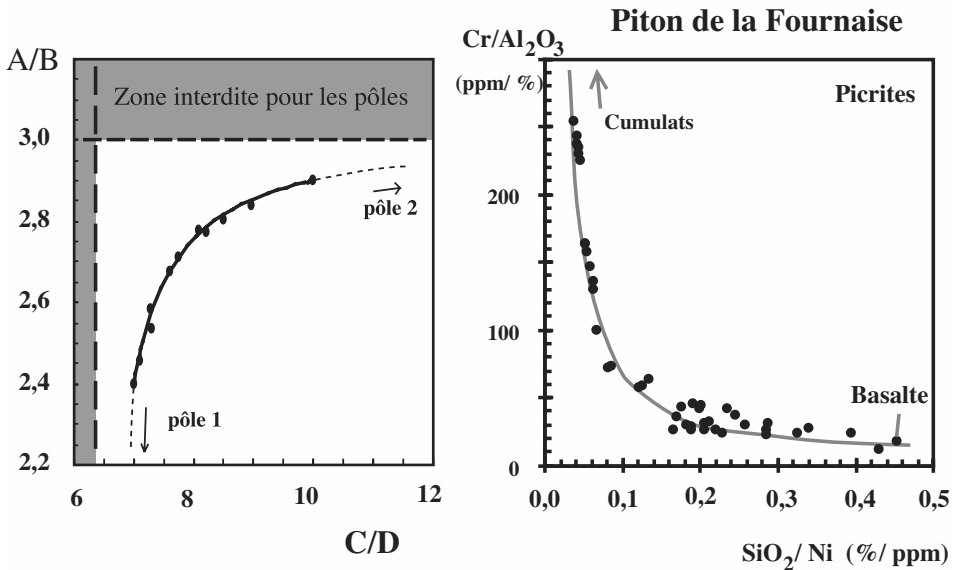


Figure 1.4 - Diagramme de mélange.

Dans la pratique, l'hyperbole de mélange ne permet pas de définir les pôles qui sont inconnus. Une contrainte importante permet d'éliminer certaines possibilités : les pôles ne peuvent pas être situés au-delà des asymptotes (tiretés) de l'arc d'hyperbole. Application au cas des picrites du Piton de la Fournaise (cf. figures 1.1 et 1.2).

Les courbes correspondantes sont des branches d'hyperboles qui possèdent quelques propriétés intéressantes :

- pour les valeurs de k et $1/k$ les deux courbes obtenues sont symétriques par rapport à la première diagonale ;
- $k = 1$: la courbe de mélange est la droite joignant les deux pôles (1^{re} diagonale) ;
- $k = 0$: la courbe de mélange est constituée des deux côtés du carré supérieurs à la première diagonale ;
- $k = \text{infini}$: la courbe de mélange est constituée par les deux côtés du carré inférieurs à la première diagonale ;
- Si $C_B = C_D$, alors $k = 1$ la courbe de mélange est une droite joignant les deux pôles et de même si $C_B = C_D = 1$ (diagramme à deux éléments).

Dans un mélange la fraction x_1 du composant 1 s'obtient par :

$$x_1 = (C_A - C_{A2}) / (C_{A1} - C_{A2}) \quad (1.6)$$

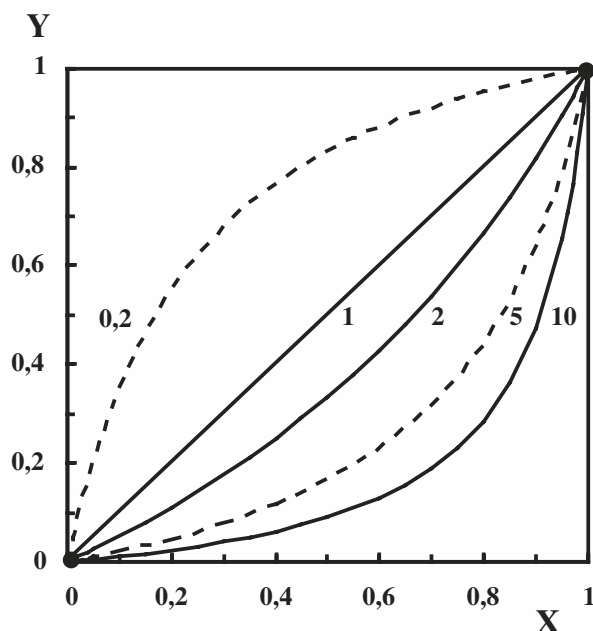
ou en utilisant les rapports

$$x_1 = (C_{A2}/C_{B2} - C_A/C_B) / \{ (C_{A2}/C_{B2} - C_A/C_B) - (C_{B1}/C_{B2})(C_{A1}/C_{B1} - C_A/C_B) \} \\ x_1 = (1 - x) / \{ (1 - x) + x (C_{B1}/C_{B2}) \} \quad (1.7)$$

ou toute équation similaire impliquant un des autres éléments considérés. Le choix des variables A, B, C, D est assez souple ; il peut s'agir de concentrations ou de toute

Figure 1.5 -
Diagramme de mélange à
quatre composants (A, B,
C, D) après normalisation
(variables X et Y).

Les valeurs de la constante
 $k = (C_B/C_D)_1 / (C_B/C_D)_2$ sont
 reportées sur les courbes et
 caractérisent la courbure.



combinaison linéaire de concentration. Le rapport A/B peut être un rapport de deux isotopes (par exemple $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) ou une composition isotopique exprimée sous forme de δ (voir § 213). On peut introduire un certain nombre de simplifications si cela est utile. Si on reporte A/B en fonction de C/B la ligne de mélange est une droite puisque $k = 1$. Nous avons illustré un cas de ce type pour les basaltes de l'île de Heard (figure 1.3). Lorsqu'on considère la relation entre les deux rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ une hyperbole de mélange apparaît. Si l'on reporte $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ en fonction de $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ on obtient une droite, ce qui est attendu pour un mélange.

Les diagrammes de mélange mettant en œuvre des rapports se justifient surtout par l'utilisation des rapports isotopiques. Ceux-ci ne sont en général, pas affectés par les processus pétrogénétiques (fusion, dissolution, cristallisation, évaporation) qui fractionnent les éléments chimiques entre eux. L'interprétation des données isotopiques en termes de mélange et donc grandement simplifiée par rapport à l'étude du comportement d'éléments de comportements chimiques variés.

1.2 SÉPARATIONS DE PHASES ET FRACTIONNEMENT

La différenciation terrestre est le résultat d'une séparation des éléments chimiques les uns des autres, ce que l'on appelle le **fractionnement**. Parmi les processus de fractionnement, les séparations de phases sont les plus efficaces ; il est donc important de comprendre leur logique si l'on veut modéliser la différenciation terrestre. Il