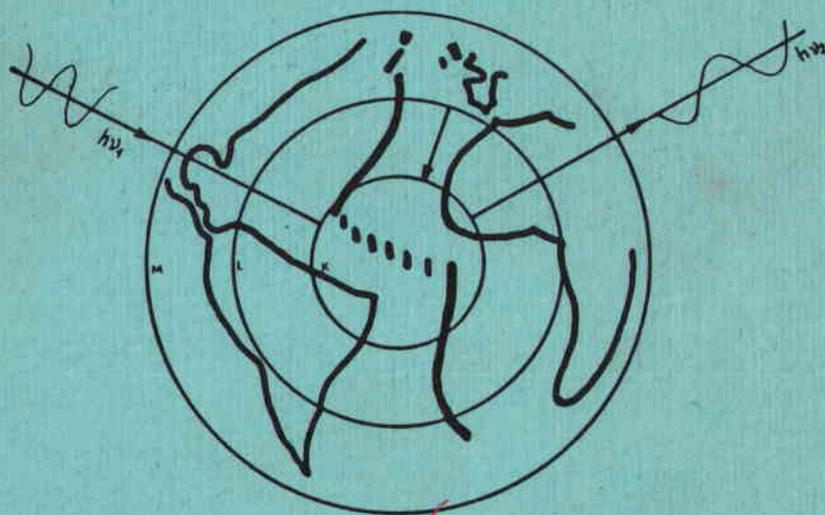


# THESE

présentée à l'Université de Paris VII  
pour obtenir le grade de Docteur-ès-Sciences  
par

Henri BOUGAULT

## CONTRIBUTION DES ELEMENTS DE TRANSITION A LA COMPREHENSION DE LA GENESE DES BASALTES OCEANIQUES ANALYSE DES ELEMENTS TRACES DANS LES ROCHES PAR SPECTROMETRIE DE FLUORESCENCE X



soutenue le 18 juin 1980 devant la commission d'Examen

Mr. C.J. ALLEGRE

Président

Mme J. COURTOT

Mr. M. JAVOY

Mr. X. LE PICHON

Examineurs

Mr. R.K. O'NIONS

Mr. M. TREUIL

# THESE

présentée à l'Université de PARIS VII  
pour obtenir le grade de Docteur-ès-Sciences  
par

HENRI BOUGAULT ◊

## CONTRIBUTION DES ELEMENTS DE TRANSITION A LA COMPREHENSION DE LA GENESE DES BASALTES OCEANIQUES

ANALYSE DES ELEMENTS TRACES DANS LES ROCHES  
PAR SPECTROMÉTRIE DE FLUORESCENCE X

soutenue le 18 juin 1980 devant la commission d'examen:

Mr. C.J. ALLEGRE	Président
Mme J. COURTOT	
Mr. M. JAVOY	
Mr. X. LE PICHON	Examineurs
Mr. R.K. O'NIONS	
Mr. M. TREUIL	

---

◊ Centre National pour l'Exploitation des Océans  
Centre Océanologique de Bretagne  
Laboratoire de Géochimie  
Boîte Postale : 337  
29273 BREST

## REMERCIEMENTS

---

Les résultats présentés dans ce mémoire ont été obtenus dans deux laboratoires, le laboratoire de Géochimie du COB (Spectrométrie de Fluorescence X) et le Laboratoire P. SUE du CNRS, Groupe des Sciences de la Terre, (Analyse par Activation Neutronique) et grâce à la participation de jeunes chercheurs de différentes universités aux missions Glomar Challenger pour l'analyse à bord. Qu'il me soit donc permis de remercier en premier lieu tous ceux qui ont contribué à l'acquisition de ces données. P. Cambon et J. Etoubleau avec lesquels les difficultés d'analyse ont toujours été discutées et qui ont largement contribué à la technique d'analyse présentée dans ce mémoire. M. Treuil, J.L. Joron et H. Jaffrezic avec lesquels une collaboration de routine s'est instaurée du fait de la complémentarité des deux méthodes d'analyse. Les résultats, sur le plan analytique (quelques éléments accessibles par les deux méthodes ayant permis des vérifications constantes) et sur le plan interprétation géochimique, ont fait l'objet d'un dialogue permanent. C'est avec l'accord de M. Treuil qui a désigné sous le terme "hygromagmatophile" les éléments ayant une affinité pour le liquide (souvent appelés "incompatible large ion lithophile") que j'ai quelque peu contracté cet adjectif en "hygromagmatophile". J.P. Quisefit (Paris VII), C. Bollinger (Paris VII), L. Briquieu (Montpellier), J. Bijon (Orsay) et O. Corre (Rennes) ont participé à une mission Glomar Challenger; je les remercie pour leurs contributions.

C.J. Allègre a contribué à la définition de ce sujet d'étude; initialement il s'agissait de l'étude des éléments de la première série de transition dans les basaltes océaniques; du fait des possibilités analytiques qui étaient offertes par la spectrométrie de fluorescence X, ce sujet s'est étendu aux éléments de la deuxième série de transition Y, Zr, Nb. Ainsi, avec le travail réalisé par J.L. Joron au Laboratoire P. SUE, permettant notamment d'obtenir des résultats pour les éléments de la troisième série de transition (terres rares, Hf, Ta) a-t-il été possible d'étudier en commun un ensemble d'éléments dont les ions présentent la structure électronique externe d'un gaz rare et une affinité pour le liquide. En même temps, plusieurs échantillons ont fait l'objet d'analyses isotopiques au Laboratoire de Géochimie de l'Institut

de Physique du Globe de Paris permettant d'obtenir des données qui seules, en toute rigueur, sont interprétables d'une façon univoque en termes de matériau source. Je remercie C.J. Allègre pour sa collaboration, ses conseils, les discussions fréquentes que nous avons eues et l'accueil qui m'a été réservé par son laboratoire : G. Manhès, qui a contribué aux premières analyses effectuées à bord pendant la campagne GIBRACO, R. Montigny, J.F. Minster et B. Dupré.

Je remercie C.J. Allègre, Mme Courtot, M. Javoy, X. Le Pichon, R.K. O'nions et M. Treuil, qui me font l'honneur de constituer le jury d'examen.

Le Groupe "Croute Océanique" du Comité IPOD France a participé à la définition des moyens et des objectifs d'études de la croute océanique.

Je dois toute ma reconnaissance à ceux qui, au CNEXO, ont contribué ou facilité le développement du thème "croute océanique" : J. Debyser, X. Le Pichon, G. Pautot. Enfin, je crois important de mentionner que le contexte "océanographique" du Centre Océanologique de Bretagne et l'activité de recherche "Géologie et Géophysique Océanique" du Département Scientifique du COB ont constitué un environnement très appréciable. Je remercie tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail, en mer et à terre. R. Hékinian m'a permis l'accès à sa collection d'échantillons. J. Francheteau et D. Needham ont joué un rôle important d'incitation tant vis à vis des campagnes à la mer que vis à vis de la participation de certains laboratoires; en ce qui me concerne, ils m'ont apporté une aide très précieuse.

Que Madame Racheboeuf trouve ici l'expression de mes remerciements pour le soin qu'elle a apporté à la frappe de ce document.

## AVANT PROPOS

---

La théorie de la dérive des continents initialement proposée par Wegener (1912), voire même antérieurement suivant certaines références indiquées par Wegener lui-même, n'est démontrée à partir d'observations ou de mesures effectuées dans le domaine océanique que depuis dix à quinze ans (Hess, 1962; Vine and Matthews, 1963; McKenzie and Parker, 1967; Le Pichon, 1968; Morgan, 1968; Pitman and Talwani, 1972). La plupart des modèles thermiques supposent une circulation de fluides hydrothermaux pour rendre compte du bilan thermique à l'axe d'une dorsale; l'observation de ce processus hydrothermal à l'axe d'une dorsale et l'observation du phénomène de précipitation de sulfures qui l'accompagne, sur la ride est-pacifique, ne datent que d'un an et demi (Francheteau et al., 1979). Nous sommes donc encore vraisemblablement très loin d'avoir exploité tout ce que recouvre la théorie du "Sea Floor Spreading", aussi bien du point de vue de la connaissance de la genèse de la croûte océanique que de celui de ses ressources potentielles.

Une dorsale médio-océanique est un lieu d'accrétion, c'est à dire le lieu de production des matériaux constitutifs de chaque plaque océanique au fûr et à mesure que celles-ci s'écartent l'une de l'autre. L'étude d'un matériau produit dans un tel contexte est à priori plus simple que celle d'un matériau produit dans un domaine continental: les paramètres intensifs ou extensifs à considérer dans le système expansion des fonds océaniques sont les suivants:

- nature du manteau supérieur
- fusion partielle d'une partie du manteau supérieur conduisant à la formation d'un liquide basaltique
- cristallisation fractionnée du liquide produit.

La relative simplicité du domaine dorsale médio-océanique doit donc permettre d'avoir accès à des informations relatives aux processus magmatiques et aux propriétés géochimiques comparées des éléments aux cours de ces processus. Un minimum de connaissance de ces processus et de ces propriétés étant disponible, il est alors possible de déduire des informations

sur le manteau supérieur, homogénéité ou hétérogénéité, histoire antérieure. A ce titre, une dorsale médio-océanique parcourant le globe sur des milliers de kilomètres peut être considérée comme une "fenêtre" pour un examen des propriétés du manteau.

Il est évident que l'une de ces informations n'est pas indépendante des autres au niveau de l'interprétation des données. L'accès à ces informations constitue un ensemble difficilement dissociable, comprenant:

- l'accès aux échantillons : un effort important a été consenti, par la participation aux campagnes françaises ou internationales (D.S.D.P. - I.P.O.D.) et la réalisation d'un conteneur "Géochimie" embarquable permettant d'obtenir un minimum d'information à bord au cours de la campagne.

- la chimie analytique : une partie du temps du laboratoire a été consacrée à l'amélioration de l'analyse des éléments traces par spectrométrie de fluorescence X.

- propriétés des éléments : le chapitre II essaie de tirer parti des propriétés connues des éléments de transition pour prévoir ou expliquer leurs partages entre phases minérales et phase liquide. En s'appuyant sur l'ensemble des résultats présentés chapitre V, un classement précis des éléments hygromagmaphiles non terres rares par rapport aux terres rares est proposé.

- processus magmatiques et hétérogénéité du manteau : les concentrations des éléments à forts coefficients de partage minéraux - liquide (Co, Ni, Cr) dans les matériaux constituant le manteau sont vraisemblablement indépendantes du processus de fusion. Le comportement de ces éléments constitue une contrainte vis à vis de la quantité de minéraux ferromagnésiens susceptibles de cristalliser à partir d'un liquide basaltique. Bien que les concentrations des éléments hygromagmaphiles dépendent des processus actuels conduisant à la formation des basaltes et de l'histoire antérieure de la source, l'interprétation des données fait apparaître une notion d'homogénéité régionale; les hétérogénéités observées entre différentes régions sont confirmées par les données isotopiques.

- En insistant sur les limites de la définition d'un élément trace et sur les hypothèses nécessaires à l'élaboration des modèles classiques de fusion partielle et de cristallisation fractionnée, le premier chapitre sert d'introduction générale.

Le deuxième chapitre traite des propriétés des éléments de transition vis à vis des partages minéraux - liquides silicatés.

Les chapitres III, éléments à forts coefficients de partage, et IV, éléments à faibles coefficients de partage, sont consacrés à l'interprétation des données en termes de géochimie comparée, processus magmatiques et hétérogénéité du manteau.

Le chapitre V présente les données brutes relatives à chaque campagne.

L'analyse des éléments traces par spectrométrie de fluorescence X est traitée au chapitre VI. -

## TABLE DES MATIERES

---

	PAGES
CHAPITRE I	
ELEMENTS TRACES : DEFINITION ET MODELES SIMPLES	1
1- COEFFICIENT DE PARTAGE : DEFINITION	2
2- COEFFICIENT DE PARTAGE : LES LIMITES D'APPLICATION DE CETTE NOTION.	3
3- FUSION , CRISTALLISATION : EQUATION GENERALE,	4
4- FUSION PARTIELLE,	6
a) PROCESSUS DE FUSION FRACTIONNEE	
b) L'ENSEMBLE DU LIQUIDE PRODUIT RESTE EN EQUILIBRE AVEC LE SOLIDE	
c) UNE QUANTITE FINIE DE LIQUIDE RESTE EN EQUILIBRE AVEC LE SOLIDE	
5- CRISTALLISATION,	9
a) CRISTALLISATION FRACTIONNEE.	
b) FORMATION DE CRISTAUX "HOMOGENES".	
6- FUSION ET CRISTALLISATION : VITESSE DE MOUVEMENT DE L'INTERFACE ET DIFFUSION.	10
CHAPITRE II	
LES ELEMENTS DE TRANSITION	
PROPRIETES : CHOIX POUR L'ETUDE DES PROCESSUS MAGMATIQUES	13
1- LA THEORIE DU CHAMP CRISTALLIN,	14
2- L'EFFET JAHN-TELLER ET DEFORMATION DU RESEAU CRISTALLIN,	17
3- LES COEFFICIENTS DE PARTAGE DES ELEMENTS DE LA PREMIERE SERIE DE TRANSITION,	19
4- INTERPRETATIONS , REMARQUES CONCERNANT LES COEFFICIENTS DE PARTAGE DES ELEMENTS DE LA PREMIERE SERIE DE TRANSITION	22
5- ELEMENTS DE LA DEUXIEME ET TROISIEME SERIE DE TRANSITION,	28
6- COEFFICIENTS DE PARTAGE INFERIEURS A 1 : DISCUSSION , INTERPRETATION.	30
7- CONCLUSION : CHOIX DES ELEMENTS DE TRANSITION POUR L'ETUDE DES PROCESSUS MAGMATIQUES.	32

	PAGES
CHAPITRE III	
LES ÉLÉMENTS À FORTS COEFFICIENTS DE PARTAGE	
DIFFÉRENCIATION NOYAU-MANTEAU : CRISTALLISATION FRACTIONNÉE.	33
1- FUSION PARTIELLE : PRÉVISIONS D'APRÈS MODÈLES.	34
2- FUSION PARTIELLE : DONNÉES , RÉSULTATS , DISCUSSION.	38
A) LES SOLIDES	
B) LES LIQUIDES	
C) CONCLUSION	
3- NORMALISATION AUX CHONDRITES : DIFFÉRENCIATION NOYAU-MANTEAU.	44
A) NORMALISATION AUX CHONDRITES ET PROPRIÉTÉS DES ÉLÉMENTS	
B) PHASE MÉTALLIQUE-PHASE SILICATÉE : DIFFÉRENCIATION NOYAU-MANTEAU	
C) LES BASALTES : "NORMALISATION" DES ÉLÉMENTS À FORTS COEFFICIENTS DE PARTAGE	
4- CRISTALLISATION FRACTIONNÉE	51
A) COBALT	
B) NICKEL ET CHROME	
5- LIQUIDES "PRIMAIRES" ET CRISTALLISATION FRACTIONNÉE.	59
A) COMPOSITION DES LIQUIDES PRIMAIRES ( Mg , Mg <sup>++</sup> /Mg <sup>++</sup> + Fe <sup>++</sup> ) , CONTRAINTES APPORTÉES PAR Co ET Ni.	
B) CRISTALLISATION : INFORMATIONS DE PÉTROLOGIE EXPÉRIMENTALE ET COMPORTEMENT Co - Ni .	
C) BASALTES Océaniques ET SÉRIES OPHIOLITQUES .	
 CHAPITRE IV	
LES ÉLÉMENTS À FAIBLES COEFFICIENTS DE PARTAGE OU "HYGROMAGMAPHILES".	64
1- TERRES RARES ET AUTRES ÉLÉMENTS HYGROMAGMAPHILES : GÉOCHIMIE COMPARÉE.	65
A) VALEURS DE NORMALISATION : CONCENTRATIONS DANS LES CHONDRITES	
B) DIAGRAMMES TERRES RARES "ELARGI" : POSITION DES ÉLÉMENTS NON TERRES-RARES PAR RAPPORT AUX TERRES RARES.	
2- INCOMPATIBILITÉ ET AFFINITÉ POUR LE LIQUIDE : PARAMÈTRE $\Phi$ .	71
3- VALEURS DE NORMALISATION CALCULÉES ET CONCENTRATIONS DANS LES CHONDRITES.	73
4- CLASSEMENT DES ÉLÉMENTS HYGROMAGMAPHILES ET PROCESSUS PÉROGÉNÉTIQUES.	76
5- ANOMALIE Ta/La (OU Nb/La) : PROCESSUS PÉROGÉNÉTIQUES OU MATÉRIaux SOURCES ?	81
6- HÉTÉROGÉNÉITÉ DU MANTEAU.	86
7- NOTION D'HÉTÉROGÉNÉITÉ RÉGIONALE.	93
8- CONCLUSION	95

	PAGES
CHAPITRE V	
DONNÉES OcéAN ATLANTIQUE : BASALTES : ÉLÉMENTS MAJEURS ET ÉLÉMENTS TRACES	96
WALVIS RIDGE	98
"GIBRACO"	101
"FAMOUS"	109
D.S.D.P. : LEG 37	114
D.S.D.P. - I.P.O.D. : LEG 45 , 46	122
D.S.D.P. - I.P.O.D. : LEG 49	134
D.S.D.P. - I.P.O.D. : LEG 51 , 52	147
"VEMA"	155
BIBLIOGRAPHIE "BASALTES OcéANIQUEs"	162
CHAPITRE VI	
SPECTROMÉTRIE DE FLUORESCENCE X : ÉLÉMENTS TRACES DANS LES ROCHES.	173
1- EMISSION X.	176
A) DISCONTINUITÉ D'ABSORPTION ET ÉMISSION : RÈGLES DE SÉLECTION	
B) CALCUL DES ÉNERGIES X (OU LONGUEUR D'ONDE) : LOI DE MOSELEY	
2- ABSORPTION X : INTERACTION PHOTON - MATIÈRE.	180
A) LE PHÉNOMÈNE ABSORPTION	
B) VARIATION DU COEFFICIENT D'ABSORPTION $\mu/p$ EN FONCTION DE LA LONGUEUR D'ONDE	
C) VARIATION DU COEFFICIENT D'ABSORPTION $\mu/p$ EN FONCTION DU NUMÉRO ATOMIQUE Z : CAS PARTICULIER DES ROCHES POUR $\lambda < \lambda_{Fe K_{AE}}$	
3- SPECTROMÉTRIE DE FLUORESCENCE X	184
A) EXCITATION	
B) SPECTRE OBTENU APRES EXCITATION DE L'ÉCHANTILLON	
C) INTENSITÉ DE FLUORESCENCE	
D) NOTION DE L'ÉPAISSEUR INFINIE DE L'ÉCHANTILLON EN FLUORESCENCE X : INTENSITÉ ÉMISE PAR UN ÉCHANTILLON D'ÉPAISSEUR INFINIE	
E) FILM MINCE	
4- ANALYSE DES ÉLÉMENTS MAJEURS	191

## 5- ANALYSE DES ÉLÉMENTS TRACES

194

- A) EFFET DE MATRICE
- B) INTERFERENCES INSTRUMENTALES
- C) INTERFERENCES SPECTRALES ET PHENOMENE DE SUREXCITATION
- D) DETERMINATION D'UNE CONCENTRATION A PARTIR DE LA MESURE DE L'INTENSITE BRUTE D'UN PIC
- E) QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATION
- F) CONCLUSION SUR L'ANALYSE DES ELEMENTS TRACES PAR SPECTROMETRIE DE FLUORESCENCE X

## BIBLIOGRAPHIE "FLUORESCENCE X"

217

# LISTE DES TABLEAUX

---

	pages
TABLEAU I.1 : Expressions mathématiques relatives aux modèles simples : les hypothèses supposées	12
TABLEAU II.1 : Structure électronique des ions de la première série de transition	14
TABLEAU II.2 : Energie de stabilisation des ions de la première série de transition : configuration haut spin et bas spin.	16
TABLEAU II.3 : Energie de stabilisation des ions de la première série de transition : octaèdres distordus suivant z.	18
TABLEAU II.4 : DR8 : composition de l'olivine, de la matrice vitreuse et de l'inclusion vitreuse dans l'olivine.	20
TABLEAU II.5 : DR3, basalte de Jan Mayen et péridotite de l'Hérault : composition des phases séparées.	20
TABLEAU II.6 : DR8, DR3, Jan Mayen et péridotite de l'Hérault : concentration des éléments de transition exprimées en ppm.	20
TABLEAU II.7 : Coefficients de partage des éléments de la première série de transition	21
TABLEAU II.8 : Coefficients de partage comparés des éléments de transition présentant la structure d'un gaz rare (exception : V)	29
TABLEAU II.9 : Valeurs de $\Phi = (a \Delta R_1^2 + 1) \phi$ .	31
TABLEAU III.1 : Modèle de fusion : proportions modales A	36
TABLEAU III.2 : Modèle de fusion : proportions modales B	36
TABLEAU III.3 : Modèle de fusion : concentration en Ni suivant différents modèles : proportions modales A	37
TABLEAU III.4 : Modèle de fusion : concentration en Ni suivant différents modèles : proportions modales B	37
TABLEAU III.5 : Concentrations des éléments de la première série de transition dans les péridotites	40
TABLEAU III.6 : Péridotites : valeurs moyennes et dispersions de Co , Ni , Cr et Ti	40
TABLEAU III.7 : Concentrations d'éléments à forts et faibles coefficients de partage dans les basaltes "primaires" de la zone FAMOUS	41



	pages
TABLEAU V.25 : Forage 413	145
TABLEAU V.26 : Forage 417A	148
TABLEAU V.27 : Forage 417D	149
TABLEAU V.28 : Forage 418A	152
TABLEAU V.29 : "Sud Oceanographer"	156
TABLEAU V.30 : "Sud Atlantis"	156
TABLEAU V.31 : "zone de fracture Kane"	158
TABLEAU V.32 : "Sud Kane"	158
TABLEAU V.33 : "Haut 15°N"	160
TABLEAU V.34 : "Sud Vema"	160
TABLEAU VI.1 : Eléments majeurs : comparaison déterminations fluorescence X à bord (leg 37) et moyennes des analyses dans quatre laboratoires	193
TABLEAU VI.2 : Reproductibilité de mesure	193
TABLEAU VI.3 : Coefficients d'absorption massique des oxydes d'éléments majeurs : rapports de ces coefficients d'absorption calculés pour Ni $K_{\alpha}$ et Sr $K_{\alpha}$	199
TABLEAU VI.4 : Résultats d'analyses de Sr et Rb suivant différents choix pour le calcul des coefficients d'absorption	199
TABLEAU VI.5 : Coefficients d'absorption des oxydes calculés par la relation $\mu_{i} = (1 - P) \cdot 8^{\alpha} + P \cdot Z_{i}^{\alpha}$	201
TABLEAU VI.6 : Rapports constants des effets de matrice des standards internationaux pour $\alpha=2.65$ et $\alpha=2.81$	201
TABLEAU VI.7 : Influence négligeable de la valeur $\alpha$ sur les résultats	201
TABLEAU VI.8 : Ni : détermination sur poudre pastillée	207
TABLEAU VI.9 : Ni : comparaison poudre pastillée et perle	207
TABLEAU VI.10 : Intensités mesurées : Rb K	210
TABLEAU VI.11 : Intensités mesurées : Nb K	210
TABLEAU VI.12 : Intensités mesurées : Zr K	210
TABLEAU VI.13 : Intensités mesurées : Zr K	210
TABLEAU VI.14 : Rb : résultats d'analyses suivant différents modes de calcul	213
TABLEAU VI.15 : Nb : id.	213
TABLEAU VI.16 : Zr $K_{\beta}$ : id.	213
TABLEAU VI.17 : Zr $K_{\alpha}$ : id.	213
TABLEAU VI.18 : Rb , Sr : Comparaison de différentes méthodes analytiques ( absorption atomique, dilution isotopique)	215
TABLEAU VI.19 : Co , Ni , Zr : comparaison spectrométrie de fluorescence X et analyse par activation neutronique	215

## LISTE DES FIGURES

---

	pages
FIGURE I.1 : Fusion partielle; modèles et hypothèses différentes	12
FIGURE II.1 : Géométrie (probabilité de présence des électrons) des différentes orbitales s , p , d	15
FIGURE II.2 : Différence de niveau d'énergie entre orbitales d $t_{2g}$ et $e_g$ en coordination octaédrique	15
FIGURE II.3 : Octaèdre déformé suivant z : force électrostatique produite par les ligandes situés sur cet axe	18
FIGURE II.4 : Dégénérescence des niveau d'énergie $e_g$ et $t_{2g}$ pour un octaèdre déformé	18
FIGURE II.5 : Coefficients de partage des éléments de la première série de transition	23
FIGURE II.6 : Eléments de la première série de transition: rayons ioniques	25
FIGURE II.7 : Absence de fractionnement, ou fractionnement très faible de Y-Tb , Zr-Hf et Nb-Ta	27
FIGURE II.8 : Fractionnement très faible de Ta-La : classement de Nb , Zr , Y	27
FIGURE II.9 : Classement de Ti en fonction de sa possibilité de fractionnement vis à vis de Zr et Y	31
FIGURE III.1 : Variation de la concentration en Co dans le liquide et le solide au cours de la fusion partielle	35
FIGURE III.2 : Ni : mêmes informations que fig.III.1	35
FIGURE III.3 : Cr : mêmes informations que fig.III.1	35
FIGURE III.4 : Basaltes "primaires" : différentes distributions d'éléments à faibles coefficients de partage	41
FIGURE III.5 : Eléments de la première série de transition dans les basaltes : normalisation aux chondrites	46
FIGURE III.6 : Eléments de la première série de transition dans les péridotites : normalisation aux chondrites	47
FIGURE III.7 : Eléments de la première série de transition dans les basaltes : normalisation par rapport au manteau et à un basalte primaire	50
FIGURE III.8 : Basaltes : évolution théorique de la concentration d'un élément à fort coefficient de partage en fonction de la concentration d'un élément à faible coefficient de partage	54
FIGURE III.9 : Basaltes : $\log(\text{Ni}) = f(\log(\text{Ti}))$	55
FIGURE III.10: Basaltes : $\log(\text{Cr}) = f(\log(\text{Ti}))$	55
FIGURE III.11: Basaltes : $\log(\text{Cr}) = f(\log(\text{Ni}))$	56

	pages
FIGURE IV.1 : Diagramme terres rares "élargi" : zone FAMOUS : distribution plate	67
FIGURE IV.2 : Diagramme terres rares "élargi" : Reykjanes ridge	67
FIGURE IV.3 : Méthode de détermination de la position des éléments hygromagnaphiles non terres rares parmi les terres rares dans un diagramme de Coryell et Masuda	68
FIGURE IV.4 : Exemple de distribution enrichie en terres légères	68
FIGURE IV.5 : Diagramme terres rares "élargi" : basaltes à tendance alcaline de 45°N	70
FIGURE IV.6 : Diagramme terres rares "élargi" : basaltes typiquement appauvris en terres rares légères	70
FIGURE IV.7 : Zr - Hf	74
FIGURE IV.8 : Nb - Ta	74
FIGURE IV.9 : Différence La - Ta entre 36 - 63°N et 22 - 25°N	74
FIGURE IV.10: Anomalie Ti , V dans les Hawaïtes	77
FIGURE IV.11: Anomalie Ti , V pour les échantillons des bancs de Gorringe et de Joséphine	77
FIGURE IV.12, 13, 14, 15, 16. Diagramme terres rares "élargi" respectivement pour : FAMOUS, 45°N, Gorringe Joséphine, Reykjanes et les sea-mounts Empereur du pacifique	79
FIGURE IV.17, 18, 19 : Diagramme terres rares "élargi" : 22°N , 25°N et Walvis	80
FIGURE IV.20: Résumé des valeurs La - Ta pour l'ensemble des sites étudiés	80
FIGURE IV.21: log(Ta/La) normé en fonction de log(Hf/La) normé	88
FIGURE IV.22: log(La/Th) normé en fonction de log(Hf/Th) normé	90
FIGURE IV.23: Evolution de la concentration dans le liquide d'éléments de coefficients de partage 0.02 et 0.2 suivant un modèle batch partial melting	90
FIGURE IV.24: Variation de Hf/La normé en fonction de $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (d'après Allègre et al., in press)	91
FIGURE IV.25: Position des différents sites de forage et variation de profondeur à l'axe de la vallée du rift (age zéro) d'après S. Le Douran (1979)	92
FIGURE V.1 : positions des dragages Walvis Ridge	97
FIGURE V.2 : Diagramme terres rares "élargi" : Walvis Ridge	97
FIGURE V.3 : Zone de fracture Açores - Gibraltar : dragages "GIBRACO"	100
FIGURE V.4 : Diagramme terres rares "élargi" : banc de Gorringe et banc de Joséphine	105
FIGURE V.5 : "FAMOUS" : lieux de prélèvements	107
FIGURE V.6 : Leg 37 : position des forages	113
FIGURE V.7 : Leg 45 , 46 : position des forages	121
FIGURE V.8 : Leg 49 : position des forages	133
FIGURE V.9 : Leg 51 , 52 : position des forages	146
FIGURE V.10: Diagramme terres rares "élargi" : forage 417D	146
FIGURE V.11: Positions des dragages de la campagne "VEMA"	154
FIGURE V.12: Diagramme terres rares "élargi" : "sud Oceanographer"	157
FIGURE V.13: Diagramme terres rares "élargi" : "sud Atlantis"	157
FIGURE V.14: Diagramme terres rares "élargi" : zone de fracture Kane	159
FIGURE V.15: Diagramme terres rares "alargi" : "sud Kane"	159
FIGURE V.16: Diagramme terres rares "élargi" : "haut 15°N	161
FIGURE V.17: Diagramme terres rares "élargi" : "sud Vema"	161

	pages
FIGURE VI.1 : Emission - absorption : différence entre spectrométrie X et spectrométrie optique	175
FIGURE VI.2 : Effet photo-électrique : réarrangement électronique et émission X	175
FIGURE VI.3 : Emissions X possibles pour les transitions électroniques entre les couches K et N	175
FIGURE VI.4 : Absorption d'un faisceau X parallèle	179
FIGURE VI.5 : Effet Compton	179
FIGURE VI.6 : $\log(\mu/\rho) = f(\log\lambda)$	181
FIGURE VI.7 : $\mu/\rho = Z^\alpha$ , jusque $Z = 27$ ; $\alpha = 1.5 \text{ \AA}$	183
FIGURE VI.8 : $\mu/\rho = Z^\alpha$ , jusque $Z = 27$ ; $\alpha = 0.8 \text{ \AA}$	183
FIGURE VI.9 : Excitation, émission X d'un échantillon	185
FIGURE VI.10: Spectre d'un tube	185
FIGURE VI.11: Spectre observé après excitation de l'échantillon	187
FIGURE VI.12: Géométrie rayonnement primaire, rayonnement émis	187
FIGURE VI.13: Zones de non discontinuité et de continuité d'absorption par les éléments majeurs séparées par Fe $K_{AE}$	197
FIGURE VI.14: Détermination de $I_0$ par itération	205
FIGURE VI.15: Interférence Au $L_\gamma$ et Rb $K_\alpha$	205
FIGURE VI.16: Absence d'interférence sur Rb $K_\alpha$ avec un tube Mo	205
FIGURE VI.17: Etalonnage Rb avec utilisation tube Au	205
FIGURE VI.18: Etalonnage Rb avec utilisation tube Mo	205
FIGURE VI.19: Etalonnage Ni	205
FIGURE VI.20: Nb $K_\alpha$ : bruit de fond = $f(M)$	212
FIGURE VI.21: Zr $K_\beta$ : bruit de fond = $f(M)$	212
FIGURE VI.22: Zr $K_\alpha$ : bruit de fond = $f(M)$	212

# CHAPITRE I

---

## ELEMENTS TRACES

### DEFINITION ET MODELES SIMPLES

La définition d'un élément trace et les modèles mathématiques simples présentés dans ce chapitre correspondent à des notions "classiques". Ces notions sont présentées ici au titre d'une introduction générale à ce mémoire en insistant sur les "limites" de validité et les hypothèses nécessaires à leurs concepts ou formulations, hypothèses trop souvent considérées implicites au stade de l'utilisation des données pour une étude de cas.

En général, l'établissement des formules relatives aux différents modèles de cristallisation ou de fusion est réalisé cas par cas suivant le modèle. Ces formules sont ici établies à partir d'une équation générale exprimant la conservation de la masse de l'élément; ce sont des considérations sur les conditions limites de diffusion (nulle ou infinie) d'un élément trace dans les différentes phases qui permettent de formuler tel ou tel modèle classique.

## 1- COEFFICIENT DE PARTAGE : DEFINITION

-----

La définition du coefficient de partage d'un élément entre deux phases repose sur l'égalité des potentiels chimiques de l'élément dans chaque phase, en supposant un équilibre parfait entre les phases. Le potentiel chimique d'un élément  $\mu_i$  dans la phase  $i$  s'écrit :

$$\mu_i = \mu_0 + RT \log a_i$$

$\mu_i$  : potentiel chimique de l'élément dans la phase  $i$ .

$\mu_0$  : potentiel "standard" défini par rapport à un état de référence (concentration tendant vers 0 par exemple).

R : constante des gaz parfaits.

T : température absolue.

$a_i$  : activité de l'élément dans la phase  $i$ .

Activités et concentrations sont liées par la relation suivante :

$$a_i = \gamma_i c_i$$

$c_i$  étant la concentration de l'élément dans la phase  $i$ .

$\gamma_i$  étant le coefficient d'activité de l'élément dans la phase  $i$  qui traduit l'écart du comportement de l'élément par rapport à l'"idéalité" dans la phase  $i$ .

Considérant des éléments en faible concentration, on fait l'hypothèse que cet écart à l'idéalité n'existe pas et que les coefficients d'activité sont égaux à 1.

L'égalité des potentiels dans deux phases (1 et 2) peut alors s'écrire :

$$\mu_{01} + RT \log c_1 = \mu_{02} + RT \log c_2$$

et dont on peut déduire le rapport :

$$D = \frac{c_1}{c_2} = e^{-\frac{\mu_{01} - \mu_{02}}{RT}}$$

constant pour une température donnée : la constance de ce rapport, indépendamment des valeurs absolues des concentrations, correspond à la loi des "grandes dilutions" ou loi de Henry. Le coefficient de partage ainsi défini, n'est autre que le coefficient de Henry, rapport constant par exemple entre une pression partielle de vapeur et la concentration d'un composé en solution.

Dans le cas des équilibres minéraux - liquides silicatés -, on a l'habitude de définir le "coefficient de partage d'un minéral" comme étant le rapport des concentrations d'un

d'un élément trace entre le minéral et le liquide :

$$D_{\min} = \frac{c_{\min}}{c_L}$$

Les indices min et L étant relatifs au minéral et au liquide.

## 2- COEFFICIENT DE PARTAGE : LES LIMITES D'APPLICATION DE CETTE NOTION

-----

Un coefficient de partage assimilé à un coefficient de Henry n'est constant que dans la mesure où la loi de Henry est vérifiée - coefficients d'activité dans chaque phase égaux à 1 -. "Le critère" utilisé est la notion de "faible concentration"; mais il n'existe pas de loi qui permette de définir la concentration de tel élément à partir de laquelle la loi de Henry est valide. On sait que des éléments tels que terres rares, Nb, Ta ... ont le comportement d'"éléments traces"; mais le titane (à une concentration de l'ordre de 1% en  $TiO_2$ ) peut avoir un comportement très voisin de l'Yttrium (à une concentration de quelques dizaines de ppm). C'est sur le plan théorique la seule limitation à la loi de Henry; mais ceci ne signifie pas qu'un coefficient de partage soit une constante "universelle" notamment dans le cas des silicates.

Dans l'exemple simple suivant : pression partielle de  $CS_2$  en solution dans l'acétone, la loi de Henry est valide pour des fractions molaires de  $CS_2$ , inférieures à 0,015. Le solvant est très clairement défini : l'acétone reste constant au cours d'un processus d'évaporation par exemple. Dans le cas des équilibres minéraux-liquides silicatés et des processus fusion ou cristallisation, il n'en est pas de même. Le "solvant" - liquide silicaté - voit sa composition changer au cours de l'un de ces processus; l'autre phase - le minéral - peut également voir sa composition en éléments majeurs changer au cours du processus (ex: olivine, solution solide fayalite  $Fe_2SiO_4$  et forstérite  $Mg_2SiO_4$ ). Bien que la loi de Henry soit satisfaite, le coefficient de Henry ou coefficient de partage, ne peut être considéré constant que dans le cadre d'une variation limitée de la composition en éléments majeurs du liquide silicaté et (ou) du minéral.

Ne traitant que des phases condensées - liquides ou solides - l'influence de la pression n'est sans doute pas considérable. Par contre la température intervient d'une façon significative sur la valeur d'un coefficient de partage :

$$\frac{dD}{D} = \frac{\mu_{O1} - \mu_{O2}}{RT^2} dT$$

la température absolue intervenant par son carré en dénominateur de l'expression ci-dessus. En tirant parti de cette loi, on a essayé de faire un géothermomètre du partage du Ni entre olivine et augite, (Hakli et Wright 1967, Hakli 1968). Il convient toutefois de remarquer que ces auteurs n'ont pas tenu compte des possibilités de variation des coefficients de partage du Ni avec la composition du liquide et des olivines. Hakli (1968) indique une variation en MgO dans

les olivines de 34,2 à 18,6% ... Ce point est très justement remarqué par Takahashi (1978).

Le troisième point qu'il convient de signaler correspond à la notion de coefficient de partage et de coefficient de partage apparent. Un coefficient de partage mesuré peut intégrer une notion de cinétique ou de coefficient de diffusion (Albarède et Bottinga, 1972). Ce point sera discuté plus loin.

Bien que la loi de Henry puisse être satisfaite, composition en éléments majeurs des phases, température et cinétique constituent trois contraintes qui empêchent de considérer un coefficient de partage comme un paramètre universel. Les paragraphes suivants ont pour but d'identifier les autres contraintes qui limitent les interprétations liées au comportement des éléments traces dans le cadre de l'utilisation des modèles simples. Ces contraintes sont liées aux hypothèses implicites qui sont faites pour établir les formulations correspondant à ces modèles.

### 3- FUSION, CRISTALLISATION : EQUATION GENERALE

-----

Les relations classiques relatives aux phénomènes de fusion et de cristallisation reposent sur la première hypothèse implicite suivante : *coefficients de partage constants*. Elles sont établies en écrivant la conservation de la masse.

Soit  $X_i$  la proportion de la phase solide  $i$ , et  $c_i$  la concentration de l'élément considéré dans la phase solide  $i$ , la variation de masse de l'élément dans les phases solides s'écrit :

$$\Sigma d (X_i c_i)$$

La variation de masse de l'élément considéré dans le liquide est :

$$d [(1 - \Sigma X_i) c_L]$$

$c_L$  étant la concentration de l'élément dans le liquide. La conservation de la masse de l'élément dans l'ensemble du système implique :

$$(1 - \Sigma X_i) dc_L - c_L d \Sigma X_i + \Sigma X_i dc_i + \Sigma c_i d X_i = 0 \quad (1)$$

variation de masse dans la  
phase liquide
 

 variation de masse  
dans les phases solides

En supposant la loi de Henry vérifiée et le coefficient de partage constant pour le processus considéré, le coefficient de partage de l'élément entre la phase solide  $i$  et le liquide s'écrit :

$$D_i = \frac{c_i}{c_L}$$

L'équation 1 peut s'écrire sous la forme :

$$(1 - \sum X_i) dc_L - c_L d \sum X_i + \sum D_i X_i dc_L + c_L \sum D_i dX_i = 0 \quad (2)$$

A cette étape, il convient de faire intervenir une hypothèse sur la manière dont les phases solides fondent ou cristallisent; l'hypothèse la plus simple suppose une vitesse de fusion ou de cristallisation constante.

$$X_i = v_i t + X_{i0} \quad (3)$$

$$X = \sum X_i = vt + X_0 \quad (4)$$

$v_i$  : vitesse de fusion ou de cristallisation de la phase i.

t : temps.

$X_{i0}$  : proportion initiale de la phase i.

X : proportion de l'ensemble des phases solides.

v : vitesse de fusion ou de cristallisation de l'ensemble des phases solides.

$X_0$  : proportion initiale de l'ensemble des phases solides

Considérant (3) et (4), l'équation (2) peut se réécrire :

$$(1 - X) dc_L - c_L dX + \sum (v_i t + X_{i0}) D_i dc_L + c_L \sum v_i D_i dt = 0 \quad (5)$$

On définit

$$P = \sum \frac{v_i}{v} D_i$$

et

$$D_0 = \sum X_{i0} D_i$$

P représente le coefficient de partage global des phases qui fondent ou qui cristallisent dans la proportion  $\frac{v_i}{v}$ .

$D_0$  est le coefficient de partage global correspondant à l'assemblage minéralogique initial.

Tenant compte de ces deux définitions (P et  $D_0$ ), on obtient l'équation générale suivante à partir de (5) :

$$\underbrace{(1 - X) dc_L - c_L dX}_{\text{variation de masse dans la phase liquide}} + \underbrace{[P (X - X_0) + D_0] dc_L + Pc_L dX}_{\text{variation de masse dans les phases solides}} = 0 \quad (6)$$

variation de masse dans  
la phase liquide

variation de masse dans  
les phases solides

Les hypothèses utilisées pour aboutir à cette équation générale valable aussi bien pour la fusion partielle que la cristallisation fractionnée, sont les suivantes :

- conservation de la masse de l'élément considéré lors des échanges entre phases.
- Loi de Henry vérifiée, coefficients de partage constants au cours du processus considéré - impliquant équilibre parfait -

- Les phases solides fondent ou cristallisent dans des proportions définies.

#### 4- FUSION PARTIELLE

-----

Deux possibilités peuvent être considérées à partir de l'équation 6 : ou bien le liquide formé est immédiatement séparé des phases solides, ou bien l'ensemble du liquide formé reste en contact avec les phases solides.

a) PROCESSUS DE FUSION FRACTIONNEE : le liquide est immédiatement séparé des phases solides qui fondent; ce liquide peut être stocké dans une poche magmatique.

On considère l'élément de liquide produit à un temps donné; puisque tout le liquide produit ne reste pas en contact avec les phases solides, mais seulement l'élément de liquide, on ne doit pas considérer le premier terme de l'équation 6 qui correspond à l'homogénéisation du liquide produit à l'instant. On considère donc l'équation suivante :

$$- c_L dX + [P (X - X_0) + D_0] dc_L + P c_L dX = 0 \quad (7)$$

ou

$$\frac{dc_L}{c_L} = - \frac{P - 1}{P (X - X_0) + D_0} dX$$

En supposant au début du processus  $X_0 = 1$  et en tenant compte de  $X = 1 - F$ ,  $c = \frac{c_{so}}{D_0}$  pour la détermination des constantes d'intégration,  $c_{so}$  étant la concentration moyenne dans le solide initial, on obtient :

$$\frac{c_L}{c_{so}} = \frac{1}{D_0} \left( 1 - \frac{PF}{D_0} \right)^{\left( \frac{1}{P} - 1 \right)} \quad (8)$$

F, remplaçant  $(1 - X)$  correspondant à la quantité de liquide produit.  $c_L$  est la concentration de l'élément considéré dans l'élément de liquide produit.

Si les éléments de liquide produits sont regroupés dans une chambre magmatique, la concentration moyenne du liquide ainsi formé est  $\bar{c}_L$  :

$$\frac{\bar{c}_L}{c_{so}} = \frac{1}{D_0 F} \int_0^F \left( 1 - \frac{Pf}{D_0} \right)^{\left( \frac{1}{P} - 1 \right)} df$$

$$\frac{\bar{c}_L}{c_{so}} = \frac{1}{F} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{PF}{D_0} \right)^{\frac{1}{P}} \right] \quad (9)$$

En plus des hypothèses qui ont servi à établir l'équation générale (6), les relations 8 et 9 traitant de la fusion fractionnée supposent :

- un processus physique de séparation du liquide au moment de sa formation,
- le processus commence à partir d'un solide "neuf".

b) L'ENSEMBLE DU LIQUIDE PRODUIT RESTE EN EQUILIBRE AVEC LES PHASES SOLIDES.

Dans ce cas, l'ensemble des termes de l'équation 6 doit être conservé :

$$\frac{dc_L}{c_L} = \frac{(1 - P)}{1 - X + P(X - X_0) + D_0} dX$$

avec les mêmes hypothèses pour  $X_0$  et la détermination des constantes d'intégration on obtient :

$$\frac{c_L}{c_{so}} = \frac{1}{D_0 + F(1 - P)} \quad (10)$$

Cette relation suppose les hypothèses nécessaires à l'établissement de l'équation 6 et le début du processus à partir d'un solide "neuf".

Les relations 8, 9 et 10 ont été démontrées par Schilling et Winchester (1967) Gast (1968) et Shaw (1970); Shaw ne supposait pas l'équation générale 6 mais traitait chaque cas particulier. Lors de l'utilisation de ces formules, il convient de se souvenir des hypothèses que ces relations supposent, notamment la définition du coefficient de partage; à ce titre, 8 et 9 d'une part, 10 d'autre part supposent un équilibre parfait entre liquide et phases solides. Les trois relations supposent qu'au cours du processus, chacune des phases solides se réhomogénéise vis à vis de l'élément considéré: ceci signifie qu'un coefficient de diffusion grand est implicitement supposé pour l'élément considéré vis à vis de la vitesse de fusion ou vitesse de mouvement de l'interface solide-liquide.

Les modèles de fusion qui envisagent plusieurs étapes, le solide qui fond étant lui-même le résidu de fusion d'une étape antérieure du type "dynamic melting" de Langmuir et al (1977) sont des modèles dont les pôles extrêmes sont la fusion "batch melting" où l'ensemble du liquide reste en contact avec la roche et la fusion fractionnée.

c) UNE QUANTITE FINIE DE LIQUIDE RESTE EN EQUILIBRE AVEC LE SOLIDE.

Le premier terme de l'équation 6 relatif au liquide correspond à l'homogénéisation du liquide; dans le cas de la fusion fractionnée, ce terme  $(1-X)dc_L$  n'était pas à considérer puisque la quantité  $(1-X)$  de liquide ne restait pas en contact avec le solide; dans le cas de la fusion "batch" l'ensemble du liquide restant en contact, ce terme était conservé. On peut envisager le cas intermédiaire, vraisemblablement le plus probable, où une quantité finie de liquide reste en permanence en équilibre avec le solide; soit  $f$  cette quantité de liquide, l'équation 6 devient:

$$f dc_L - c_L dX + \left[ P(X - X_0) + D_0 \right] dc_L + P c_L dX = 0$$

Au début du processus  $X_0 = 1-f$  et pour  $F=f$   $c_L = \frac{c_{so}}{D_0 + f(1-P)}$  supposant le liquide en équilibre avec le solide obtenu par fusion "batch partial melting" de degré  $f$ .  $D_0$  et  $P$  correspondent aux coefficients de partage relatifs à cette étape initiale. Dans ces conditions, la concentration dans le liquide qui se sépare du système solide-liquide ( $f$ ) en équilibre est:

$$\frac{c_L}{c_{so}} = \frac{\left[ f + P(f-F) + D_0 \right] \left[ \frac{1}{F} - 1 \right]}{\left[ D_0 + f(1+P) \right] (f+D_0) \left[ \frac{1}{P} - 1 \right]}$$

A partir de cette expression, on calcule la concentration d'un liquide formé par accumulation des éléments de liquide entre les taux de fusion  $F_1$  et  $F_2$ :

$$c_L = \frac{1}{F_2 - F_1} \int_{F_1}^{F_2} c_L dF$$

$$\frac{c_L}{c_{so}} = \frac{\left[ f + P(f-F_1) + D_0 \right] \frac{1}{F_1} - \left[ f + P(f-F_2) + D_0 \right] \frac{1}{F_2}}{(F_2 - F_1) \left[ D_0 + f(1+P) \right] (f + D_0) \left[ \frac{1}{P} - 1 \right]}$$

Indépendamment de la cinétique liée aux problèmes de diffusion des éléments dans le solide ou dans le liquide au cours du processus, cette relation constitue l'une des relations les plus générales pour le processus de fusion partielle: elle permet de choisir la quantité de liquide  $f$  qui reste en équilibre avec le solide et de choisir les conditions (de  $F_1$  à  $F_2$ ) suivant lesquelles le liquide basaltique se forme.

## 5- CRISTALLISATION

---

On suit une démarche similaire à celle qui a été envisagée pour la fusion : on considère que les cristaux formés peuvent être rapidement séparés du liquide ou bien que les cristaux peuvent continuer à se développer pendant une longue période dans le liquide.

### a) CRISTALLISATION FRACTIONNEE

Les cristaux sont séparés du liquide au fur et à mesure de leur formation.

Le troisième terme de l'équation 6 ne doit pas être pris en considération : il correspondrait à l'homogénéisation dans le solide de la quantité d'élément considérée qui vient d'y entrer. En d'autres termes, les cristaux séparés au fur et à mesure de leur formation sont considérés comme des éléments de solide cristallisant au temps  $t$ . On retrouve dans le raisonnement et dans la méthode de calcul, l'analogie fusion fractionnée et cristallisation fractionnée. On considère donc l'équation suivante :

$$(1 - X) dc_L - c_L dX + P c_L dX = 0 \quad (11)$$

ou

$$\frac{dc_L}{c_L} = - \frac{P - 1}{1 - X} dX$$

En tenant compte des conditions initiales  $c_L = c_{Lo}$  concentration initiale du liquide pour  $F (= 1 - X) = 1$  on obtient la loi de Rayleigh (1896)

$$\frac{c_L}{c_{Lo}} = F^{(P - 1)} \quad (12)$$

La concentration dans le solide étant :

$$\frac{c_s}{c_{Lo}} = P F^{(P - 1)} \quad (12')$$

Outre les hypothèses nécessaires à l'établissement de l'équation 6, la loi de Rayleigh suppose une séparation immédiate des cristaux formés et le début de cristallisation à partir d'un liquide exempt de minéraux.

Croissance des cristaux dans le liquide : théoriquement, la loi de Rayleigh correspond à la formation d'éléments de solide séparés du liquide au fur et à mesure de leur formation. En fait, il est possible de supposer que les cristaux se développent dans le liquide au fur et à mesure du processus en conservant la loi de Rayleigh; il faut alors supposer qu'il n'y a pas de diffusion de l'élément dans les cristaux formés. Les cristaux formés sont zonés, seule la dernière couche cristallisée étant en équilibre avec le liquide. La concentration moyenne dans la phase solide est alors :

$$\frac{\bar{c}_s}{c_{Lo}} = \frac{P}{F-1} \int_1^F f^{(P-1)} df$$

$$\frac{\bar{c}_s}{c_{Lo}} = \frac{1 - F^P}{1 - F} \quad (13)$$

Il est important de noter que vis à vis de la diffusion de l'élément dans les phases solides, des hypothèses diamétralement opposées sont faites relatives à l'établissement des relations 8, 9 et 10 (fusion partielle) et de la relation 13. Pour les relations 8, 9 et 10 (fusion partielle), on a supposé une diffusion infinie ou plus exactement le rapport diffusion / vitesse de migration de l'interface solide/liquide infinie tandis que la diffusion ou le même rapport est supposé nul pour la cristallisation (relation 13). Ceci ne peut se concevoir qu'en supposant le processus de fusion très lent vis à vis du processus de cristallisation.

b) FORMATION DE CRISTAUX HOMOGENES : Cristallisation à l'équilibre.

On reprend ici, vis à vis du processus de diffusion, les mêmes hypothèses que pour l'établissement de la relation 10 (fusion partielle) : il y a homogénéisation du solide vis à vis de l'élément considéré au fur et à mesure de la cristallisation : on conserve les quatre termes de l'équation 6 :

$$\frac{dc_L}{c_L} = - \frac{(P-1) dX}{1 - X + P(X - X_0) + D_0}$$

en partant du liquide pur,  $X_0$  et  $D_0$  sont nuls; pour la constante d'intégration,  $X = 0$  pour  $c_L = c_{Lo}$

$$\frac{c_L}{c_{Lo}} = \frac{1}{1 + X(P-1)} = \frac{1}{1 + (1-F)(P-1)} \quad (14)$$

## 6- FUSION ET CRISTALLISATION : VITESSE DE MOUVEMENT DE L'INTERFACE ET DIFFUSION

-----

Les hypothèses permettant d'établir l'équation 6 étant satisfaites, le tableau 1 donne un résumé des conditions limites supposées pour la diffusion relatives aux différentes relations "classiques" utilisées pour la fusion partielle et la cristallisation fractionnée. Il ressort de ce tableau que toutes les relations supposent une diffusion infinie dans la phase liquide; par contre, pour les phases solides l'application de la loi de Rayleigh à la croissance des cristaux, suppose une diffusion nulle dans les phases solides, hypothèse opposée aux hypothèses prises pour l'établissement des autres relations.

Homogénéisation parfaite de chaque phase solide dans le cas des modèles de fusion proposés, non homogénéisation des phases solides dans le cas de la cristallisation fractionnée suivant la loi de Rayleigh : ces deux hypothèses contradictoires sont-elle plausibles ? Elles ne peuvent être justifiées que par une notion d'échelle de temps relative à l'un ou l'autre de

TABLEAU I.1

Relation	Information	Hypothèse diffusion
<u>Fusion</u> $\frac{c_L}{c_{so}} = \frac{1}{D_o} \left( 1 - \frac{PF}{D_o} \right) \left( \frac{1}{P} - 1 \right)$	Concentration d'un élément de liquide immédiatement séparé des phases solides.	infinie dans les solides qui fondent.
$\frac{\bar{c}_L}{c_{so}} = \frac{1}{F} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{PF}{D_o} \right)^{\frac{1}{P}} \right]$	Regroupement des éléments de liquide - concentration du liquide ainsi formé.	infinie dans le liquide
$\frac{c_L}{c_{so}} = \frac{1}{D_o + F(1-P)}$	L'ensemble du liquide formé reste en contact -en équilibre- avec les phases solides.	infinie dans les solides qui fondent et dans le liquide formé.
$\frac{c_L}{c_{so}} = \frac{[f + P(f-F) + D_o] \left[ \frac{1}{F} - 1 \right]}{[D_o + f(1+P)] (f+D_o) \left[ \frac{1}{P} - 1 \right]}$ $\frac{c_L}{c_{so}} = \frac{[f + P(f-F_1) + D_o] \frac{1}{P} - [f + P(f-F_2) + D_o] \frac{1}{P}}{(F_2-F_1) [D_o + f(1-P)] (f + D_o) \left[ \frac{1}{P} - 1 \right]}$	<p>Une quantité de liquide finie est en équilibre avec le solide</p> <p>Concentration du liquide en équilibre</p> <p>Concentration du liquide regroupé entre <math>F_1</math> et <math>F_2</math></p>	infinie dans les solides qui fondent et dans le liquide formé
<u>Cristallisation</u> $\frac{c_L}{c_{Lo}} = F \frac{(P-1)}{c_s} \text{ ou } \frac{c_s}{c_{Lo}} = PF \frac{(P-1)}{c_L}$ $\frac{\bar{c}_s}{c_{Lo}} = \frac{1 - F^P}{1 - F}$	<p>Les solides formés, sont immédiatement séparés du liquide.</p> <p>Concentration moyenne du solide formé suivant la loi de Rayleigh</p>	<p>infinie dans le liquide</p> <p>nulle dans le solide</p>
$\frac{c_L}{c_{Lo}} = \frac{1}{1 + X(P-1)}$	Formation de cristaux homogènes.	infinie dans le liquide et le solide.

Expressions mathématiques relatives aux modèles simples : les hypothèses supposées.

ces processus. Allègre et Münster (1978) passant en revue les différents modèles relatifs aux processus magmatiques font remarquer que ces échelles de temps sont vraisemblablement très différentes : grande pour le processus de fusion partielle, beaucoup plus petite pour le processus de cristallisation fractionnée. Il s'en suit, à coefficients de diffusion égaux pour chaque processus, une possibilité de migration d'un élément beaucoup plus grande dans le cas de la fusion partielle que dans celui de la cristallisation fractionnée. Cette observation rend possible la notion d'homogénéisation des phases solides dans le cas de la fusion partielle et la non-homogénéisation de ces phases dans le cas de la cristallisation fractionnée.

Il est important de noter que dans tous les cas de figure l'"équilibre" est réalisé au niveau des interfaces; les différentes relations reposent simplement sur des "conditions limite" différentes adoptées vis à vis des processus de diffusion.

A défaut de pouvoir vérifier les hypothèses de travail sur lesquelles reposent l'interprétation du comportement des éléments traces, que ce soit au niveau de la définition des coefficients de partage ou au niveau des modèles utilisés, une conclusion ne pourra être obtenue qu'à la condition de montrer que l'incertitude relative à telle hypothèse n'est pas critique vis à vis de tel élément et (ou) de tel processus.

Des exemples d'utilisation des relations "classiques" pourront être trouvés aux chapitres III et IV. on peut montrer que les concentrations d'un élément, à fort coefficient de partage, dans la phase solide et dans la phase liquide varient peu avec le taux de fusion partielle (§ III-1), et ce, indépendamment du type de modèle utilisé. Par contre, la figure I-1 montre la très forte dépendance des résultats en fonction du type de modèle de fusion pour les éléments à faibles coefficients de partage (hygromagmaphiles). Le logarithme de  $C_L/C_{SO}$  utilisé en ordonnée permet, pour les deux éléments considérés (coefficients de partage  $D_0 = P$  0.02 et 0.2), de comparer les résultats avec un diagramme normé aux chondrites, à une constante près (rapport masse du manteau / masse de la terre). La figure I-1 a) montre suivant un modèle "batch melting" qu'il est seulement possible d'obtenir un liquide enrichi en élément à coefficient de partage le plus faible par rapport à un élément à coefficient de partage plus élevé. Pour la figure I-1 b) il faut noter que les résultats peuvent représenter l'effet d'un processus actuel ou bien d'un processus ancien et actuel; ce qui a été fondu avant  $F_1$  a pu l'être à une période ancienne; le liquide obtenu entre  $F_1$  et  $F_2$  correspond nécessairement au processus actuel. Il est ainsi possible de montrer que pour  $F_2$  inférieur à 5% (taux de fusion ancien et actuel cumulé) l'élément à coefficient de partage 0.02 est nécessairement toujours enrichi dans le liquide par rapport à l'élément à coefficient de partage 0.2. Par contre, pour  $F_2 = 20\%$ , les enrichissements relatifs des deux éléments peuvent être inversés; mais il est clair que dans ce cas il n'existe pas de liquides dont l'appauvrissement en élément à coefficient de partage le plus faible soit aussi important. Choix des modèles, variations des paramètres, ajustement des coefficients de partage, comparaisons par rapport aux données expérimentales, c'est ainsi qu'il est possible d'apporter des contraintes qualitatives ou quantitatives.

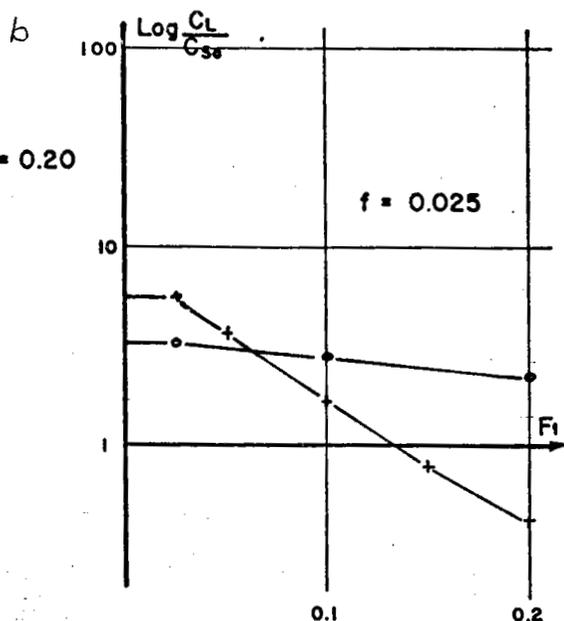
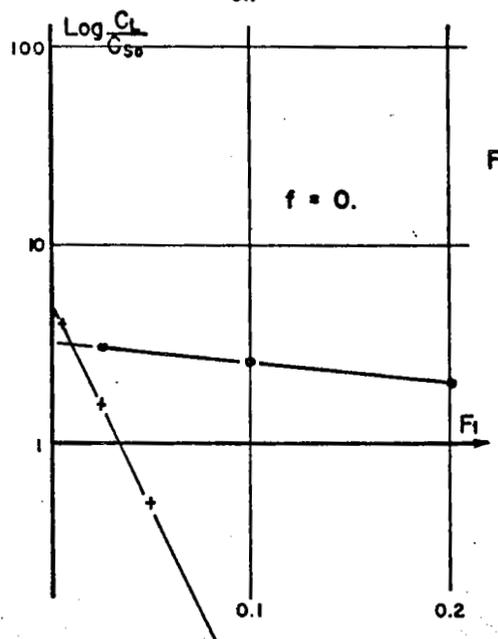
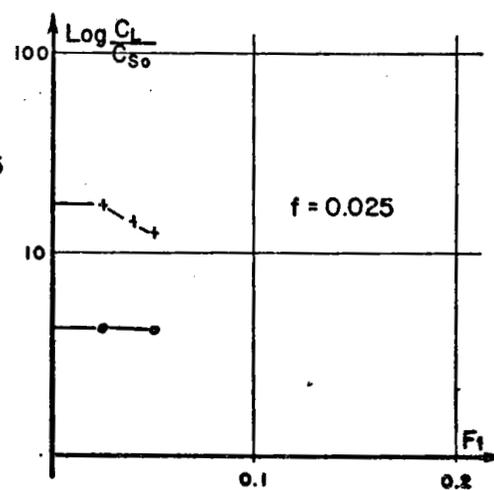
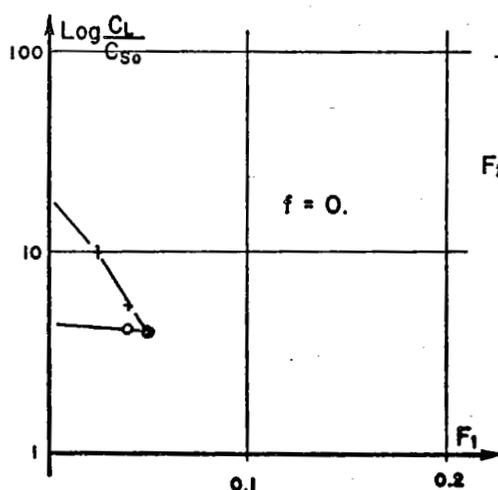
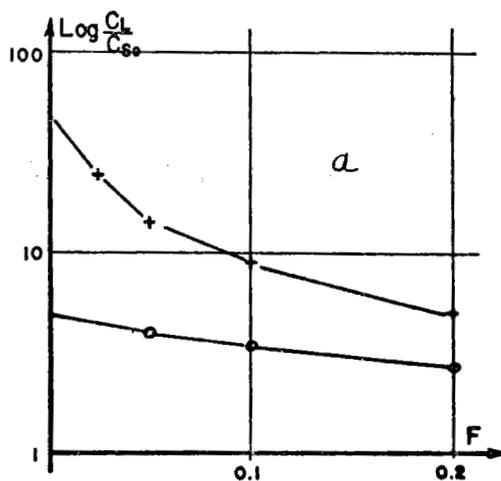


Figure I-1. + :  $D_0 = P = 0.02$  ; o :  $D_0 = P = 0.2$ . a) : "batch partial melting"

b) : modèle suivant lequel une partie  $f$  du liquide reste en équilibre avec le solide.  $F_2$  correspond au taux de fusion total;  $F_1$  correspond au taux de fusion à partir duquel on considère un liquide homogène regroupé, entre les taux  $F_1$  et  $F_2$ . 1, 10, 100 en ordonnée correspond à  $CL/CS_0$ .

## CHAPITRE II

---

### LES ELEMENTS DE TRANSITION

#### PROPRIETES : CHOIX POUR L'ETUDE DES PROCESSUS MAGMATIQUES

Ce chapitre essaie de rendre compte des propriétés "faible coefficient de partage" ou "fort coefficient de partage" de certains éléments à partir des résultats généraux obtenus dans les basaltes tholéitiques. En considérant les éléments de la première série de transition, il est observé que le comportement "fort coefficient de partage" de Cr, Co, Ni peut être expliqué par la notion de stabilisation en champ cristallin en fonction du nombre d'électrons "d" des ions correspondants. On remarque que la plupart des ions des éléments à faible coefficient de partage correspondent à des structures électroniques identiques à celles des gaz rares: ils ne peuvent donc bénéficier d'une stabilisation en champ cristallin. Une relation empirique basée sur la notion d'encombrement stérique et celle de former un complexe dans le liquide silicaté est proposée pour expliquer le classement de ces éléments suivant leur possibilité de fractionnement l'un par rapport à un autre.

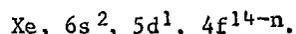
## 1- LA THEORIE DU CHAMP CRISTALLIN

-----

Plusieurs modèles ont été proposés pour expliquer les propriétés complexes des éléments de transition. Les deux extrêmes sont constitués par la notion de champ électrostatique et la notion de covalence. Entre ces deux extrêmes, la notion de champ cristallin tenant compte de quelques notions de covalence permet d'expliquer assez simplement certaines propriétés des métaux de transition. On se propose de montrer dans quelle mesure cette théorie rend compte de la classification des éléments suivant leur "coefficient de partage".

Initialement, la notion de champ cristallin a été développée par Bethe en 1929; Orgel montre en 1952 comment la théorie du champ cristallin peut rendre compte des chaleurs d'hydratation des éléments de la première série de transition. Il faut attendre 1959 pour voir une première interprétation géochimique reposant sur cette notion pour la cristallisation fractionnée par Williams (1959) à propos de la "Skaergaard intrusion".

Par définition, un élément de transition est un élément possédant une "sous couche d" partiellement remplie. Les éléments de la première série de transition ont donc la structure Ar,  $4s^2, 3d^{10-n}$ , Ar correspondant à la structure électronique de l'Argon. Pour la deuxième série de transition, Kr,  $5s^2, 4d^{10-n}$ , (Kr, structure du Krypton) et la troisième série de transition Xe,  $6s^2, 5d^{10-n}, 4f^{14}$ , (Xe, structure du Xenon), incluant les lanthanides.:



Le tableau II présente la structure électronique des éléments de la première série de transition et des ions correspondants pour des degrés d'oxydation compris entre 2 et 4.

Considérons la position d'un électron d'un atome ou ion repéré par un système de coordonnées polaires  $(r, \theta, \phi)$ . La position et l'énergie de l'électron sont décrites par une fonction d'onde, solution de l'équation de Schrödinger. Cette fonction d'onde peut être décrite par un produit de quatre fonctions :

$$\psi(r, \theta, \phi) = R(r) \cdot H(\theta) \cdot \Phi(\phi) \cdot \psi_s$$

$\psi_s$  ne dépend ni de  $r$ , ni de  $\theta$ , ni de  $\phi$ ; elle ne dépend que du spin de l'électron. La fonction radiale  $R(r)$  dépend du nombre quantique principal  $n$ ; les fonctions angulaires  $H(\theta)$  et  $\Phi(\phi)$  dépendant du nombre quantique  $l$  ou  $l$  et  $m$ .

L'orbitale  $s$  ( $l = 0$ ) ne dépend pas des fonctions radiales : elle a une symétrie sphérique. Les orbitales  $P$  ( $l = 1, m = -1, 0$  ou  $+1$ ) dépendent des fonctions  $H(\theta)$  et  $\Phi(\phi)$  se

*Trois livres peuvent être consultés : Orgel 1964, Orgel 1966 et Burns 1970.*

TABLEAU II.1

	Atome	Ion $+2$	Ion $+3$	Ion $+4$
Sc	Ar $4s^2 3d^1$	Ar $3d^1$	Ar	--
Ti	Ar $4s^2 3d^2$	Ar $3d^2$	Ar $3d^1$	Ar
V	Ar $4s^2 3d^3$	Ar $3d^3$	Ar $3d^2$	Ar $3d^1$
Cr	Ar $4s^2 3d^4$	Ar $3d^4$	Ar $3d^3$	Ar $3d^2$
Mn	Ar $4s^2 3d^5$	Ar $3d^5$	Ar $3d^4$	Ar $3d^3$
Fe	Ar $4s^2 3d^6$	Ar $3d^6$	Ar $3d^5$	--
Co	Ar $4s^2 3d^7$	Ar $3d^7$	Ar $3d^6$	--
Ni	Ar $4s^2 3d^8$	Ar $3d^8$	Ar $3d^7$	--
Cu	Ar $4s^1 3d^{10}$	Ar $3d^9$	Ar $3d^8$	--
Zn	Ar $4s^2 3d^{10}$	Ar $3d^{10}$	Ar $3d^9$	--

Structure électronique des ions de la première série de transition.

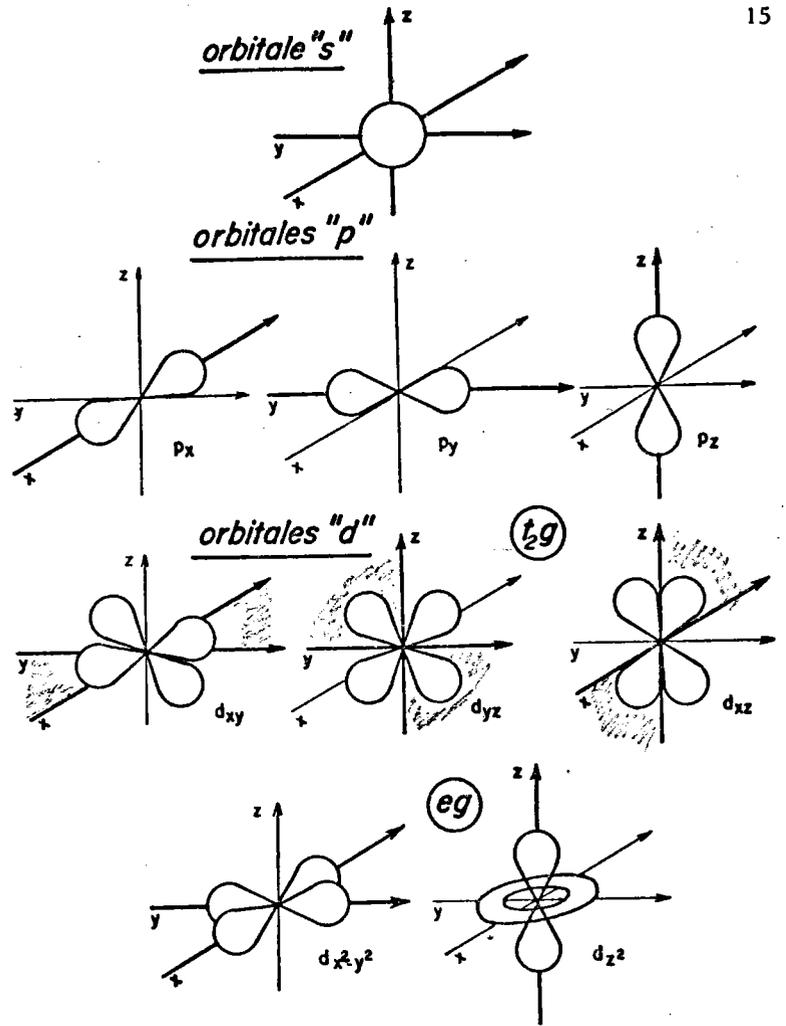


Figure II.1. Orbitales: probabilité de présence des électrons s,p et d suivant un repère orthonormé.

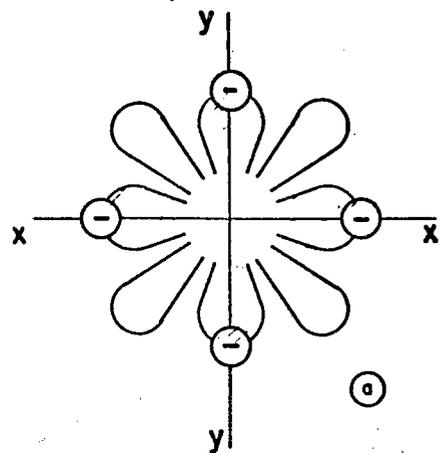


Figure II.2. a) Orbitales  $d_{xy}$  et  $d_{x^2-y^2}$ : "répulsion" plus importante provoquée par un ligande situé sur l'axe x ou y sur les électrons des orbitales  $d_{x^2-y^2}$  que sur ceux des orbitales  $d_{xy}$ .

b) Niveaux relatifs d'énergie pour un ion de transition en coordination octaédrique.

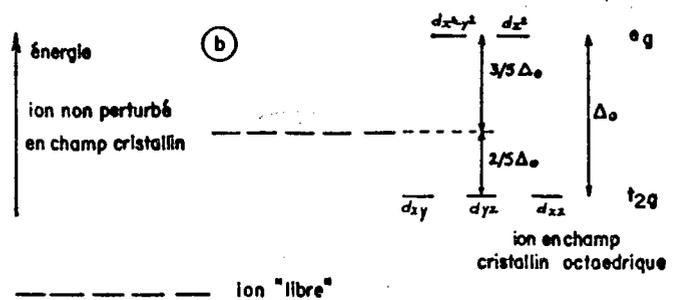


TABLEAU II.2

Nombre d'électrons 3d	Ion	Configuration "haut spin"				Configuration "bas spin"			
		Orbitales		électrons non appariés	CFSE	Orbitales		électrons non appariés	CSFE
		t <sub>2g</sub>	e <sub>g</sub>			t <sub>2g</sub>	e <sub>g</sub>		
0	Sc <sup>3+</sup> , Ti <sup>4+</sup>			0	0			0	0
1	Ti <sup>3+</sup>	↑		1	2 5 Δ <sub>o</sub>	↑		1	2 5 Δ <sub>o</sub>
2	Ti <sup>2+</sup> , V <sup>3+</sup>	↑ ↑		2	4 5 Δ <sub>o</sub>	↑ ↑		2	4 5 Δ <sub>o</sub>
3	Cr <sup>3+</sup> , Mn <sup>4+</sup>	↑ ↑ ↑		3	6 5 Δ <sub>o</sub>	↑ ↑ ↑		3	6 5 Δ <sub>o</sub>
4	Mn <sup>3+</sup> , V <sup>5+</sup>	↑ ↑ ↑	↑	4	3 5 Δ <sub>o</sub>	↑↓ ↑ ↑		2	8 5 Δ <sub>o</sub>
5	Mn <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup>	↑ ↑ ↑	↑ ↑	5	0	↑↓ ↑↓ ↑		1	10 5 Δ <sub>o</sub>
6	Fe <sup>2+</sup>	↑↓ ↑ ↑	↑ ↑	4	2 5 Δ <sub>o</sub>	↑↓ ↑↓ ↑↓		0	12 5 Δ <sub>o</sub>
7	Co <sup>2+</sup>	↑↓ ↑↓ ↑	↑ ↑	3	4 5 Δ <sub>o</sub>	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑	↑	1	9 5 Δ <sub>o</sub>
8	Ni <sup>2+</sup>	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑ ↑	2	6 5 Δ <sub>o</sub>	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓	↑ ↑	2	6 5 Δ <sub>o</sub>
9	Cu <sup>2+</sup>	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓ ↑	1	3 5 Δ <sub>o</sub>	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓ ↑	1	3 5 Δ <sub>o</sub>
10	Cu <sup>+</sup> , Zn <sup>+</sup>	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓ ↑↓	0	0	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓ ↑↓	0	0

Energie de stabilisation des ions de la première série de transition : configuration haut spin et bas spin. site octaédrique

répartissent suivant les lobes orientés suivant les axes du repère (fig.II.1). Enfin, les orbitales d ( $l = 2$ ,  $m = -2, -1, 0, 1$  et  $2$ ), correspondant aux éléments de transition, se répartissent en deux groupes. Le premier groupe désigné par  $d_{xy}$ ,  $d_{yz}$ ,  $d_{xz}$  correspond à des lobes positionnés à  $45^\circ$  par rapport aux axes de référence dans les trois plans de référence (fig.II.1). Le deuxième groupe, noté  $d_{z^2 - y^2}$  et  $d_{z^2 - x^2}$ , se répartit d'une façon différente suivant les axes repères. Le premier groupe est appelé  $t_{2g}$  le second  $e_g$ .

Lorsque l'ion d'un élément de transition est situé dans un site octaédrique, entouré par six "ligandes", en appelant ligande tout élément ou complexe chargé négativement, les électrons de cet élément sont repoussés; l'énergie de l'ion se trouve augmentée. De plus, il vient d'être montré que toutes les orbitales d ne sont pas identiques; suivant que l'électron est sur une orbitale  $t_{2g}$  ou  $e_g$  il ne sera pas repoussé de la même façon, les orbitales  $e_g$  étant situées exactement dans l'axe des ligandes, les orbitales  $t_{2g}$  se plaçant à  $45^\circ$  par rapport aux ligandes. L'énergie des électrons des orbitales  $e_g$  sera donc davantage augmentée par rapport aux électrons situés sur  $t_{2g}$ . Ceci est schématisé figure II.2 d'après Burns (1970) et Burns and Fyfe (1972). La différence d'énergie acquise par les électrons  $e_g$  et  $t_{2g}$  est appelée  $\Delta_0$ ; les trois orbitales  $t_{2g}$  voient leur énergie abaissée de  $2/5 \Delta_0$  et les deux orbitales  $e_g$  ont leur énergie augmentée de  $3/5 \Delta_0$ . Un électron en  $t_{2g}$  stabilise l'ion de  $2/5 \Delta_0$ , tandis qu'un électron en  $e_g$  déstabilise l'ion de  $3/5 \Delta_0$ . Suivant le nombre d'électrons de l'ion et leurs positions ( $e_g$ ,  $t_{2g}$ ), il en résulte une stabilisation plus ou moins grande. Il est à noter que cette possibilité de stabilisation par le champ cristallin peut conduire à ne pas respecter la règle de Hund : si la stabilisation par le champ cristallin confère à l'ion une énergie plus faible en considérant deux électrons appariés plutôt que célibataires, la règle de Hund n'est pas respectée. On est donc conduit à envisager une possibilité "haut spin" et une possibilité "bas spin" pour calculer une stabilité des éléments de transition en champ cristallin. Suivant la configuration électronique des ions, haut spin et bas spin, le tableau II.2 montre la stabilisation acquise en champ cristallin (C.F.S.E. : Crystal Field Stabilisation Energy) pour les ions de la première série de transition en coordination octaédrique.

## 2- L'EFFET JAHN-TELLER ET DEFORMATION DU RESEAU CRISTALLIN

-----

Jahn et Teller (1937) ont montré qu'une orbitale d vide ou complètement remplie pouvait modifier l'environnement d'un ion d'un métal de transition. Les électrons de l'ion peuvent atteindre un niveau d'énergie plus stable lors d'une distorsion de la géométrie des ligandes. Supposons que l'octaèdre soit déformé suivant l'axe z (fig II.3) et considérons un ion à 4 électrons. Trois électrons occupent les trois orbitales  $t_{2g}$ ; le quatrième a le choix entre les orbitales  $e_g$ ,  $d_{x^2 - y^2}$ , ou  $d_{z^2}$ . Dans le cas d'une élongation suivant l'axe z, cet électron choisira l'orbitale  $d_{z^2}$  du fait d'une répulsion moins grande des ligandes situées sur l'axe z (distance plus grande entre l'ion et ces ligandes). On voit donc apparaître une dégénérescence des niveaux d'énergie  $e_g$  (également pour les niveaux  $t_{2g}$  pour la même raison : symétrie détruite). La figure II.4 traduit ces différents états d'énergie lors des déformations simples de l'octaèdre. L'énergie de stabilisation  $\Delta_0$  (C.F.S.E.) était apparue pour tenir compte des différentes orbitales  $t_{2g}$  et  $e_g$ ; on voit ici apparaître des énergies  $\alpha$  et  $\delta$  tenant compte de la dégéné-

Figure II.3. Octaèdre déformé suivant l'axe z: interaction ligande-électron plus ou moins importante suivant la déformation.

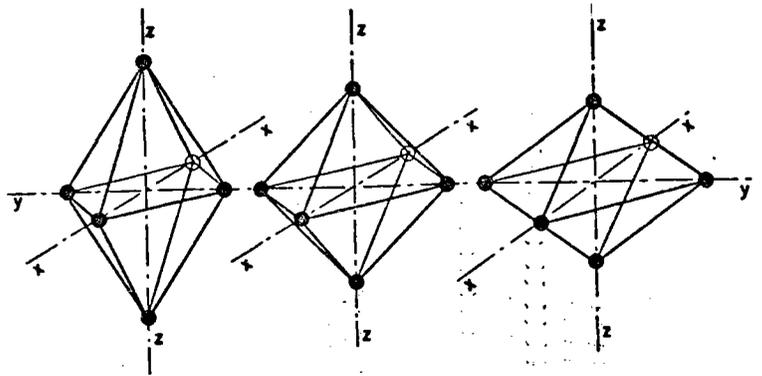


Figure II.4 Dégénérescence des niveaux d'énergie  $e_g$  et  $t_{2g}$  pour un octaèdre déformé suivant l'axe z.

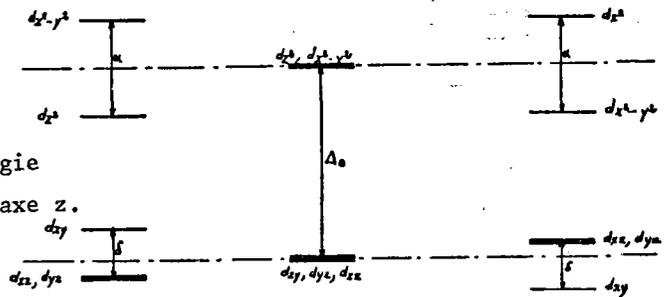


TABLEAU II.3

nombre d'électrons	configuration électronique	ion	CSFE
			octaèdre allongé suivant z
0		Sc <sup>3+</sup> , Ti <sup>4+</sup>	
1	(t <sub>2g</sub> ) <sup>1</sup>	Ti <sup>3+</sup>	$\frac{2}{5} \Delta_0 + \frac{1}{3} \delta$
2	(t <sub>2g</sub> ) <sup>2</sup>	V <sup>3+</sup> , Ti <sup>2+</sup>	$\frac{4}{5} \Delta_0 + \frac{2}{3} \delta$
3	(t <sub>2g</sub> ) <sup>3</sup>	Cr <sup>3+</sup> , Mn <sup>4+</sup>	$\frac{6}{5} \Delta_0$
4	(t <sub>2g</sub> ) <sup>3</sup> (e <sub>g</sub> ) <sup>1</sup>	Mn <sup>3+</sup>	$\frac{3}{5} \Delta_0 + \frac{1}{2} \alpha$
5	(t <sub>2g</sub> ) <sup>3</sup> (e <sub>g</sub> ) <sup>2</sup>	Fe <sup>3+</sup> , Mn <sup>2+</sup>	0
6	(t <sub>2g</sub> ) <sup>4</sup> (e <sub>g</sub> ) <sup>2</sup>	Fe <sup>2+</sup>	$\frac{2}{5} \Delta_0 + \frac{1}{3} \delta$
7	(t <sub>2g</sub> ) <sup>5</sup> (e <sub>g</sub> ) <sup>2</sup>	Co <sup>2+</sup>	$\frac{4}{5} \Delta_0 + \frac{2}{3} \delta$
8	(t <sub>2g</sub> ) <sup>6</sup> (e <sub>g</sub> ) <sup>2</sup>	Ni <sup>2+</sup>	$\frac{6}{5} \Delta_0$
9	(t <sub>2g</sub> ) <sup>6</sup> (e <sub>g</sub> ) <sup>3</sup>	Cu <sup>2+</sup>	$\frac{3}{5} \Delta_0 + \frac{1}{2} \alpha$
10	(t <sub>2g</sub> ) <sup>6</sup> (e <sub>g</sub> ) <sup>4</sup>	Cu <sup>+</sup> , Zn <sup>2+</sup>	

Energie de stabilisation des ions de la première série de transition : octaèdres distordus suivant z.

rescence des niveaux  $t_{2g}$  et  $e_g$  due à la perte de symétrie. Le tableau II.3 nous montre qu'une stabilisation accrue est obtenue pour les structures électroniques  $(t_{2g})^3 (e_g)^1$  et  $(t_{2g})^6 (e_g)^3$ . Ces deux structures correspondent d'une part aux ions  $Cr^{2+}$ ,  $Mn^{3+}$  et d'autre part à l'ion  $Cu^{2+}$ .

L'effet Jahn-Teller prévoit donc la perte de symétrie d'une disposition tétraédrique des ligandes pour permettre une stabilisation plus grande des ions dont les structures électroniques ont été mentionnées ci-dessus. Il convient également de tenir compte pour l'interprétation du comportement des éléments traces, que ceux-ci se substituent à des éléments majeurs intervenant dans des sites ne possédant pas une symétrie parfaite. Possibilité de l'effet Jahn-Teller mais aussi asymétrie initiale des sites, doivent être prises en considération.

### 3- LES COEFFICIENTS DE PARTAGE DE LA PREMIERE SERIE DE TRANSITION

-----

Les roches et minéraux ayant servi à la mesure des concentrations pour établir les coefficients de partage sont : deux tholéiites océaniques prélevées sur la ride médio-atlantique à 36°N (DR8 et DR3); un basalte alcalin de l'Ile Jan Mayen; une péridotite de l'Hérault. Les concentrations en éléments majeurs correspondant aux phases séparées de ces roches, sont présentées tableaux II.4 et II.5. Les concentrations en éléments de la première série de transition, exprimées en ppm, sont présentées tableau II.6.

Les coefficients de partage relatifs à l'olivine ont été obtenus à partir de la tholéiite DR8. Il s'agit de la bordure vitreuse d'un basalte contenant des cristaux d'olivine; ces olivines contiennent elles-mêmes des inclusions vitreuses. Les compositions des inclusions vitreuses et du verre (extérieur) sont indiquées tableau II.4. La similitude de ces deux compositions permet d'avoir une bonne approche de l'équilibre olivine-verre (liquide de composition tholéiitique).

Les coefficients de partage relatifs aux clinopyroxènes ont été obtenus à la fois à partir de la tholéiite DR3 et du basalte alcalin de Jan Mayen. Les valeurs des coefficients de partage obtenues pour les éléments traces sont concordantes, excepté pour Co et Ni. Pour le Nickel, il existe dans la littérature des données du rapport des concentrations de cet élément entre olivine et clinopyroxène : 5.1 (Evans, 1969), 4 à 6 (Hakli and Wright 1967); les minéraux séparés de la péridotite fournissent une valeur de 4.9. Compte tenu de la différence des valeurs obtenues pour le coefficient de partage du nickel dans les clinopyroxènes, à partir des mesures de DR3 ou de Jan Mayen, on préfère la valeur obtenue en utilisant la relation :

$$D_{Ni}^{cpx} = D_{Ni}^{ol} \times \frac{Ni (cpx)}{Ni (ol)} = 12.5 \times \frac{1}{5} = 2.5$$

en utilisant le coefficient de partage  $D_{Ni}^{ol}$  et la valeur du rapport mentionnée ci-dessus.

Les coefficients de partage pour l'orthopyroxène et un spinelle chromifère ont été obtenus en utilisant pour chacun de ces minéraux deux relations permettant d'obtenir deux valeurs

TABLEAU II.4

	Olivine (Fo 88.6)	Glass inclusion	Glass matrix
SiO <sub>2</sub>	40.5	49.5	49
TiO <sub>2</sub>	.0	.7	.8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	.1	15.8	15.8
FeO	10.3	8.6	8.7
MnO	.2	.2	.2
MgO	47.8	8.8	9.3
CaO	.35	13.2	12.8
Na <sub>2</sub> O	.0	1.5	1.8
K <sub>2</sub> O	.0	.2	.2
	99.25	98.5	98.60

DR8 : composition de l'olivine, de la matrice vitreuse et de l'inclusion vitreuse dans l'olivine.

TABLEAU II.5

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	TOTAL
DR3									
Plagioclases	46.4	33.7	0.2	0.95	17.65	0.04	1.73	0.04	100.11
Clinopyroxène	49.7	2.15	24.3	7.6	16.0	0.0	0.29	0.21	100.25
Matrice	52.1	15.05	7.7	8.8	13.35	0.23	1.73	1.05	100.01
Jan Mayen									
Clinopyroxène	51.80	3.1	16.00	5.70	22.00	0.01	0.29	0.84	99.74
Matrice	45.4	14.45	6.20	14.45	12.25	1.5	1.63	3.3	99.18
Péridotite									
Olivine	40.60	0.05	47.60	11.10	0.15	0.02	0.0	0.02	99.67
Orthopyroxène	54.4	5.10	32.0	7.17	1.60	0.02	0.18	0.17	100.77
Clinopyroxène	51.0	6.90	16.80	4.05	17.70	0.03	1.25	0.50	98.32
Spinnelle	2.50	52.80	19.20	12.57	0.50	0.02	0.17	0.24	88.00

DR3, Jan Mayen et Péridotite de l'Hérault : composition des phases séparées.

TABLEAU II.6

	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
DR8									
Olivine	180	20	500	1215	82900	130	2050	11	43
Verre	4860	225	505	1324	75600	42	165	96	52
DR3									
Plagioclases	240	25	5	100	6650	4	5	19	8
Clinopyroxène	1260	185	3000	1080	53200	53	355	19	34
Matrice	6300	250	230	1331	61600	40	80	108	69
Jan Mayen									
Clinopyroxène	5040	200	2600	805	39900	27	165	28	16
Matrice	19800	420	200	1500	101150	44	100	142	75
Péridotite									
Olivine	120	n.d.	170	1045	77700	140	2630	7	51
Orthopyroxène	1020	91	2140	1040	50100	60	745	7	36
Clinopyroxène	3000	208	3800	695	28400	38	540	7	25
Spinnelle	1440	375	66000	310	88000	194	2420	8	410

DR8, DR3, Jan Mayen, Péridotite de l'Hérault : concentrations des éléments de transition exprimées en ppm.

TABLEAU II.7

	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
olivine / verre tholéiite	0.04	0.09	1	0.92	1	3	12.5	0.1	0.9
cpX / matrice tholéiite	0.2	0.7	13	0.82	0.86	1.3	4.4	0.2	0.5
/ matrice J.Mayen	0.25	0.5	13	0.54	0.4	0.6	1.6	0.2	0.2
ol x $\frac{cpX}{ol}$							2.5		
+ o opX									
+ cpX x $\frac{opX}{cpX}$	0.07	0.3	7.3	1.4	1.5	2	3.5	0.2	0.7
o ol x $\frac{opX}{ol}$	0.3		12.6			1.3	3.5	0.1	0.6
Spinelle									
+ cpX x $\frac{Sp}{cpX}$	0.1	1.3	220	0.4	2.6	5.1	11.2	0.2	8
o ol x $\frac{Sp}{ol}$	0.4		400	0.3	1.1	4.1	11.6	.1	7
plagioclases / ma- trice tholéiitique	0.04	0.1	0.02	0.07	0.1	0.1	0.06	0.17	0.11

+ d'après concentration péridotite.

o d'après Evans (1969), Hakli (1967), Gast (1968), et rapport de concentrations trouvées dans les péridotites.

Coefficients de partage des éléments de la première série de transition.

(tableau II-7). La correspondance entre les deux approches (les deux relations utilisées) est bonne excepté pour la valeur de  $D_{Co}^{opx}$ .

Les coefficients de partage relatifs aux plagioclases ont été obtenus à partir de la tholéiite DR3.

D'une façon générale, les coefficients de partage ainsi obtenus, sont en bon accord avec les quelques valeurs disponibles dans la littérature (Henderson and Dale, 1969; Taylor et al. 1969; Dale and Henderson, 1972; Gill, 1974; Delong, 1974; Onuma et al., 1968; Leeman, 1976; Andriambololona et al., 1975; Andriambololona, 1978).

#### 4- INTERPRETATION, REMARQUES CONCERNANT LES COEFFICIENTS DE ----- PARTAGE DES ELEMENTS DE LA PREMIERE SERIE DE TRANSITION -----

La première remarque, d'ordre général, est la suivante : les coefficients de partage de tous les éléments étudiés concernant les plagioclases sont inférieurs à 1 ( $\sim 0.1$ ); les coefficients de partage pour les minéraux ferro-magnésiens, olivine, orthopyroxène et clinopyroxène, ainsi que pour le spinelle, présentent deux maxima, l'un pour le chrome, l'autre pour le nickel. La figure II.5 présente la valeur des coefficients de partage en fonction du numéro atomique; sur la même figure est également portée l'énergie de stabilisation en champ cristallin exprimée en fraction de  $\Delta_0$  (champ octaédrique). Bien qu'il puisse y avoir une incertitude pour certains éléments sur leur degré d'oxydation ou charge des ions, les degrés d'oxydation choisis pour calculer l'énergie de stabilisation correspondent aux degrés d'oxydation les plus probables :  $Ti^{4+}$ ,  $V^{5+}$ ,  $Cr^{3+}$ ,  $Mn^{++}$ ,  $Fe^{++}$ ,  $Co^{++}$ ,  $Ni^{++}$ ,  $Cu^+$  et  $Zn^{++}$ .

Cette première remarque peut être expliquée de façon simple. Les éléments de la première série de transition entrent en général dans des sites octaédriques (coordination 6); ces éléments n'entrent donc pas dans les plagioclases où les sites disponibles ont des coordinances de 8 à 12. Les sites  $M_1$  et  $M_2$  des minéraux ferro-magnésiens sont approximativement octaédriques; la forme en W renversé, avec des maxima pour Cr et Ni (fig.II.5), correspond à la loi de stabilisation en site octaédrique par le champ cristallin.

En toute rigueur, pour rendre compte de la distribution des coefficients de partage mesurés, il faudrait tenir compte d'une part de l'effet de stabilisation en champ cristallin mais aussi d'autre part d'une possible énergie de stabilisation dans la phase liquide. Pour ce faire, il faudrait connaître la "structure" du liquide silicaté ou plus exactement l'environnement de l'ion considéré dans le liquide silicaté. En définitive, les coefficients de partage mesurés permettent de rendre compte d'une différence d'énergie d'un ion entre phases minérales et phase liquide; la notion de stabilisation en site octaédrique par le champ cristallin permet néanmoins d'expliquer qualitativement les résultats obtenus.

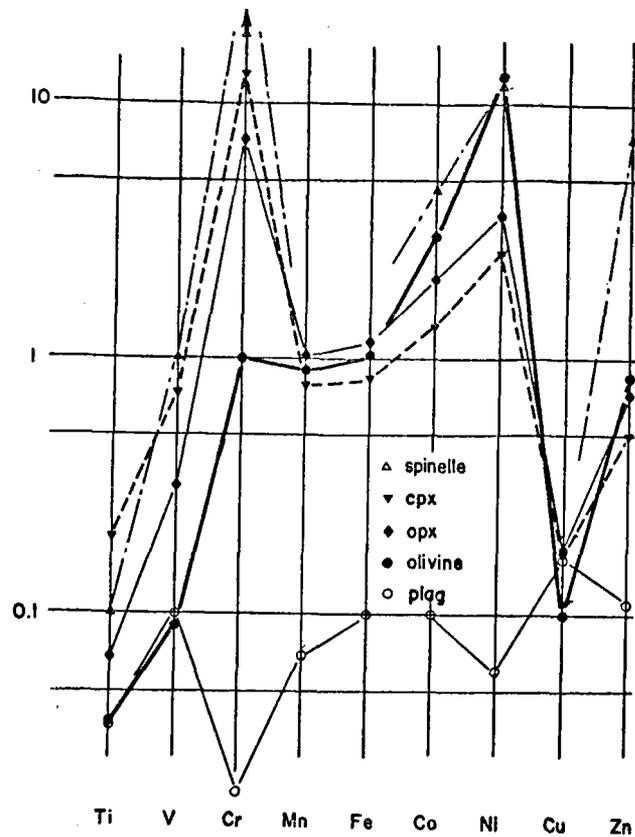


Figure II.5. Coefficients de partage et énergie de stabilisation des éléments de la première série de transition.

*La distribution générale des coefficients de partage des éléments de la première série de transition est en accord avec la notion de stabilisation par le champ cristallin.*

On observe ensuite que les éléments qui ne bénéficient pas de stabilisation en champ cristallin possèdent des coefficients de partage inférieurs à 1 (Ti, V, Cu, Zn) ou de l'ordre de 1 pour les éléments mineurs ou majeurs que sont Mn et Fe. On conçoit qu'en absence de stabilisation dans le solide,  $Zn^{++}$  se partage à peu près également entre solide et liquide, avec une légère préférence pour le liquide ( $D_{Zn}$  compris entre 0.5 et 0.8 dans les minéraux ferro-magnésiens). Par contre, les valeurs des coefficients de partage du Titane et du Vanadium, éléments

qui ne bénéficient pas non plus de stabilisation dans le solide, sont nettement plus faibles. Entre  $Zn^{2+}$  d'une part,  $Ti^{4+}$ ,  $V^{5+}$  de l'autre, à stabilisation égale dans le solide (nulle), on peut voir dans la différence entre leurs coefficients de partage, l'évidence de la formation de complexes dans le liquide pour les ions de charge élevée, par analogie aux complexes formés en solution aqueuse (Treuil, 1973). Le cas de Ti et V sera rediscuté ultérieurement avec les éléments des deuxième et troisième série de transition dont les ions possèdent également la structure électronique d'un gaz rare. Si la notion de formation de complexe dans le liquide doit intervenir pour Ti et V, on verra que V ne se trouve vraisemblablement pas à l'état  $V^{5+}$ .

On a souvent voulu attribuer le comportement "anormal" du cuivre à l'effet Jahn-Teller; or, il convient de remarquer que l'effet Jahn-Teller pourrait contribuer à une stabilisation du Cu en site octaédrique : ceci ne correspond pas à l'observation, les coefficients de partage du Cu étant nettement plus faibles que ceux du Zn. D'autre part, pour bénéficier de l'effet Jahn-Teller, le cuivre doit être à l'état  $Cu^{2+}$ , ce qui lui donnerait déjà - sans compter l'effet Jahn-Teller - une stabilisation en champ octaédrique (tableau II.2). Il doit donc être déduit de cette remarque que le cuivre n'est pas à l'état  $Cu^{2+}$  mais à l'état  $Cu^+$ . L'ordre de grandeur faible des coefficients de partage du cuivre peut alors simplement s'expliquer sur les critères de stabilisation en champ cristallin nulle et de la taille de l'ion  $Cu^+$  nettement plus grande que celle des autres ions de transition. (fig.II.6).

L'explication du comportement des éléments de transition fait certes appel à la notion de stabilisation en champ cristallin mais également à des notions plus simples, rayons ioniques, charges ... (règles de Goldschmidt...). La discussion sur Ti, V, Cu et Zn en est un exemple. La dernière observation concernant la figure II.5 pour son interprétation doit également et nécessairement faire appel à d'autres notions que celle du champ cristallin. Tout d'abord, considérant le Ni, on observe pour olivine, orthopyroxène et clinopyroxène, différentes valeurs du coefficient de partage; ceci n'est pas en désaccord avec la notion de stabilisation en champ cristallin : les énergies  $\Delta_0$  sont différentes pour les trois minéraux considérés. Un calcul théorique est difficile : on peut simplement observer que les sites  $M_1$  et surtout  $M_2$  sont de plus en plus déformés, présentant des distances métal-oxygène de plus en plus grandes, dans le sens olivine, orthopyroxène et clinopyroxène. En conséquence, la valeur de  $\Delta_0$  décroît dans le même sens; on peut ainsi expliquer les valeurs des coefficients de partage trouvés :

$$D_{Ni}^{ol} > D_{Ni}^{opx} > D_{Ni}^{cpx}$$

Par contre, considérant le chrome, la classification des coefficients de partage suivant les mêmes minéraux est inverse. Ce phénomène ne peut pas s'expliquer par la simple considération de variation de  $\Delta_0$  (qui serait inverse de celle relative à Ni) ni par des différences de rayons ioniques (fig.II.6). L'explication de cette inversion doit vraisemblablement être recherchée dans la différence des charges des deux ions considérés  $Ni^{2+}$  et  $Cr^{3+}$ . Pour le Nickel, un ion  $2+$  se substitue à un ion  $2+$  ( $Mg^{2+}$ ). Il n'y avait donc pas, pour l'interprétation, à tenir compte de défaut de charge. Dans le cas du chrome, tout en considérant l'effet de stabilisation en champ cristallin, il convient de tenir compte du défaut de charge apporté par le remplacement d'un ion  $Mg^{2+}$  par un ion  $Cr^{3+}$ . Cette substitution est d'autant plus facile que ces défauts de charges peuvent être compensés par la partie "anionique" de la structure, d'autant

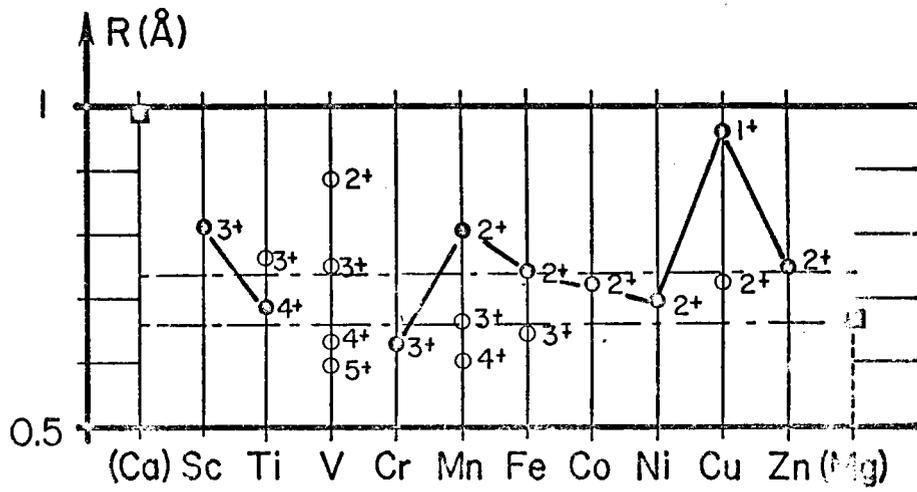


Figure II.6: Eléments de la première série de transition: rayons ioniques

plus facile par exemple que la concentration en Aluminium est plus grande. Considérant ces minéraux (olivine, orthopyroxène, clinopyroxène), on observe des concentrations en  $Al_2O_3$  croissantes dans le sens indiqué (tableau II.5). On peut donc expliquer la classification inverse des coefficients de partage du Cr par rapport au Nickel en indiquant que la possibilité de compensation de charge  $Mg^{2+} \rightarrow Cr^{3+}$  se superpose à la valeur absolue  $\Delta_0$  correspondant à la stabilisation par le champ cristallin. Dans la structure spinelle, le chrome bénéficie d'une part d'une valeur élevée de  $\Delta_0$  (régularité des sites octaédriques) et de sites dans lesquels la charge  $3+$  est compensée; le coefficient de partage est très élevé au point que cet élément devient un élément majeur dans cette structure.

Les remarques faites jusqu'ici ne portent que sur la classification des coefficients de partage suivant les éléments ou les minéraux; les valeurs indiquées tableau II.7 peuvent-elles être utilisées sans plus de critique pour expliquer un problème pétrogénétique ? Les différences observées entre les différentes données disponibles dans la littérature, aussi bien qu'entre différentes déterminations présentées ici (tableau II.7), résultent essentiellement de deux causes. L'une est analytique, en englobant sous cet adjectif préparation et analyse proprement dite : pour les très forts ou très faibles coefficients de partage, une impureté de la phase la plus riche dans la phase la moins riche, peut conduire à des imprécisions importantes. L'autre raison est liée à la définition même du coefficient de partage assimilé à un coefficient de Henry qui dépend nécessairement de la composition en éléments majeurs des phases. La valeur du coefficient de partage dépendra d'autant plus de la composition des phases que celle-ci est susceptible de varier du point de vue de la concentration de l'élément majeur auquel se substitue l'élément trace. Un exemple est donné par les variations du coefficient de partage du Ni fonction de la concentration en MgO du liquide (Hart 1976, Takahashi 1978),  $D_{Ni}^{ol}$  augmentant lorsque la concentration en MgO diminue. La marge de variation de  $D_{Ni}^{ol}$  est de 3 à 14, les valeurs faibles de  $D_{Ni}^{ol}$  correspondant à des concentrations élevées en MgO dans le liquide.

Toutefois, considérant les tholéiites océaniques, on observe que leur composition varie dans un intervalle relativement petit; Mg, l'élément majeur qui avec Ti varie le plus, se situe dans un intervalle 7 - 11% exprimé en MgO. Considérant qu'un processus de fusion partielle d'une péridotite est capable de générer un liquide tholéitique (MgO  $\sim$  11%) et qu'ensuite un processus de cristallisation fractionnée est responsable des variations de MgO observées, la possibilité de variation du coefficient de partage du Ni dans l'olivine se trouve très réduite par rapport à l'intervalle considéré par Hart ou Takahashi. Le coefficient de partage  $D_{Ni}^{ol}$  mesuré à partir d'une tholéite océanique est de 12.5 pour une valeur de MgO dans le liquide de 9.4. On considèrera donc cette valeur comme une valeur moyenne de  $D_{Ni}^{ol}$  en ce qui concerne les liquides tholéitiques.

Pour les trois éléments à fort coefficients de partage Co, Ni, Cr

une conclusion - reposant sur la valeur d'un coefficient de partage - sera d'autant plus certaine que la variation du coefficient de partage est plus faible notamment en fonction de la composition des phases. Dans cet ordre d'idée, le classement suivant peut être proposé : Co, la valeur absolue de  $D_{Co}^{ol}$  variant moins que  $D_{Ni}^{ol}$  (Takahashi 1978); Ni en tenant compte des observations faites ci-dessus; Cr pour tenir compte de l'interprétation des valeurs de  $D_{Cr}^{ol}$ ,  $D_{Cr}^{opx}$ ,  $D_{Cr}^{cpx}$  et du fait que cet élément peut intervenir en tant que majeur dans les spinelles.

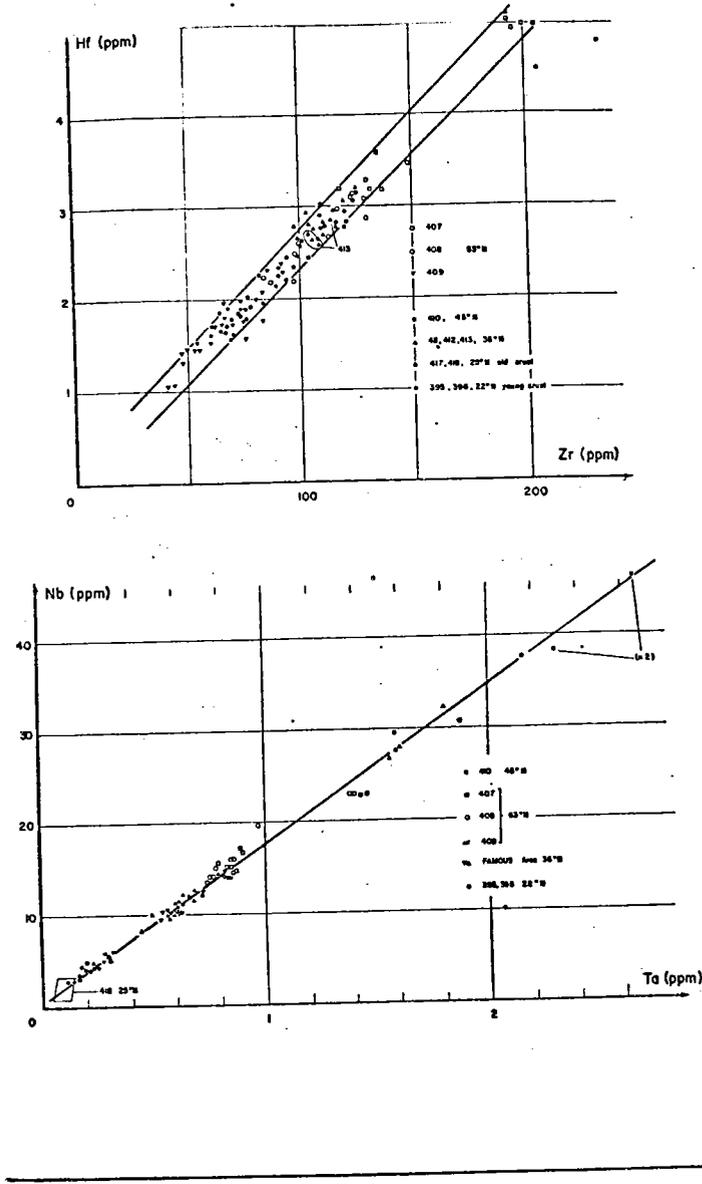


Figure II.7: Absence de fractionnement ou fractionnement très faible de Y-Tb, Zr-Hf et Nb-Ta.

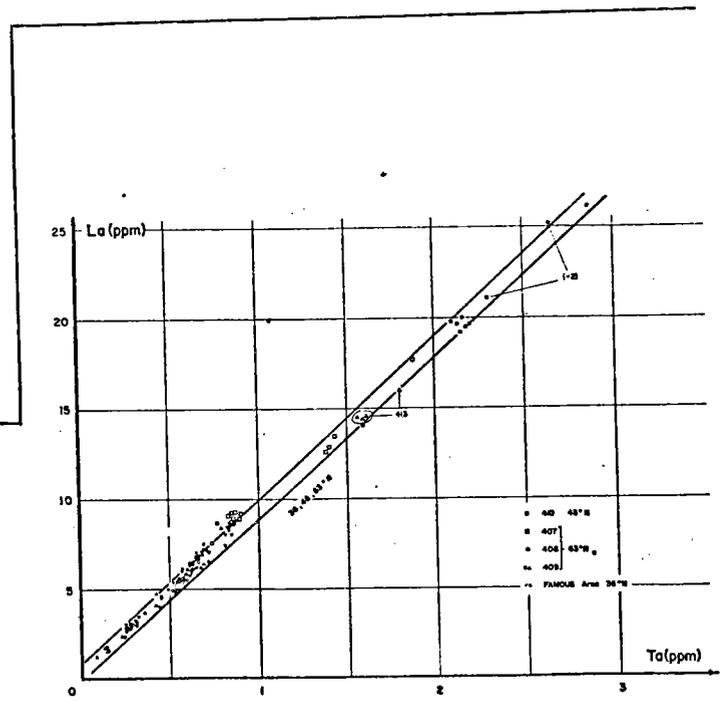
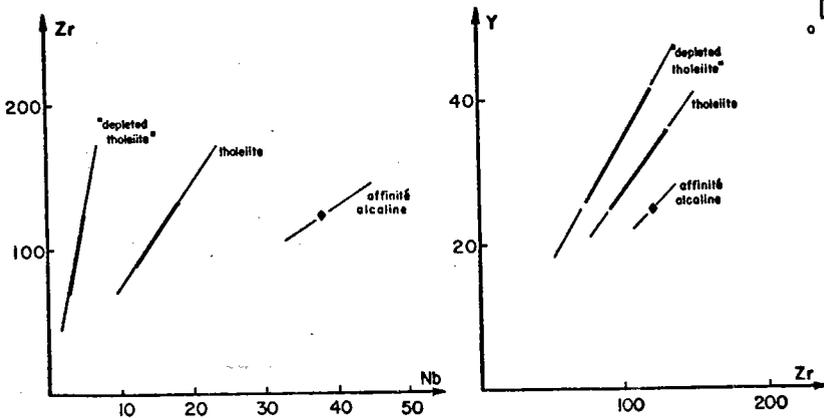


Figure II.8: Fractionnement très faible La-Ta. La comparaison des trois séries basaltiques dans les diagrammes Zr-Nb et Y-Zr permet de classer la possibilité de fractionnement de Zr par rapport à Nb et Y. La série "depleted" tholeiite correspond au site 395, tholeiite au site 408 et affinité alcaline au site 410.



## 5- ELEMENTS DE LA DEUXIEME ET TROISIEME SERIE DE TRANSITION

-----

Jusqu'au couple Pd - Pt inclu, les couples d'éléments pris dans une même colonne du tableau de la classification périodique des éléments, appartenant à la deuxième et troisième série de transition, présentent la particularité de posséder des propriétés très voisines, notamment vis à vis de la charge des ions et des rayons ioniques. Les deux derniers couples, Ag - Au et Cd - Hg présentent des différences significatives vis à vis de leurs rayons ioniques, à degré d'oxydation égal. On observe de plus, que jusqu'au groupe VII A (Tc) - Re, les ions correspondant au degré d'oxydation le plus courant, possèdent la structure électronique du gaz rare Kr ou Xe, aux électrons 4f près pour la troisième série de transition. *Tous ces ions devraient donc présenter la propriété fondamentale de ne pas être sensibles à un effet de stabilisation en champ cristallin.* Il n'est pas possible d'étudier le couple Tc - Re pour une raison évidente l'absence d'isotope stable de Tc. Le couple Mo/W n'a pu faire l'objet d'investigation pour des raisons d'ordre analytique.

Il n'est pas possible pour l'ensemble des éléments considérés Y - Terres rares, Zr - Hf et Nb - Ta de donner un tableau des coefficients de partage pour les minéraux principaux, comme pour les éléments de la première série de transition. Il existe deux raisons à cela : le problème analytique, sensu stricto, correspondant aux limites de détection vis à vis des teneurs très faibles dans certains minéraux; le problème de séparation des phases, d'autant plus critique que la valeur des coefficients de partage minéral/liquide est très faible (ou très grande). Les données disponibles actuellement, concernent les terres rares (Schnetzler et Philpotts 1968 et 1970, Onuma et al 1968, Philpotts et al 1972, Frey 1969, Cullers et al 1973, Shimizu 1975). Cann (1970) et Pearce and Cann (1971) pour les éléments de la deuxième série de transition, Treuil (1973), Treuil et Varet (1973), Treuil et Joron (1975), Joron et Treuil (1977), Joron et al. (1978), Treuil et al. (1979), Bougault et al. (1979), Villemant et al. (sous presse) pour les éléments de la troisième série de transition, montrent très clairement que l'ensemble de ces éléments dans les basaltes type tholéïitique se comportent comme des éléments à faibles coefficients de partage. Pour les éléments de la troisième série de transition, une classification est proposée par Treuil (1973). Il n'existe pas jusqu'ici de classification permettant de comparer l'ensemble de ces éléments entre eux.

A défaut de disposer de mesures de coefficients de partage pour ces éléments, on se propose de les classer suivant leurs coefficients de partage à partir de la mesure de leurs concentrations dans des séries de basaltes tholéïitiques. En comparant les éléments (ou leur rapport) deux à deux, la variation des rapports correspondants permettra cette classification. La figure II.7 présente les variations Y-Tb, Zr-Hf et Nb-Ta (groupe III, IV et V) et la figure II.8 présente les variations La-Ta, Zr-Nb et Y-Zr pour des séries basaltiques de l'atlantique nord. Les éléments d'un couple Y-Tb, Zr-Hf ou Nb-Ta ne fractionnent pas ou peu l'un vis à vis de l'autre; on observe également <sup>que</sup> Ta fractionne peu par rapport à La. A partir de la figure II.8, il est possible de déduire que le "coefficient de partage global moyen" de Zr est compris entre celui de Nb et celui de Y. On peut donc déduire de cet ensemble d'informations que le "coefficient de partage" de Ta (ou Nb) est très voisin de celui de La, et que le "coefficient de partage" de Zr (ou Hf) est compris entre celui du Nb (ou Ta) et celui de Y (ou Tb). On obtient ainsi la classifi-

TABLEAU II.8

	III A	IV A	VA
Transition series			
1	0.81 3+ Sc 3.70 v	0.68 4+ Ti 5.88 v	0.59 5+ V if lower n, r/, n/r \ / +CFSE 8.47
2	0.92 3+ Y 3.26 α	0.79 4+ Zr 5.06 ≈	0.69 5+ Nb 7.25 ≈
3	1.14 3+ La < Tb > 2.63 3.26	0.78 4+ Hf 5.13 v	0.68 5+ Ta 7.35
4		1.02 4+ Th 3.92	

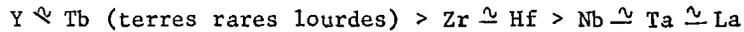
r: ionic radius      n: charge

Element

n/r

Classification des éléments suivant leurs possibilités de fractionnement deux à deux.

cation suivante de ces éléments, le "coefficient de partage global moyen" étant un paramètre définissant la possibilité d'un élément de fractionner vis à vis d'un autre, et permettant de prévoir qualitativement l'enrichissement ou l'appauvrissement d'un élément dans un liquide au cours d'un processus magmatique.



Le tableau II.8 présente ces résultats intégrés aux données disponibles obtenues à partir des mêmes séries magmatiques concernant, Sc, Ti, V et Th. (Bougault et al, 1979).

## 6- COEFFICIENTS DE PARTAGE INFÉRIEURS A 1 : DISCUSSION, INTERPRÉTATION

-----

Pour leur degré d'oxydation courant, les éléments présentés tableau II.8 possèdent des ions dont la structure électronique correspond au gaz rare qui la précède, aux électrons 4f près. Ces ions ne peuvent donc pas bénéficier d'une stabilisation quelconque en champ cristallin qui pourrait expliquer en première approximation, le classement de ces éléments vis à vis de leur coefficient de partage moyen comme c'est le cas pour les ions de la première série de transition. L'explication du comportement de ces éléments doit donc être recherchée au niveau des possibilités de substitution des ions dans une structure cristalline suivant des critères de rayon ionique, de charge et de leur possibilité de former des complexes dans les liquides (Ringwood, 1955; Treuil, 1973). Il est difficile de rendre compte du bilan du partage solide-liquide par une expression simple fonction des différents paramètres, incompatibilité et formation de complexes, par les rayons ioniques, les charges des ions et les constantes de stabilité des complexes possibles. Établir une telle expression est d'autant plus difficile qu'on ne dispose pas d'informations sur ces complexes, ceci étant dû d'une part à la nature des matériaux considérés -silicates fondus- et d'autre part, au niveau de concentration auxquels se trouvent ces éléments. A ce propos, Ti pourrait être un élément de choix pour ce type d'étude; il permettrait en effet, du fait des ordres de grandeur de concentrations auxquels il se trouve ( $\sim 1\%$  en  $TiO_2$ ), de faciliter largement l'aspect analytique en spectrométrie optique.

Treuil (1973) propose une expression, permettant de rendre compte du partage des éléments considérés, en considérant leur caractère incompatible par la différence entre leur rayon ionique et le rayon ionique des éléments auxquels ils peuvent se substituer et leur facilité à former des complexes dans le liquide par leur potentiel ionique.

$$Ph = \Delta R_i \times \phi$$

$\Delta R_i$  est la différence entre rayons ioniques,  $\phi$  est le potentiel ionique ( $\phi = z/R$ ). Plus Ph est élevé, plus l'élément se comporte comme un élément à faible coefficient de partage. Cette expression traduit bien le comportement des terres rares, Ph décroissant depuis La jusqu'au Lu.

Ph intervient comme le produit de deux facteurs;  $\phi$  est nécessairement strictement positif et peut donc exprimer la facilité de l'ion à former un complexe. Par contre  $\Delta R_i$  peut être nul ou très faible; à la limite  $\Delta R_i$  peut contribuer à donner à Ph une valeur pratiquement nulle

TABLEAU II.9

Sc	Ti	V
3 <sup>+</sup> : 4.23	3 <sup>+</sup> : 4.16 4 <sup>+</sup> : 5.88	5 <sup>+</sup> > 8
Y	Zr	Nb
3 <sup>+</sup> : 5.34	4 <sup>+</sup> : 5.74	5 <sup>+</sup> : 7.35
La Tb	Hf	Ta
3 <sup>+</sup> : 7.35 3 <sup>+</sup> : 5.37	4 <sup>+</sup> : 5.74	4 <sup>+</sup> : 7.35
	Th	
	4 <sup>+</sup> : 8.34	

Valeurs de  $\phi = (a \Delta R_i^2 + 1) \phi$ .

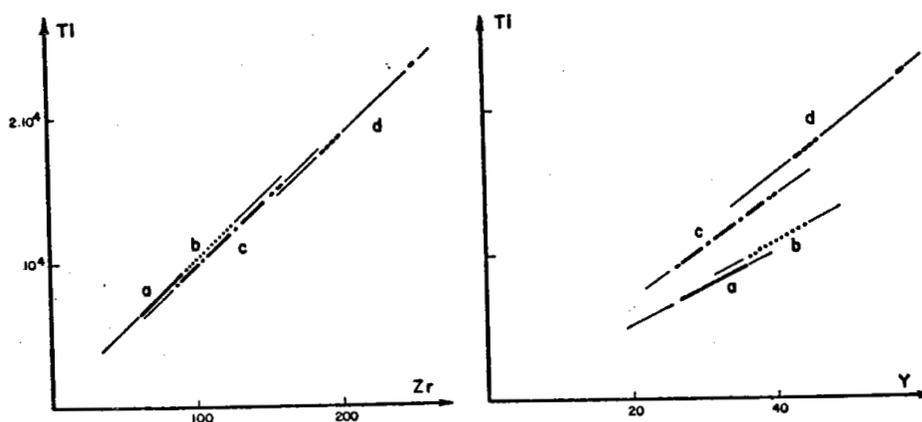


Figure II.9: Le classement des séries a,b,c et d (exemples choisis parmi les sites 407,408 et 409) conduirait à classer Ti entre Zr et Y: le très faible fractionnement Zr-Ti confirme les valeurs très voisines du paramètre (Zr:(5.74; Ti:5.88; comparé à Y:5.34)

alors que  $\phi$  peut être très élevé, l'élément ayant un coefficient de partage faible. Pour introduire la notion suivant laquelle un  $\Delta R_i$  nul a l'influence minimum sur  $\phi$ , en laissant à  $\phi$  une signification, on propose de faire intervenir  $\Delta R_i$  sous la forme empirique suivante :

$$a (\Delta R_i)^2 + 1$$

L'incompatibilité minimum ( $\Delta R_i = 0$ ) est traduite par la valeur 1 de ce paramètre, laissant une signification au potentiel chimique. On fait intervenir  $\Delta R_i$  par son carré pour exprimer que l'incompatibilité croît vraisemblablement plus rapidement que par une simple relation linéaire. Le paramètre empirique  $\phi$  pourrait donc s'écrire :

$$\phi = (a \Delta R_i^2 + 1) \phi$$

Le paramètre  $a$  qui définit en quelque sorte le poids relatif de l'incompatibilité vis à vis de la formation de complexe, peut être déterminé à partir de la similitude des coefficients de partage du La et du Ta. Observant que ces éléments ont une coordinance 6, on supposera en première approximation, que ces éléments interviennent en sites octaédriques, en remplacement de Mg ou Fe; les conclusions déduites ne devraient donc en toute logique, n'être valables que pour des coefficients de partage relatifs à l'olivine ou l'orthopyroxène, dans une moindre mesure pour les clinopyroxènes. En prenant pour valeur moyenne de rayon ionique de l'élément majeur substitué, la valeur  $0.68\text{\AA}$ , la valeur du paramètre  $a$  est de 11.06; cette valeur est obtenue en écrivant que  $\phi$  a la même valeur pour Ta et La.

Le tableau I. présente les valeurs de  $\phi$  trouvées pour les éléments considérés. Ces valeurs sont en accord avec le classement des éléments suivant leur coefficient de partage sur les points suivants :

- le thorium possède la valeur de  $\phi$  la plus grande : 8.34 ; ceci correspond effectivement au coefficient de partage le plus petit.

- Terres rares :  $\phi$  diminue depuis les terres légères jusqu'aux terres lourdes (La : 7.35, Tb : 5.37) correspondant à une augmentation du coefficient de partage.

- Deuxième et troisième série de transition :  $\phi$  augmente avec le numéro atomique (en considérant les terres rares lourdes ou terres yttriques) correspondant à des coefficients de partage de plus en plus petits.

- la valeur de  $\phi$  pour le scandium est la plus faible correspondant au coefficient de partage le plus voisin de 1 (le scandium dans les tholéiites océaniques varie effectivement dans une très faible proportion).

Pour Ti et V, il n'y a pas accord entre les valeurs de  $\phi$  et le classement des éléments suivant leur coefficient de partage. D'après la position des différentes séries basaltiques suivant les diagrammes Y - Ti et Zr - Ti (fig. II.9), la valeur du coefficient du Ti devrait se situer entre celui de Y et de Zr. On peut dire que la précision du modèle empirique proposé n'est pas suffisante; 5.88 pour Ti, 5.74 pour Zr. Néanmoins, considérant le vanadium, il est pratiquement impossible d'affirmer que cet élément se trouve au degré d'oxydation + 5; en effet la valeur de  $\phi$  trouvée confèrerait à cet élément le coefficient de partage le plus faible; or la valeur de son coefficient de partage se situe très vraisemblablement entre celle de Y et Sc. Degré d'oxydation 4 ou 3 pour V ? Il est difficile de répondre; l'ion n'a plus la configuration

du gaz rare précédant; il serait nécessaire d'établir un modèle qui, pour comparaison avec les autres éléments tiennent également compte de la notion de stabilisation en champ cristallin.

Pour tous les éléments dont la configuration électronique (aux électrons 4f près) correspond à celle d'un gaz rare, il est donc possible de rendre compte de leur classement suivant leurs coefficients de partage par des paramètres simples (rayon ionique, charge) en utilisant un modèle empirique simple. V ne se trouve vraisemblablement pas aux degrés d'oxydation  $5 V^{5+}$  qui correspondraient à la structure électronique de l'Argon.

Une étape suivante consistera à appliquer la relation proposée à l'interprétation des coefficients de partage minéraux/liquide en utilisant certaines données maintenant disponibles (Villemant et al., sous presse). Le paramètre  $\Phi$  sera utilisé au paragraphe IV; à partir de l'ensemble des données présentées au chapitre V, une technique de géochimie comparée et l'utilisation du paramètre  $\Phi$  permettront de préciser d'avantage le classement des éléments hygromagmaphiles.

## 7- CONCLUSION : CHOIX DES ELEMENTS DE TRANSITION POUR L'ETUDE DES PROCESSUS MAGMATIQUES

-----

Le critère qui sert de guide pour l'étude du comportement des éléments et des informations qui peuvent en être déduites vis à vis du processus magmatique, est la notion de fractionnement des éléments les uns vis à vis des autres. Une étude quantitative précise nécessiterait une connaissance parfaite des coefficients de partage et de leur variation pour tous les minéraux y compris ceux qui n'interviennent qu'en faible quantité. Actuellement, ce type d'information précise n'existe pas.

Par contre, pour les éléments de la première série de transition, on dispose de valeurs approchées de ces coefficients; la propriété remarquable de cette série, est de disposer des trois seuls éléments Cr, Co et Ni qui possèdent des coefficients de partage supérieurs à 1 pour des compositions de liquide tholéitique.

On dispose également d'un ensemble d'éléments dont les coefficients de partage sont inférieurs à 1; pour certains (terres rares), des valeurs approchées de leurs coefficients sont connues; pour l'ensemble, un classement obtenu à partir de leur comportement est disponible.

Ces propriétés peuvent être expliquées qualitativement suivant des critères simples de substitution dans une structure cristalline (en tenant compte des rayons ioniques et de la charge des ions) de possibilité de formation de complexes (par la notion de potentiel ionique) et de stabilisation dans un réseau cristallin.

Enfin, les éléments des couples Y - Tb (ou terres rares lourdes), Zr - Hf et Nb - Ta présentent la propriété remarquable de posséder des caractères physico chimiques très voisins.

## CHAPITRE III

---

### LES ELEMENTS A FORTS COEFFICIENTS DE PARTAGE

#### DIFFERENCIATION NOYAU-MANTEAU : CRISTALLISATION FRACTIONNEE

Les prévisions d'après modèles et les compositions des solides (péridotites) et des liquides basaltiques non différenciés montrent que le degré du processus de fusion partielle modifie peu les concentrations en Co et en Ni (à un moindre degré en Cr) dans le solide (résidu de fusion - solide initial) et dans les liquides produits.

La normalisation par rapport aux chondrites des concentrations des éléments de la première série de transition dans les roches (Allègre et al., 1968) doit être utilisée avec discernement du fait que ces éléments possèdent soit des propriétés lithophiles (Ti, V, Cr), soit des propriétés sidérophiles (Fe, Co, Ni), soit des propriétés chalcophiles (Cu, Zn). La normalisation par rapport aux chondrites de ces éléments ne traduit donc pas simplement un fractionnement au cours des processus pétrogénétiques (cas des terres rares, tous éléments lithophiles) mais rend compte également de fractionnements antérieurs entre les phases silicate-métal-sulfure. Les comparaisons entre les concentrations de Co et Ni dans les péridotites (manteau) et les concentrations de ces éléments dans la phase silicatée des chondrites montre que la différenciation noyau-manteau s'est faite dans des conditions différentes de celles correspondant à l' "équilibre" phase métallique-phase silicatée des chondrites.

La large variation des concentrations des éléments à forts coefficients de partage dans les basaltes est essentiellement le reflet du phénomène de cristallisation fractionnée. Bien que le processus de cristallisation fractionnée soit difficilement quantifiable en utilisant les données relatives à ces éléments, le chrome, le cobalt et le nickel apportent néanmoins des contraintes vis à vis de la définition d'un liquide "primaire" et de la quantité de minéraux ferromagnésiens susceptible de cristalliser à partir d'un liquide basaltique.

## 1- FUSION PARTIELLE : PREVISIONS D'APRES MODELES

-----

Il a été indiqué (§ I-4) que les modèles de fusion "batch partial melting" et "fusion fractionnée" constituent les deux pôles extrêmes vis à vis de la dynamique du processus relatif à la séparation des phases solide et liquide. Dans le premier cas l'ensemble du liquide formé reste en équilibre avec le solide, dans le second seul l'élément de liquide formé est en équilibre avec le solide, le liquide se séparant du solide au fur et à mesure de sa formation. La variation de la valeur des coefficients de partage de Cr, Ni, Co a été mentionnée § II-4, l'amplitude de cette variation en fonction de la composition en éléments majeurs (Mg notamment) décroissant dans le sens Cr, Ni, Co. Choix du modèle de fusion et variation des coefficients de partage sont les deux contraintes essentielles pouvant limiter un raisonnement quantitatif. Malgré cette limitation, on se propose néanmoins de montrer que des informations quantitatives peuvent être obtenues à partir des éléments à forts coefficients de partage.

Pour tester la variation possible des concentrations du liquide et du solide (résidu) au cours de la fusion, en fonction de la composition initiale du solide, deux solides initiaux ont été choisis (Allégre et al., 1973), l'un sans grenat (modèle A), l'autre avec grenat (modèle B).

Les tableaux III.1 et III.2 présentent les compositions modales du solide et les proportions des minéraux qui fondent. On suppose, dans un intervalle de fusion  $\Delta F$ , que la vitesse de fusion de chaque minéral est constante; certains minéraux peuvent donc disparaître et différentes "étapes" de fusion doivent être définies. Dans le modèle B par exemple le grenat disparaît au bout de 16,4% de fusion de l'assemblage de départ. Il est bien évident que cette constance de vitesse de fusion dans un intervalle de fusion et cette notion d'"étape" ne constituent qu'une commodité de calcul; ces différentes étapes permettront également d'apprécier les variations de concentrations (solide et liquide) au cours du processus lorsqu'intervient une discontinuité (disparition d'une phase). Les tableaux III.3 et III.4 montrent les résultats obtenus pour le nickel. Les figures III.1, III.2 et III.3 présentent les résultats pour Co, Ni et Cr. Quatre résultats sont représentés sur chaque figure correspondant d'une part aux choix des assemblages de départ (A et B) et d'autre part aux modèles "extrêmes" "batch partial melting" a et "fusion fractionnée" b.

Le premier résultat remarquable est l'indépendance des rapports  $CS/CSo$  vis à vis du solide de départ et des modèles choisis. De plus, ces rapports varient peu (de 1 à 1,3) entre 0 et 25% de fusion. La même remarque peut être faite pour les liquides - peu de dépendance du solide de départ et faible variation de  $CL/CSo$  -, mais en toute rigueur seulement pour Ni et Co. Pour le chrome, on ne pourra considérer sa concentration dans le liquide peu dépendante de F qu'à la condition de supposer que la fusion intervient suivant un seul modèle, à partir d'un seul type de solide initial et dans un intervalle de fusion limité (Bougault, 1977).

Ces résultats s'expliquent très bien en considérant la dérivée de l'expression donnant  $CL/CSo$  par rapport à F; dans le cas du modèle batch partial melting par exemple,

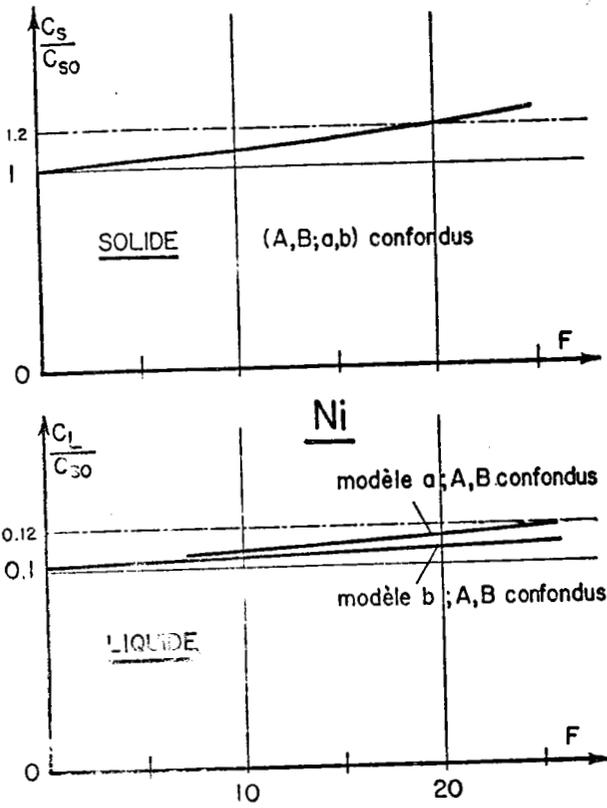


Figure III.2

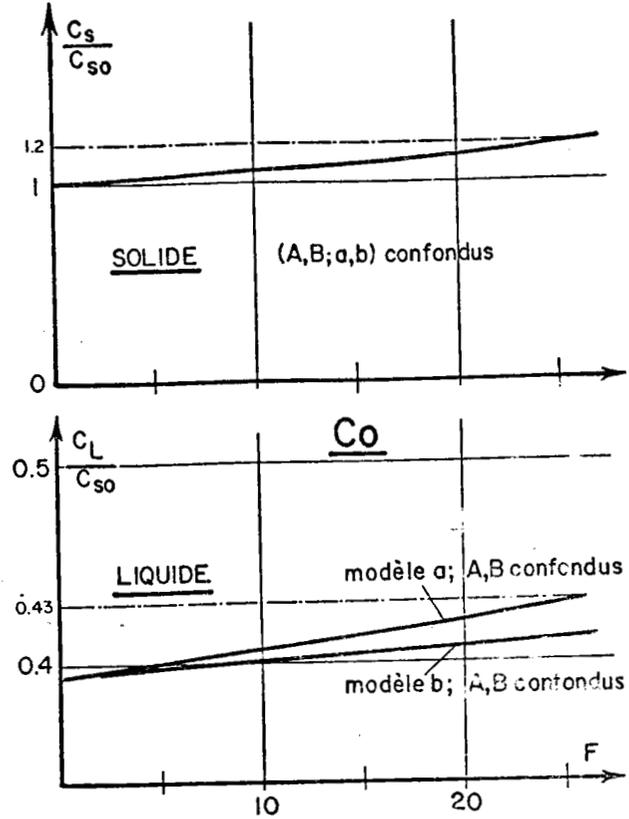


Figure III.1

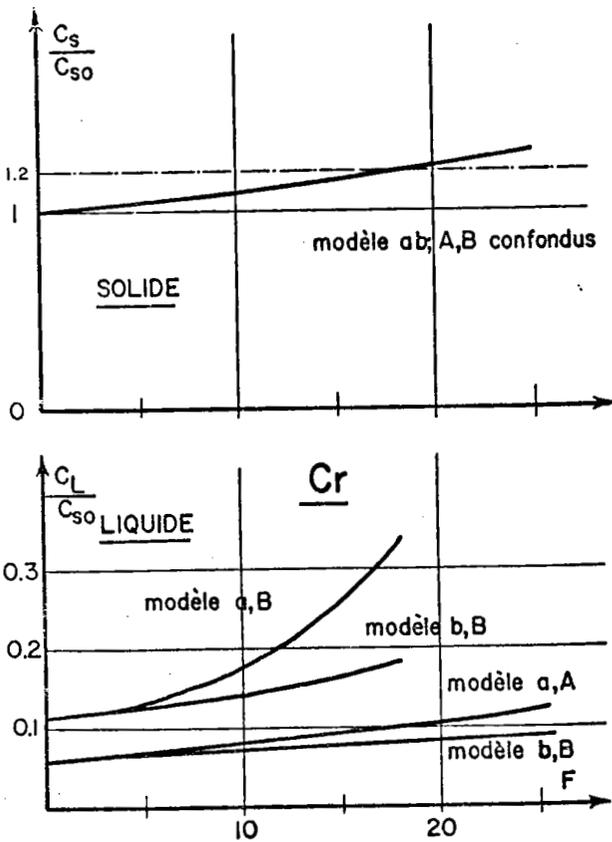


Figure III.3

Figure III.1: Variation de la concentration en Co dans le solide et le liquide au cours de la fusion partielle (F). A, B: deux modèles de composition modale différente; a, b "batch partial melting" et fusion fractionnée.

Figure III.2: Variation de la concentration en Ni dans le solide et le liquide au cours de la fusion partielle (F). Mêmes informations que figure III.1.

Figure III.3: Variation de la concentration en Cr dans le solide et le liquide au cours de la fusion partielle (F). Mêmes informations que figure III.1.

	Ol.	Opx.	Cpx.	Plag.	Grt.	Spl.
1ère Etape	F : 0 - 0.25					
$X_i$	0.5	0.25	0.20	0.00	0.00	0.05
$XF_i$	0.05	0.05	0.80	0.00	0.00	0.10
2ème Etape	F : 0.25 - 0.30					
$X_i$	0.487	0.237				0.025
$XF_i$	0.25	0.25				0.50
3ème Etape	F : 0.30 - 0.75					
$X_i$	0.475	0.225				
$XF_i$	0.50	0.50				
	$D_0^1$	$P^1$	$D_0^2$	$P^2$	$D_0^3$	$P^3$
Ti	0.080	0.175	0.037	0.074	0.033	0.052
V	0.34	0.74	0.15	0.77	0.11	0.20
Cr	15.92	32.81	7.72	112	2.12	4.15
Co	2.54	1.82	2.08	3.82	1.89	2.54
Ni	9.68	6.41	8.08	14.47	7.34	9.35

Tableau III.1: Fusion; modèle de proportions modales A et coefficients  $D_0$  et P. La fin de chaque étape correspond à la disparition d'un minéral.  $X_i$  est la proportion modale du minéral i au début de l'étape;  $XF_i$  est la proportion de fusion du minéral i. Les indices de  $D_0$  et de P correspondent à chaque étape.

	Ol.	Opx.	Cpx.	Plag.	Grt.	Spl.		
1ère Etape	F : 0 - 0.1							
$X_i$	0.55	0.30	0.12	0.00	0.01	0.02		
$XF_i$	0.05	0.05	0.70		0.1	0.1		
2ème Etape	F : 0.1 - 0.164							
$X_i$	0.545	0.295	0.05		0.00	0.01		
$XF_i$	0.055	0.055	0.777			0.111		
3ème Etape	F : 0.164 - 0.170							
$X_i$	0.54	0.29	0.00			0.003		
$XF_i$	0.25	0.25				0.50		
4ème Etape	F : 0.17 - 0.75							
$X_i$	0.54	0.29				0.00		
$XF_i$	0.5	0.5						
	$D_0^1$	$P^1$	$D_0^2$	$P^2$	$D_0^3$	$P^3$	$D_0^4$	$P^4$
Ti	0.067	0.16	0.51	0.17	0.04	0.07	0.04	0.05
V	0.26	0.69	0.19	0.75	0.14	0.77	0.14	0.20
Cr	8.77	32.21	5.55	35.02	3.30	112.10	2.66	4.15
Co	2.56	1.91	2.36	2.18	2.24	3.82	2.22	2.54
Ni	9.68	5.98	9.08	6.64	8.65	14.47	8.57	9.35

Tableau III.2: Fusion; modèle de proportions modales B et coefficients  $D_0$  et P. Mêmes informations qu'au tableau III.1.

F	a		b		
	$\frac{C_L}{C_{so}}$	$\frac{C_s}{C_{so}}$	$\frac{C_L}{C_{so}}$	$\frac{\bar{C}_L}{C_{so}}$	$\frac{C_s}{C_{so}}$
1ère Etape	F : 0.00 - 0.25		$D_0^1=9.68$ , $P^1=6.41$		
0.00	0.103	1.	0.103		
0.01	0.103	1.009	0.103	0.103	1.009
0.05	0.106	1.047	0.106	0.105	1.047
0.10	0.109	1.099	0.109	0.106	1.099
0.15	0.113	1.156	0.113	0.108	1.157
0.20	0.116	1.220	0.116	0.109	1.222
0.25	0.120	1.29	0.120	0.111	1.29
2ème Etape	F : 0.25 - 0.30		$D_0^2=8.08$ , $P^2=14.47$		
0.28	0.126	1.34	0.126	0.112	1.34
0.30	0.130	1.37	0.131	0.113	1.38
3ème Etape	F : 0.30 - 0.75		$D_0^3=7.36$ , $P^3=9.35$		
0.32	0.133	1.40	0.134	0.115	1.42
0.40	0.146	1.57	0.148	0.120	1.58

Tableau III.3: Fusion; modèle de proportions A. Concentrations de Ni par rapport au solide initial ( $C_{so}$ ) dans le liquide ( $C_L$  et  $\bar{C}_L$ ) et dans le solide ( $C_s$ ) suivant le modèle "batch partial melting" (a) et le modèle "fusion fractionnée" (b).

F	a		b		
	$\frac{C_L}{C_{so}}$	$\frac{C_s}{C_{so}}$	$\frac{C_L}{C_{so}}$	$\frac{\bar{C}_L}{C_{so}}$	$\frac{C_s}{C_{so}}$
1ère Etape	F : 0.00 - 0.10		$D_0^1=9.68$ , $P^1=5.98$		
0.00	0.103	1.	0.103		
0.01	0.104	1.009	0.104	0.104	1.009
0.05	0.106	1.047	0.106	0.104	1.047
0.08	0.108	1.077	0.108	0.105	1.077
0.10	0.109	1.099	0.109	0.106	1.099
2ème Etape	F : 0.10 - 0.164		$D_0^2=9.08$ , $P^2=6.64$		
0.12	0.110	1.12	0.110	0.106	1.12
0.14	0.112	1.14	0.112	0.107	1.14
0.164	0.113	1.17	0.113	0.108	1.17
3ème Etape	F : 0.164 - 0.170		$D_0^3=8.65$ , $P^3=14.47$		
0.166	0.114	1.18	0.114	0.108	1.18
0.170	0.115	1.18	0.115	0.108	1.18
4ème Etape	F : 0.17 - 0.75		$D_0^4=8.57$ , $P^4=9.35$		
0.20	0.118	1.22	0.118	0.109	1.22
0.25	0.124	1.29	0.124	0.112	1.29
0.30	0.131	1.37	0.131	0.114	1.38

Tableau III.4: Fusion; modèle de proportions modales B. Concentrations de Ni. Mêmes informations qu'au tableau III.3.

$$\frac{d (CL_0/CS_0)}{dF} = - \frac{1-P}{(D_0+F(1-P))^2}$$

Dans cette expression, pour cobalt et nickel  $F(1-P)$  est petit par rapport à  $D_0$ ;  $CL_0/CS_0$  varie donc peu en fonction de  $F$ ; de plus, les valeurs de  $D_0$  et  $P$  dépendent peu des modèles choisis. En définitive, la non dépendance de la concentration du nickel et du cobalt dans le liquide résulte de deux hypothèses faites pour les solides initiaux et les modèles de fusion :

- l'olivine est un constituant majeur du solide initial,
- l'olivine ne fond qu'en faible proportion (vis à vis des clinopyroxènes notamment).

L'olivine joue donc un rôle tampon lors de la fusion vis à vis du nickel et du cobalt; la concentration de ces métaux dans le liquide est indépendante du taux de fusion partielle et du solide initial pourvu que les deux hypothèses mentionnées ci-dessus soient vérifiées. Dans le cas du chrome,  $F(1-P)$  n'est plus négligeable par rapport à  $D_0$  et  $P$  varie considérablement avec la teneur en spinelle. C'est la raison pour laquelle la concentration en chrome dans le liquide peut être considérée comme peu dépendante de  $F$  à condition de ne considérer qu'un intervalle de variation du taux de fusion, une composition donnée du solide initiale et un seul modèle de fusion.

Frey et al (1977) ne veulent pas considérer la possibilité d'établir un modèle à partir de ces éléments à fort coefficient de partage, arguant de la variabilité des valeurs des coefficients publiés dans la littérature et de la variation de ces coefficients (Ni-MgO Hart, 1976). Néanmoins, l'interprétation proposée repose sur une notion d'effet tampon, effet qui intervient à la seule condition qu'une ou plusieurs phases solides reste(nt) présente(s) (olivine), affectée pour l'élément trace considéré d'un coefficient de partage élevé; hormis le cas d'un liquide à très forte teneur en MgO en équilibre avec le solide, cette condition est réalisée. Il est possible de discuter la valeur absolue des coefficients de partage Co, Ni (et Cr) suivant la teneur en MgO du liquide, donc les valeurs absolues de la concentration de ces éléments dans le liquide; il n'en reste pas moins vrai que ces concentrations devraient être indépendantes du taux de fusion partielle. C'est ce qu'on se propose de démontrer à partir des résultats.

## 2- FUSION PARTIELLE : DONNEES, RESULTATS, DISCUSSION

-----

La vérification des résultats théoriques présentés ci-dessus peut être faite soit à partir de matériel du manteau (péridotites), soit à partir des liquides (basaltes). Dans les deux cas la vérification sera d'autant plus probante que le peu de variation attendu des concentrations de Cr, Ni et Co pourra être montré avec évidence de variation significative de taux de fusion partielle.

## 2-A- LES SOLIDES -.

Des péridotites orogéniques de Lanzo, Locana, Rivana, Baldissero, Alpes Arami ont été analysées; (Loubet, 1976). Ces péridotites ont été mises en place tectoniquement pendant l'orogénèse alpine (Boudier F., 1976; Etienne, 1971; Mockel, 1969). Elles se présentent dans le faciès lherzolithe à plagioclase, spinelle et grenat. Pour la démonstration de la constance des concentrations de Cr, Ni et Co que nous cherchons à établir, cet échantillonnage ajoute le paramètre "Régional". Pour obtenir une représentativité "péridotite" encore plus générale, nous avons également étudié les lherzolites de Freycinède (Pyrénées) et les xénolithes de Kimberlites "sheared" et "granular" péridotites (Nixon P.H., 1973). Les résultats, pour l'ensemble des métaux de la première série de transition sont présentés tableau III.5.

Sans anticiper sur l'étude des éléments à faibles coefficients de partage, on sait, pratiquement par définition, que ces éléments se concentrent dans la phase liquide. Suivant l'importance du taux de fusion qu'elles auront pu subir, les péridotites seront plus ou moins appauvries en ces éléments. Par opposition à ce qui est prévisible pour les éléments à forts coefficients de partage, on doit prévoir dans les péridotites une variation assez grande des concentrations des éléments à faibles coefficients de partage. De plus, la présence dans les péridotites d'une petite quantité de liquide influera davantage sur les concentrations des éléments à faibles coefficients de partage par rapport aux concentrations des éléments à forts coefficients de partage.

Pour les quelques échantillons étudiés, le tableau III.6 présente valeurs moyennes, rapport dispersion sur valeur moyenne, valeurs minimum et maximum du titane (faible coefficient de partage) et des trois éléments à fort coefficient de partage. Ce tableau montre clairement la dispersion des concentrations du titane, comparativement à celles de Cr, Co et Ni. Les valeurs moyennes trouvées à partir de ces quelques échantillons de péridotite sont en parfait accord avec les données proposées par d'autres auteurs (Gülaçar, 1973; Sato, 1977; Sun and Nesbitt, 1977; Frey et al, 1968) et les prévisions d'après modèles (Hertogen and Gijbels, 1976).

Il est donc extrêmement probable que les concentrations des éléments à forts coefficients de partage puissent être considérées constantes dans les matériaux représentatifs du manteau. Le fait que ces concentrations ne dépendent pas (ou dépendent peu) du taux de fusion partielle (estimé par Ti) est le premier élément à considérer vis à vis de la démonstration proposée.

## 2-B- LES LIQUIDES -.

La vérification de la loi qui régit le comportement des éléments à forts coefficients de partage lors des processus de fusion est a priori plus difficile qu'en ce qui concerne les solides, en raison des processus de cristallisation fractionnée qui modifient très largement la concentration de ces éléments dans le liquide. Pour suivre le comportement de ces éléments au cours de la fusion il est donc nécessaire de définir ou de pouvoir reconnaître ce qu'est un liquide primaire - les tholéiites en ce qui nous concerne - avant tout processus de cristallisation.

	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
Lanzo									
705 B	600	58	2562	928	63770	150	2070	30	76
775	780	58	2425	928	63070	125	2050	33	70
C50	600	58	2698	1006	65310	120	2088	33	70
Locana L4									
	576	45	2467	928	58870	95	2140	11	52
Rivana R1									
	570	55	2547	1006	60760	125	2080	26	70
Baldissero									
	480	58	2519	1006	68110	122	2061	28	66
Alpes Arami									
	654	55	2829	1083	66360	120	2028	28	68
Frecinède									
	684	58	2198	1006	64120	115	2615	25	64
Nodules de Kimberlite									
"sheared"									
69 KI 14	441	40	3200	1083	61400	102	2120	14	44
KB J8	1164	38	2400	1006	66500	112	2400	6	60
PHN 19 25	1090	40	2800	1083	64750	103	2100	11	52
"granular"									
LMA2	142	20	2640	696	41300	92	2000	1	38
KBBF2	142	15	2900	851	45220	92	2100	1	38

Tableau III.5: Concentrations (ppm) des éléments de la première série de transition dans des péridotites.

	$\bar{x}$	$\sigma$	$\sigma(\%)$
Ni	2139	182	8.5
Co	113	16	14.2
Cr	2629	258	9.8
Ti	609	297	48.8
Ti min.	142		
Ti max.	1164		

Tableau III.6: Péridotites; concentrations, dispersions dispersions relatives de Ni, Co, Cr et Ti. Concentrations maximum et minimum de Ti.

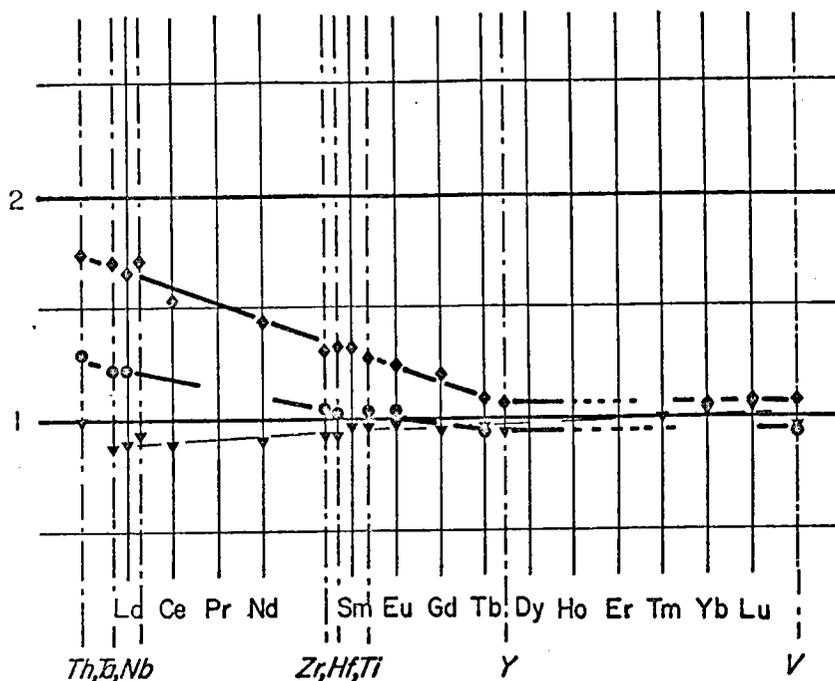


Figure III.4: Différentes distributions d'éléments à faibles coefficients de partage pour les basaltes "primaires" de la zone FAMOUS, présentant les mêmes caractéristiques ( $Mg^{++}/Mg^{++}+Fe^{++}$ ), Co, Ni et Cr.

	MgO	$r = \frac{Mg^{2+}}{Mg^{2+} + Fe^{2+}}$	Co	Ni	Cr	Ti	Tb	La	Ta
EXP 31-35	10.5	.74	46	253	630	5100	.42	5.4	.52
411 -1-1 78-82	11.5	.72	54	265	553	4184	.44	2.4	.23
413 -3-1 44-48	10.6	.68	50	240	594	8573	.58	14.6	1.61

Tableau III.7: Basaltes "primaires" de la zone FAMOUS: paramètres ( $Mg^{++}/Mg^{++}+Fe^{++}$ ), Co, Ni et Cr très voisins, concentrations en éléments à faibles coefficients de partage (Ti, Tb, La et Ta) différentes.

A condition de considérer des liquides exempts de phénocristaux (spinelles, olivine, clinopyroxène ...) le premier critère est celui de la valeur absolue des éléments à forts coefficients de partage Cr, Co et Ni. La cristallisation des minéraux ferro magnésiens et du spinelle provoque une diminution rapide de la concentration de ces éléments : les liquides primaires produits par fusion partielle d'un matériau type "péridotite" ou "pyrolite" de Green and Ringwood (1963) non affectés par le processus cristallisation doivent donc avoir les concentrations les plus élevées pour ces éléments. La concentration en Ni a déjà été utilisée pour une telle identification (Gast, 1968; Kay et al, 1970; Sun and Hanson, 1975; Allegre et al, 1977; Minster et al, 1977).

Le deuxième critère concerne les concentrations en MgO et FeO ou plutôt le rapport :

$$\frac{\text{Mg}^{++}}{\text{Mg}^{++} + \text{Fe}^{++}}$$

D'après Frey et al, (1977) un liquide basaltique formé par fusion d'un matériel péridotitique du manteau ayant un rapport r de 0.88, 0.89, doit avoir un rapport compris entre 0,68-0,75 pour des taux de fusion allant jusque 30%.

Pour tester l'indépendance de la concentration de Co, Ni et à un moindre degré Cr dans les liquides en fonction du taux de fusion partielle, on a choisi des basaltes aphyriques ou des verres présentant les plus fortes concentrations en ces éléments et des valeurs de r les plus élevées, de l'ordre de 0,7.

En suivant la démarche qui a été adoptée pour les solides, on choisira également des échantillons qui, présentant ces fortes valeurs pour les éléments à forts coefficients de partage, présenteront également des distributions d'éléments à faibles coefficients de partage différentes. Ces différentes distributions seront le test soit de taux de fusion partielle différents, soit d'une histoire antérieure du matériau solide initial. Parmi l'ensemble des échantillons étudiés dont les résultats sont présentés chap.V, trois satisfont à ces conditions et proviennent de la zone FAMOUS. Il s'agit d'un échantillon prélevé par CYANA CYP 31-35, et de deux échantillons prélevés par le Glomar Challenger pendant le leg 49 aux sites 411 et 413 (tab. V.22,25). L'échantillon ARP 10-16 prélevé par l'Archimède, à un endroit très proche de CYP 31-35 est pratiquement identique à CYP 31-35. Les résultats MgO, r, Ni, Co, Cr et quelques éléments à faibles coefficients de partage sont présentés tableau III.7. La figure III.4 présente le diagramme de Coryell et Masuda "étendu" à quelques autres éléments à faibles coefficients de partage (§ IV.1).

La différence de distribution des éléments à faibles coefficients de partage est évidente traduisant soit des taux de fusion partielle différents, soit des solides initiaux différents. Les concentrations en Co, Ni et Cr sont très voisines. On montre donc ainsi, c'est la deuxième étape de la démonstration après avoir considéré les solides résidus de fusion partielle, cette notion d'"effet tampon" au cours du processus de fusion, vis à vis des éléments à forts coefficients de partage.

Le raisonnement n'a porté jusqu'ici que sur les faibles variations des concentrations des

éléments à forts coefficients de partage, tant au niveau des solides que des liquides. Il est possible de considérer une troisième étape : il s'agit, pour les liquides, de l'aspect quantitatif. Est-il possible de rendre compte quantitativement des concentrations en Co, Ni et Cr dans les liquides basaltiques primaires à partir des concentrations observées dans les solides?

Le problème majeur pour estimer cet aspect quantitatif est celui posé par Frey et al. (1977), à savoir la variation des coefficients de partage élevés avec la température et la composition des phases. Pour traiter ce problème quantitatif, simplifications et hypothèses s'imposent donc. Ces simplifications et hypothèses sont celles qui ont été présentées § II-4. Le problème est limité à la genèse de liquides tholéitiques : la composition des phases, la pression et la température sont nécessairement comprises dans certaines limites; en conséquence, il en est de même pour la valeur des coefficients de partage. On considère que les coefficients de partage mesurés pour des tholéites § II-3, constituent vraisemblablement mieux qu'un ordre de grandeur pour aborder cet aspect quantitatif. On se rapportera § III-1 pour les résultats théoriques obtenus pour  $CL_0/CS_0$ .

Cobalt :  $CL_0/CS_0$  varie entre 0.39 et 0.43; la valeur moyenne dans les péridotites est de 115 ppm (§ III-2-A). On déduit une valeur de 47 ppm dans les liquides initiaux pour une valeur moyenne de 0.41 de  $CL_0/CS_0$ .

Nickel :  $CL_0/CS_0$  varie entre 0.103 et 0.120; dans les péridotites, la valeur moyenne est de 2150 ppm (§ III-2-A). Bien que  $CL_0/CS_0$  varie dans une proportion réduite, on choisit les valeurs élevées  $\sim 0.120$  correspondant à des taux de fusion importants pour des tholéites; on peut donc ainsi estimer la concentration de Ni dans les liquides tholéitiques primaires à 250 ppm  $\pm 15$ .

La plupart, sinon tous les échantillons de tholéites océaniques analysés (voir l'ensemble des tableaux chap.V) présentent des concentrations en Co comprises entre 40 et 50 ppm. A ce titre l'échantillon du forage 411 présente une concentration un peu élevée qui peut être expliquée par la présence de phénocristaux d'olivine (description lames minces, leg 49 initial reports). A cette remarque près, pour cet échantillon, qui peut être étendue dans une certaine mesure à Ni, les concentrations de Co et de Ni mesurées dans ces échantillons "primaires" et trouvées par le calcul sont en excellent accord.

En ce qui concerne le chrome, pour autant que le modèle puisse être appliqué (§ III-1) du fait que cet élément est pratiquement un majeur dans la chromite, les concentrations trouvées dans ces basaltes correspondant à un facteur 0.23 par rapport à la valeur moyenne dans les péridotites conduiraient à admettre une péridotite de composition relativement pauvre en spinelle et modèle B,a. Cette conclusion ne peut pas être considérée comme certitude, car même en admettant un modèle "élément trace" pour rendre compte du comportement de Cr, les valeurs de  $\frac{CL_0}{CS_0}$  restent encore trop dépendantes de la vitesse avec laquelle fondent les spinelles.

## 2-C- CONCLUSION-.

Résultats théoriques d'après modèles et concentrations observées dans les basaltes non différenciés par cristallisation sont concordants et permettent de conclure que :

- Co, Ni et à un moindre degré Cr présentent des concentrations constantes dans les matériaux constituant le manteau supérieur, indépendamment du taux de fusion partielle qu'aient pu subir ces matériaux; ces concentrations sont Co : 115 ppm; Ni : 2150 ppm; Cr : 2650 ppm.

- Co, Ni et à un moindre degré Cr présentent des concentrations dans les liquides indépendantes du taux de fusion partielle ou de l'histoire antérieure du matériau source. Co : 50 ppm; Ni : 250 ppm; Cr : 600 ppm. Les valeurs de Co et Ni sont obtenues à partir de l'excellent accord qui existe entre modèle et concentrations trouvées dans des basaltes non différenciés. La valeur de Cr provient des concentrations en Cr trouvées dans ces basaltes; la correspondance avec un modèle théorique est davantage sujette aux hypothèses de calcul.

L'excellent accord qui existe entre valeurs calculées et valeurs trouvées dans les basaltes pour Co et Ni ne doit sans doute pas être pris comme une certitude absolue; il reste en effet d'une part une ambiguïté sur la valeur des coefficients de partage, et il n'y a d'autre part que deux ou trois échantillons considérés comme "primaires". L'argument le plus fort qui reste en faveur de la constance des concentrations de Co et Ni, dans les solides et dans les liquides est d'un point de vue "modèles" la notion d'effet tampon, et de l'indépendance du type de modèle choisi; d'un point de vue "données" c'est la constance des concentrations observées dans les solides et les liquides (même si deux ou trois échantillons seulement sont considérés non différenciés) qui présente des distributions d'éléments à faibles coefficients de partage très différentes.

## 3- NORMALISATION AUX CHONDRITES - DIFFERENCIATION NOYAU-MANTEAU

## 3-A- NORMALISATION AUX CHONDRITES ET PROPRIETES DES ELEMENTS -.

L'un des modes de représentation le plus populaire en matière de géochimie comparée est sans doute le diagramme de Coryell et Masuda (Masuda, 1962; Coryell et al, 1963),  $\log$  (concentration échantillon/concentration chondrite) représenté en fonction soit du numéro atomique, soit du rayon ionique des éléments de la série des terres rares. Ce mode de représentation permet de corriger l'abondance relative des éléments de numéros atomiques pairs et impairs (loi d'Oddo-Harkins), et ensuite de visualiser sur une même figure l'abondance relative de ces éléments dans un échantillon par rapport aux chondrites, la distribution des terres rares dans les chondrites étant considérée représentative de la distribution naturelle de ces éléments dans le système solaire après le processus d'accrétion. Les terres rares sont des éléments lithophiles; l'interprétation d'un tel diagramme intervient donc en terme de différenciation du manteau, ou d'effets des processus fondamentaux, fusion partielle, cristallisation fractionnée.

Allegre et Al. (1968), ont les premiers proposé la normalisation des éléments de transitions aux chondrites; Bougault (1974), Bougault et Hékinian (1974), Langmuir et al. (1976) ont utilisé ce type de diagramme; il montre, à l'évidence, la différence de comportement des éléments à forts coefficients de partage par rapport aux éléments à faibles coefficients de partage. La forme en W de la courbe ainsi obtenue pour les basaltes, Cr et Ni occupant les valeurs normées aux chondrites les plus faibles (fig.III.5) sont interprétés en termes de coefficients de partage et de la notion de stabilité en champ de ligandes (§ II-4).

Néanmoins, compte-tenu de la différence fondamentale qui existe entre comportement d'éléments à faibles coefficients de partage (Terres rares) et d'éléments à forts coefficients de partage de la première série de transition (Cr, Co, Ni), il convient de reconsidérer la normalisation aux chondrites des éléments de la première série de transition sur le plan de son principe et de ses objectifs.

Le premier paramètre à considérer est la distribution de ces trois éléments entre phase silicatée et phase métallique des chondrites. Le chrome est pratiquement absent de la phase métallique et se trouve présent dans les minéraux ferro magnésiens au même niveau de concentration que dans les minéraux des roches ultrabasiqes; il est un élément majeur dans les chromites. Au contraire Co et Ni se trouvent à des niveaux de concentrations très faibles dans les minéraux silicatés et interviennent en tant que "majeurs" dans la phase métallique des météorites (Mason and Graham, 1970; Mason et al. 1971). Cr est un élément lithophile, Co et Ni sont sidérophiles. Les valeurs normalisées aux chondrites pour ces éléments dans les roches terrestres vont nécessairement rendre compte de ce partage différent initial entre phase silicatée et phase métallique suivant leur caractère lithophile ou sidérophile. Il y a donc pour ces éléments une différence fondamentale par rapport aux Terres rares - tous éléments lithophiles - vis à vis d'un diagramme de Coryell et Masuda. Ce comportement différent entre Cr et Co-Ni peut rendre nul l'un des objectifs du diagramme de Coryell et Masuda "Tamponner" les abondances relatives du matériau source. La deuxième différence fondamentale a trait au caractère "coefficients de partage élevés" de ces éléments qui conduit à un comportement complètement différent des terres rares (coefficients de partage plus petits que 1) lors des processus pétrogénétiques.

On se propose donc de reconsidérer cette notion de normalisation aux chondrites pour Cr, Co et Ni en deux temps : d'une part en tenant compte du partage initial entre phase métallique et phase silicatée, d'autre part en tenant compte des conclusions obtenues § III-2 vis à vis du comportement de ces éléments au cours de la fusion partielle.

### 3-B- PHASE METALLIQUE - PHASE SILICATEE : DIFFERENCIATION NOYAU-MANTEAU -.

A l'exception des éléments les plus volatils, les abondances relatives des éléments dans les météorites chondritiques sont très vraisemblablement voisines des abondances relatives des éléments dans le système solaire (Aller 1961, 1965; Suess and Urey, 1956; Urey, 1967). Certains considèrent qu'un matériel chondritique est le matériel initial pour toutes les planètes, celles-ci s'individualisant ensuite par différenciation (Ringwood, 1966). D'autres considèrent que des

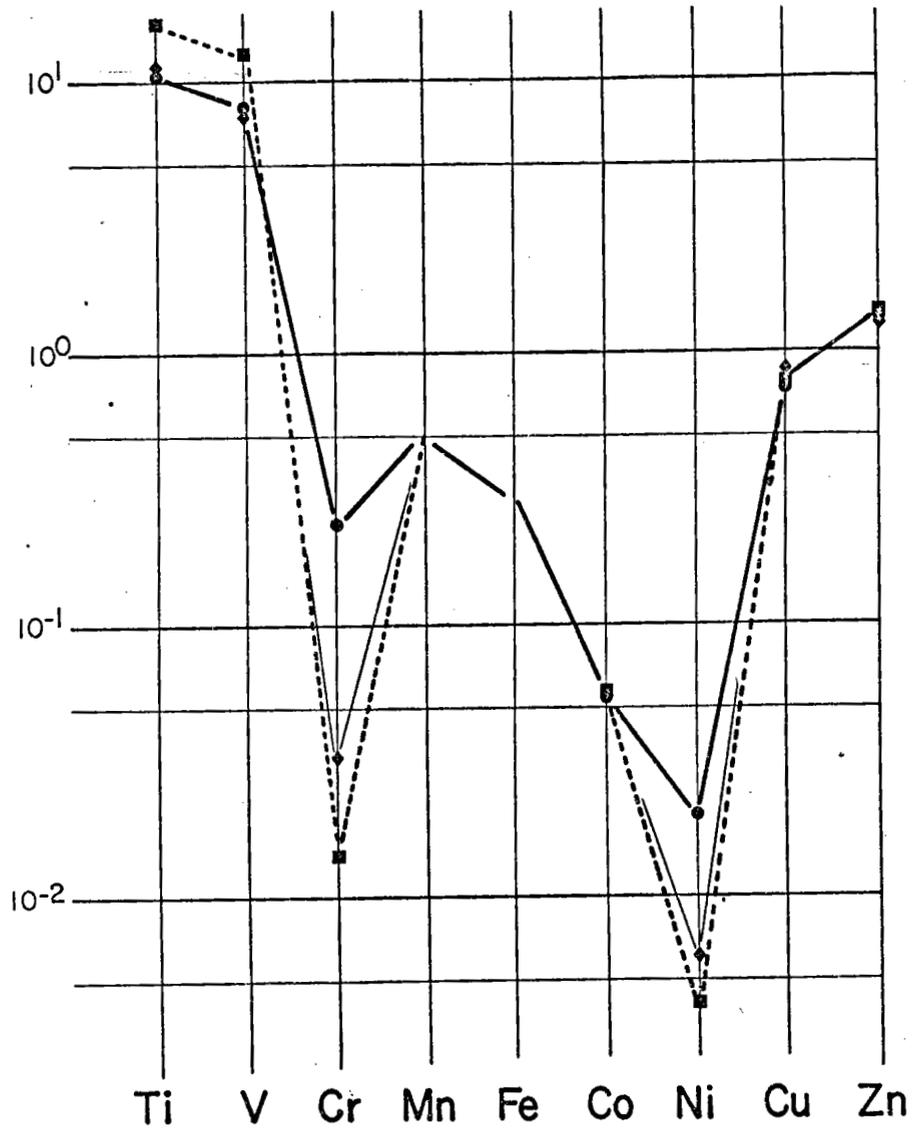


Figure III.5: Basaltes; éléments de la première série de transition; normalisation par rapport aux chondrites.

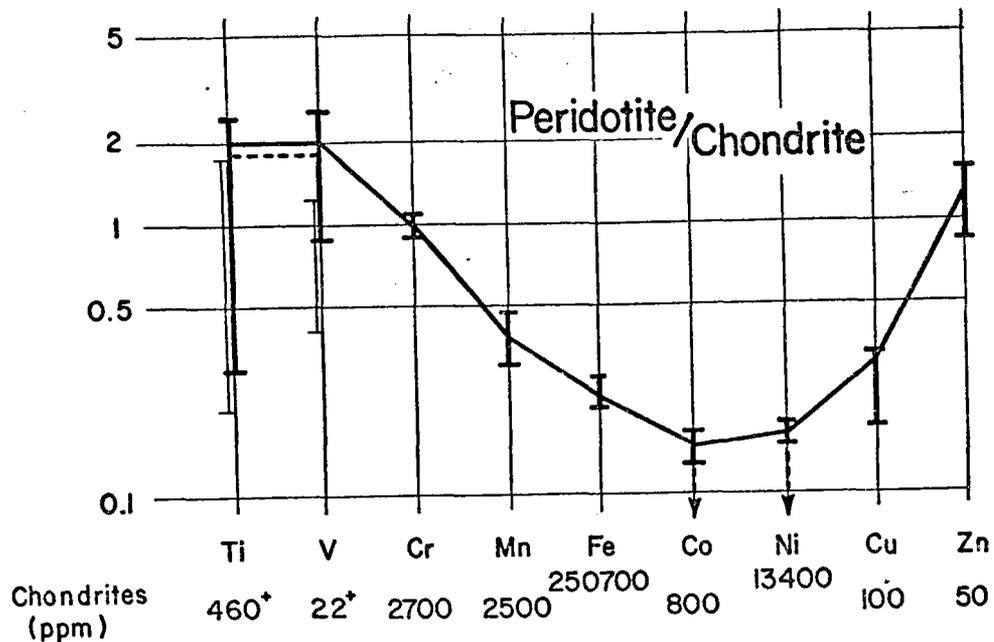


Figure III.6: Péridotites; éléments de la première série de transition; normalisation par rapport aux chondrites. (\*) les concentrations de Ti et V dans les chondrites correspondent aux valeurs calculées au chapitre IV. Les valeurs généralement trouvées dans la littérature (Ti:660 ppm; V:50 ppm) conduiraient à l'intervalle indiqué en trait fin. Les valeurs calculées de Ti et V dans les chondrites permettent de rendre compte d'un enrichissement en Ti et V dans le manteau d'un facteur 2 par rapport aux chondrites comme pour les autres éléments à faibles coefficients de partage.

Les flèches en pointillés, pour Co et Ni indiquent que dans la phase silicatée des chondrites les concentrations de ces éléments sont beaucoup plus faibles que dans les péridotites. Pour Ti et V, le pointillé indique que la concentration normée aux chondrites de la phase silicatée des chondrites est nécessairement supérieure à 1, la valeur exacte dépendant de la proportion moyenne phase silicatée / phase métallique des chondrites.

conditions différentes de condensation peuvent conduire à des compositions originelles différentes des planètes (Lewis, 1972). Néanmoins, considérant la seconde proposition, il paraît extrêmement difficile d'admettre un processus d'accrétion tel qu'il puisse de par lui-même rendre compte de la structure actuelle de la terre noyau-manteau; cette structure dépend très largement de l'histoire thermique de la terre (Birch, 1965; Donn et al, 1965). La chaleur est fournie principalement par la désintégration des isotopes instables tels  $^{238}\text{U}$ ,  $^{40}\text{K}$  et  $^{235}\text{U}$  dont les concentrations, il y a cinq milliards d'années, étaient respectivement 2, 10 et 60 fois plus élevées qu'aujourd'hui mais aussi des isotopes instables aujourd'hui pratiquement éteints, tels  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{107}\text{Pd}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{146}\text{Sm}$ ,  $^{224}\text{Pu}$  ... La température atteinte est difficile à estimer mais vraisemblablement suffisante pour permettre une ségrégation des phases suivant leurs densités. Il est ainsi possible d'admettre la différenciation noyau-manteau à partir d'un ensemble initialement formé par un processus d'accrétion homogène.

Un tel processus de formation et d'évolution de la terre implique nécessairement des équilibres ou plutôt des partages d'éléments entre phase métallique et phase silicatée (ou sulfure) différents de ce qu'ils peuvent être dans les chondrites. Les pressions partielles d'éléments ou composés volatils pouvant être impliqués dans le partage de certains éléments entre phases peuvent vraisemblablement être très différentes. A ce titre, la comparaison des concentrations relatives des éléments de la première série de transition dans la phase silicatée des chondrites et dans les péridotites du manteau peut être très intéressante. On y trouve des éléments à faibles coefficients de partage (minéraux - liquide silicaté) Ti, V, des éléments à forts coefficients de partage: Cr, Co, Ni, des éléments lithophiles: Ti, V, Cr, des éléments sidérophiles: Fe, Co, Ni, des éléments chalcophiles: Cu, Zn.

La figure III.6 présente les concentrations des éléments de la première série de transition normées aux chondrites pour les péridotites (tableau III.5). L'information en pointillé correspond à la distribution dans la phase silicatée des chondrites d'après les informations de Mason et Graham, (1970) et Mason et al. (1971).

La première remarque concerne la dispersion des données relatives à chaque élément. On retrouve sur ce diagramme les conclusions mentionnées § III-2-A. La dispersion est minimum pour Cr, Co et Ni; Ti montre la dispersion la plus grande suivi par V. Cette dispersion comparée des données Ti et V est en accord avec les valeurs des coefficients de partage de ces éléments ( $D_{\text{Ti}} < D_{\text{V}}$  § II-6), les péridotites pouvant être considérées comme résidus de fusion partielle plus ou moins importante; par contre, les valeurs de Cr, Co et Ni restent inchangées (§ III-2-A).

La deuxième remarque concerne l'évidence des éléments lithophiles Ti, V, Cr et des éléments sidérophiles Fe, Co, Ni. Pour les éléments lithophiles, comprenant à la fois du point de vue des phases silicatées des éléments à faibles (Ti, V) et forts (Cr) coefficients de partage, on constate que les valeurs normalisées aux chondrites sont voisines pour la phase silicatée des chondrites et les péridotites du manteau. Pour cette comparaison on choisit pour les péridotites les valeurs les plus élevées en Ti susceptibles de correspondre aux effets les moins

importants d'un possible effet de fusion. L'identité recherchée pour les concentrations normées d'éléments lithophiles entre phase silicatée des chondrites et péridotites, ne peut pour l'instant être appréciée avec une meilleure précision que celle qui ressort de la figure III.6. D'abord les péridotites étudiées ne peuvent être considérées comme représentatives de l'ensemble du manteau, ensuite il existe une incertitude sur les valeurs à choisir comme valeurs moyennes dans les chondrites. Pour Ti et V les valeurs normées dans la phase silicatée des chondrites, dépendent du choix de la proportion phase silicatée/phase métallique. Néanmoins, compte-tenu de ces incertitudes, on peut affirmer qu'il existe, du point de vue comparaison phase silicatée des chondrites et manteau terrestre, identité à mieux qu'un facteur 2 près pour les valeurs normées aux chondrites des éléments lithophiles Ti, V et Cr.

Considérant les éléments sidérophiles, on observe cette fois une différence fondamentale entre phase silicatée des chondrites et péridotites pour Co et Ni. Il ne s'agit pas comme pour les éléments lithophiles d'un facteur 2 lié à un problème de représentativité mais d'un facteur compris entre  $10^2$  et  $10^3$ . Envisageant une différenciation noyau-manteau suivant les hypothèses simples mentionnées plus haut, on doit donc considérer que le partage du Ni et du Co s'est fait au cours de cette différenciation dans des conditions différentes de celles des chondrites. Mysen et Kushiro (1977), ont montré que le partage du Ni varie très largement entre phase métallique et phase silicatée avec la pression partielle d'oxygène. En admettant que les équilibres concernant l'oxygène aient été différents au niveau de la terre de ce qu'ils ont été dans les corps météoritiques, on peut trouver une explication à cette différence qui existe entre péridotites et phase silicatée des chondrites sans nécessairement déduire que cette différence implique que matériaux du noyau et du manteau n'ont jamais été en "équilibre".

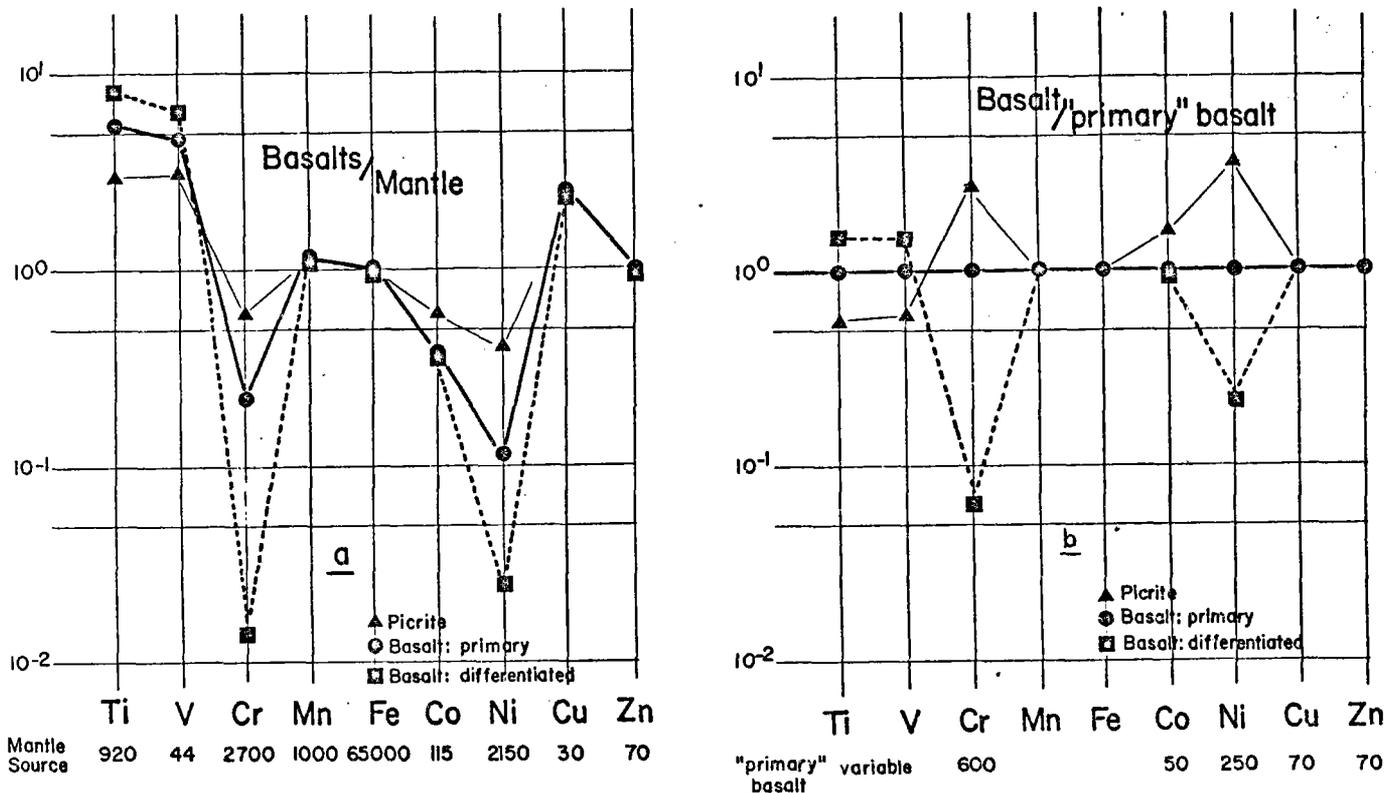


Figure III.7: a) Basaltes; normalisation par rapport aux valeurs supposées du manteau. Le rond représente le basalte "primaire" CYP 31 35; l'écart entre la courbe correspondant à cet échantillon et la valeur 1 représente le fractionnement au cours du processus de fusion. Pour Cr, Co et Ni les points représentatifs d'un échantillon picritique (ARP 73 3, FAMOUS) se trouvent situés au dessus de ceux qui correspondent à l'échantillon non différencié, traduisant ainsi le phénomène de cumulat en olivine.

b) Basaltes; normalisation par rapport à un basalte "primaire". Pour Cr, Co et Ni, les valeurs de normalisation correspondent aux valeurs calculées d'après modèle ou trouvées dans les basaltes "primaires". Pour Mn, Fe, Cu et Zn, les valeurs de normalisation correspondent aux concentrations moyennes des basaltes tholéiitiques, concentrations qui varient relativement peu. Pour Ti et V, éléments à faibles coefficients de partage, il n'est pas possible de définir une valeur pour les basaltes "primaires", celles-ci pouvant dépendre du solide initial et du taux de fusion. Ce type de diagramme ne peut montrer que la grande variabilité de concentrations de Cr et Ni dans les liquides basaltiques par rapport aux autres éléments de la première série de transition due au phénomène de cristallisation (appauvrissement: courbe en pointillé). Des valeurs normées en Cr et Ni supérieures à 1 traduisent un effet cumulatif (olivine, spinelle).

### 3-C- LES BASALTES : "NORMALISATION" DES ELEMENTS A FORTS COEFFICIENTS DE PARTAGE -.

Un diagramme "normé aux chondrites" établi pour des échantillons basaltiques permet d'observer pour les terres rares le fractionnement de ces éléments soit au cours de l'histoire du manteau, soit au cours de la genèse de ces basaltes. Ceci est possible du fait que l'ensemble des éléments considérés sont lithophiles et qu'à une constante près les valeurs moyennes dans les chondrites représentent les valeurs initiales dans le manteau. On corrige ainsi très facilement la distribution naturelle des éléments (valeurs absolues dont la loi d'Oddo-Harkins) et les distributions des valeurs normées en fonction du numéro atomique sont interprétables en termes de manteau et de processus magmatiques.

D'après les résultats qui viennent d'être décrits § III-3-B, la comparaison des valeurs normées aux chondrites pour les éléments de la première série de transition peut avoir une signification toute différente. Suivant les éléments lithophiles et sidérophiles (ou chalcophiles), l'ordre de grandeur de la valeur normée aux chondrites obtenue est fixée, non pas par un processus mantellique ou magmatique, mais par le partage phase métallique/phase silicatée. Autrement dit, pour les processus mantelliques ou magmatiques qu'on souhaite mettre en évidence, les valeurs de "normalisation" à choisir ne sont pas nécessairement les valeurs correspondant aux chondrites. Pour les éléments sidérophiles, on peut penser, choisir des valeurs de normalisation correspondant aux valeurs moyennes trouvées dans le manteau. Il convient toutefois de tenir compte également du comportement des éléments à forts coefficients de partage § III.2 par rapport aux éléments à faibles coefficients de partage. Il a été montré que les concentrations de Cr, Co et Ni dans les liquides primaires (avant cristallisation) sont indépendantes des taux de fusion partielle (respectivement 600 ppm, 50 ppm, 250 ppm). Ces éléments ne permettent donc théoriquement que de tracer le phénomène cristallisation fractionnée. On propose donc de choisir les valeurs correspondant aux liquides primaires ; Cr : 600 ppm, Co : 50 ppm, Ni : 250 ppm comme valeurs de normalisation dans un diagramme sachant que les concentrations normées dans les basaltes (théoriquement inférieures à 1) traduisent l'évolution de l'échantillon par cristallisation fractionnée; des valeurs supérieures à 1 devraient traduire une roche cumulative (en olivine ou clinopyroxène ...); un exemple est donné fig.III.7.

#### 4- CRISTALLISATION FRACTIONNEE

-----

Aux réserves près qui ont été mentionnées pour Cr, les concentrations des éléments Cr, Co et Ni d'un liquide silicaté résultant de la fusion partielle d'un élément de manteau supérieur doivent être constantes ou à peu près constantes, indépendantes du taux de fusion : la seule condition est que ce taux de fusion reste inférieur à 30%. Partant de ce résultat, on peut chercher à connaître le comportement des éléments à forts coefficients de partage et à formuler les contraintes qu'apporte ce comportement lors de l'évolution du liquide. Deux processus principaux peuvent intervenir :

- le phénomène de cristallisation fractionnée qui par précipitation de certains minéraux olivine, spinelle, plagioclase, clinopyroxène devrait contribuer à diminuer la concentration des éléments à forts coefficients de partage dans le liquide;

- le mélange de deux ou plusieurs liquides. Ces liquides peuvent avoir été formés soit par des taux de fusion différents, soit à partir d'"éléments" de manteau différents; d'après les résultats obtenus §III-2, on note que le mélange de tels liquides -n'ayant pas subi d'autre évolution que le mélange- devrait conserver les mêmes concentrations en éléments à forts coefficients de partage. Par contre, le mélange de deux ou plusieurs liquides ayant subi des processus de cristallisation différents, aura des concentrations fonction des différents taux de cristallisation de chaque liquide; le mélange peut ainsi très sérieusement "masquer" le processus de cristallisation lui-même. (O'Hara, 1977).

#### 4-A- COBALT --.

Indépendamment de tout modèle de cristallisation fractionnée ou de mélange, le premier résultat remarquable concerne le cobalt. Hormis les échantillons picritiques, présentant à l'évidence un caractère cumulatif en olivine (et spinelle associé) (ex : échantillon ARP 73 04 tab.V.3 et les séries picritiques du forage 332B tab.V.6 ) les concentrations en Co pour l'ensemble des échantillons analysés (voir l'ensemble des tableaux) sont remarquablement comprises entre 40 et 50 ppm. Ces valeurs sont très proches de la valeur théorique calculée (§III 2) pour un liquide "primaire" et de la valeur trouvée dans des basaltes non différenciés. Les basaltes à caractère cumulatif en olivine, suivant la quantité d'olivine, peuvent présenter des concentrations significativement plus élevées, jusque 80 ppm; les valeurs de Ni et Cr correspondantes sont également très élevées (jusque 1000 ppm, voire davantage).

Cette faible variation du cobalt dans les basaltes tholéitiques, compte-tenu de l'ordre de grandeur de ses coefficients de partage -3 pour l'olivine et 5 pour le spinelle- implique nécessairement une contrainte vis à vis des possibilités de cristallisation de ces deux minéraux. Bien qu'un processus de mélange puisse dans une certaine mesure rendre difficile l'observation du processus de cristallisation fractionnée, il n'en reste pas moins que les grandes variations de Ni et de Cr possédant des coefficients de partage nettement plus élevés que ceux de Co, ne peuvent être attribuées qu'au processus de cristallisation fractionnée. Pour Co, en écrivant que le coefficient de partage global faisant intervenir les minéraux susceptibles de cristalliser, Ol, spinelle, clinopyroxène et plagioclase

$$P = (Ol)x3 + (Sp)x5 + (Cpx)x1,3 + (Plag)x0,1$$

et tenant compte de la loi de Rayleigh et d'une concentration initiale de 50 ppm

$$C_L = 50 F^{(P-1)}$$

on aboutit à deux conclusions possibles :

a) olivine (et spinelle) sont les deux minéraux qui cristallisent les premiers : la quantité d'olivine et de spinelle susceptible de cristalliser ne peut alors dépasser quelques pour cent.

b) le coefficient de partage de la ou des phase(s) qui cristallise(nt) est voisin de l'unité. La cristallisation de clinopyroxène seul est possible. On considèrera plus probable la

possibilité de co-cristallisation soit d'olivine (et spinelle) et de plagioclase avec une proportion faible d'olivine (et spinelle), soit de clinopyroxène et de plagioclase en proportion d'ordre de grandeur comparable.

Dans tous les cas possibles, la quantité d'olivine (et de spinelle) pouvant cristalliser est nécessairement limitée à quelques pour cent, qu'elle cristallise seule ou avec d'autres minéraux (plagioclase).

#### 4-B- NICKEL ET CHROME -.

La conclusion obtenue à partir de Co est-elle confirmée par le comportement des deux autres éléments à forts coefficients de partage chrome et nickel ?

En admettant que la loi de Rayleigh (§ I-5) soit vérifiée, la relation qui existe entre les concentrations de deux éléments (1 et 2) est la suivante (Treuil, 1973; Allègre et al., 1977; Bougault, 1977)

$$a) \quad \log CL_2 = \frac{P_2-1}{P_1-1} \log CL_1 + \frac{(P_1-1) \log CLo_2 - (P_2-1) \log CLo_1}{P_1-1}$$

Si l'élément (2) correspond à un élément à fort coefficient de partage et (1) à un élément à faible coefficient de partage, en considérant  $P_1$  petit devant 1, cette relation peut s'écrire :

$$(b) \quad \log CL_2 = - (P_2-1) \log CL_1 + \log CLo_2 + (P_2-1) \log CLo_1$$

Ainsi, théoriquement, la pente de la droite  $\log CL_2 = f(\log CL_1)$  devrait permettre de mesurer le coefficient de partage global de l'élément (2). En fait, avant de considérer tout aspect quantitatif, convient-il de critiquer la validité d'une telle relation.

a) Conditions initiales : suivant les résultats montrés § III-2,  $CLo_2$  est pratiquement indépendant du taux de fusion partielle; par contre  $CLo_1$  peut dépendre, pour l'élément à faible coefficient de partage, et du solide initial et du taux de fusion partielle. Ainsi, dans le diagramme  $\log CL_2 = f(\log CL_1)$  le lieu du "point de départ" du processus de cristallisation fractionnée est - il représenté par une droite approximativement parallèle à l'axe (1) (fig.III.8). Utilisant la relation (b) pour estimer ou quantifier le processus de cristallisation fractionnée, il est donc nécessaire de considérer des échantillons susceptibles de dériver d'un même liquide initial; géographiquement parlant, on ne considèrera donc que des échantillons provenant d'une même structure (dans la zone FAMOUS par exemple), ou provenant d'un même forage.

(b) La relation (b) n'est utilisable qu'à condition que  $P_2$  soit constant, c'est-à-dire que la proportion des minéraux qui cristallisent soit constante et que les coefficients de partage relatifs à chaque minéral soient constants. Ceci signifie à l'évidence que la relation ne peut être utilisée sur le plan quantitatif que dans un intervalle du processus de cristallisation.

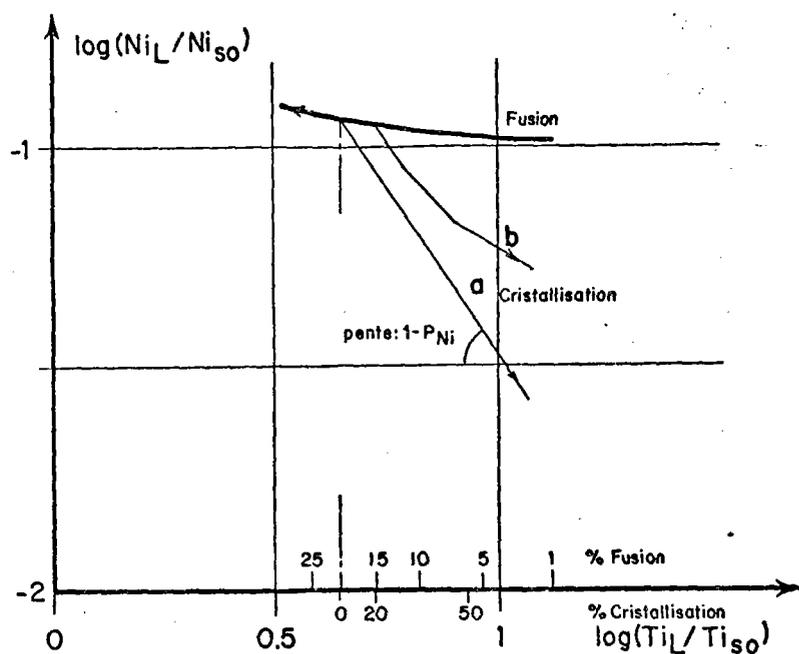


Figure III.8: Evolution théorique de la concentration d'un élément à fort coefficient de partage (Ni) en fonction de celle d'un élément à faible coefficient de partage (Ti). La courbe "fusion" traduit le peu de variation de Ni en fonction du taux de fusion partielle.

a): cristallisation; les paramètres restent constants au cours du processus. b): cristallisation; variation des paramètres au cours du processus (diminution de la proportion d'olivine par exemple).

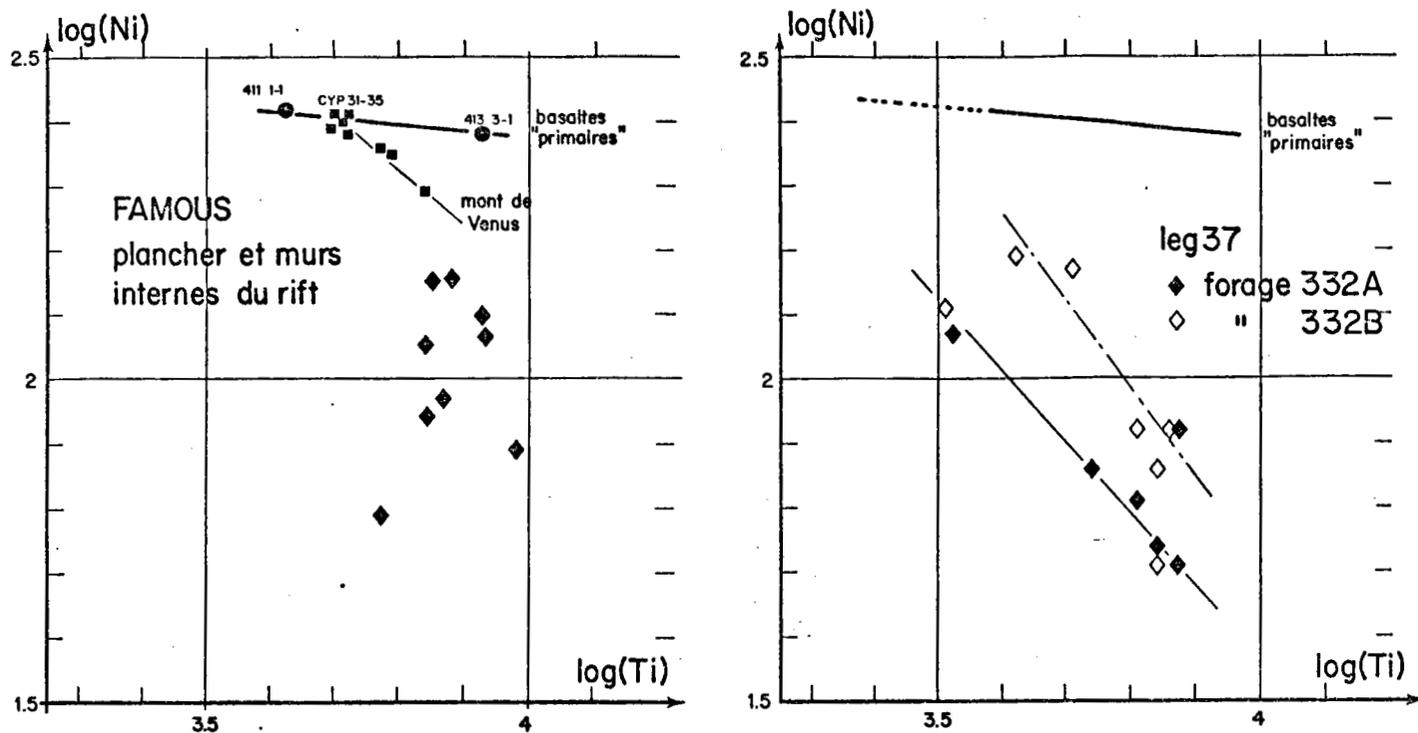


Figure III.9:  $\log(\text{Ni}) = f(\log(\text{Ti}))$ , FAMOUS et leg37, Bougault (Initial reports, 1977)

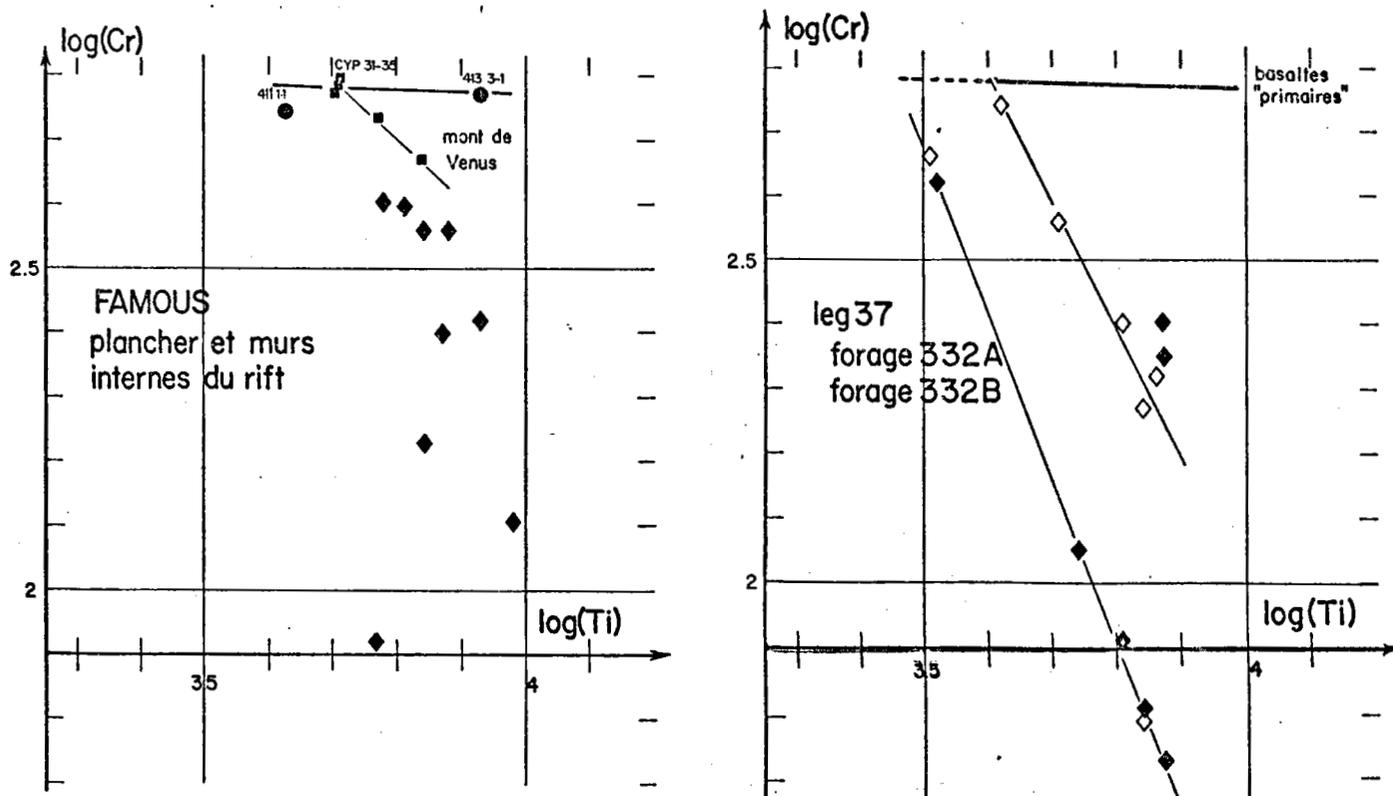


Figure III.10:  $\log(\text{Cr}) = f(\log(\text{Ti}))$ , FAMOUS et leg37, Bougault (Initial reports, 1977)

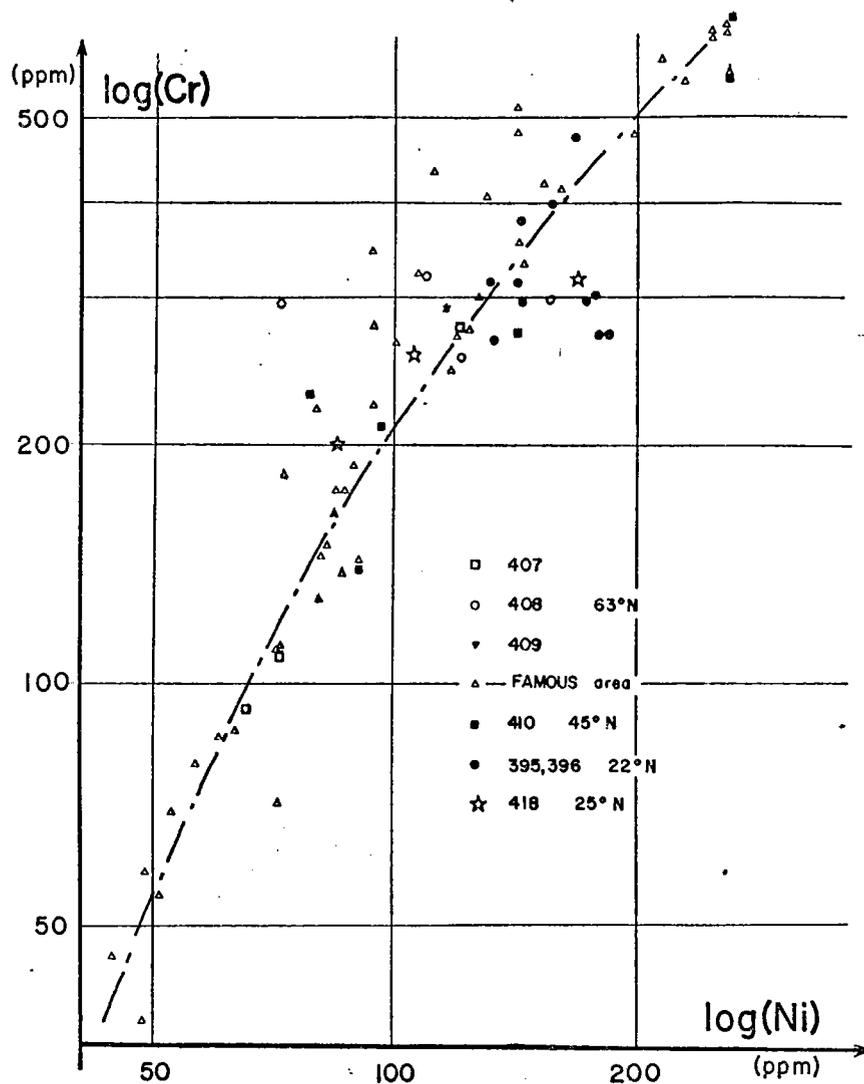


Figure III.11:  $\log(\text{Cr}) = f(\log(\text{Ni}))$ , échantillos de l'atlantique nord. Certains échantillos, notamment ceux qui se trouvent sur la partie gauche de la courbe, contiennent des phénocristaux de plagioclase; une correction des concentrations en Cr et en Ni tenant compte de ces phénocristaux (effet de dilution vis à vis de Cr et Ni) réduirait la dispersion autour de la courbe.

Toutefois, sur un plan qualitatif, on peut admettre qu'au fur et à mesure où se déroule le processus de cristallisation, les séquences et les proportions de minéraux qui cristallisent ne sont pas alléatoires. Des échantillons provenant d'une série cogénétique sur le plan cristallisation fractionnée devraient donc être représentés dans un diagramme  $\log CL_2 = f(\log CL_1)$  (2: élément à fort coefficient de partage, 1: élément à faible coefficient de partage) par une série de points disposés d'une façon non alléatoire (fig.III.8).

Si (2) et (1) sont des éléments à forts coefficients de partage (Cr, Ni), les concentrations initiales devraient beaucoup moins dépendre du processus de fusion partielle antérieure (§ III-2). Les remarques faites ci-dessus vis à vis des proportions des minéraux et de la variation des coefficients de partage, s'appliquent également. Pour Cr et Ni, le processus de cristallisation fractionnée devrait donc pouvoir être observé avec des conditions moins sévères sur le plan localisation géographique. Dans tous les cas, on ne considèrera que des échantillons aphyriques ou des verres.

Deux séries d'échantillons ont été choisies pour tester ces hypothèses; l'une correspond à la vallée du Rift de la zone FAMOUS (tab.V.3), l'autre au site 332 de DSDP, leg 37, (tab.V.5,6). Ces deux zones se situent à la même latitude: 36°N. Les figures III.9, 10 représentent  $\log Ni = f(\log Ti)$  et  $\log Cr = f(\log Ti)$  pour chacune de ces zones. La figure III.11 présente  $\log(Cr) = f[\log(Ni)]$  pour l'ensemble des échantillons des deux séries. La comparaison des figures III.11 d'une part, et de la figure III.10 d'autre part, permet d'observer une distribution des points beaucoup moins alléatoire pour  $\log Cr = f[\log(Ni)]$  que pour  $\log(Cr \text{ ou } Ni) = f[\log(Ti)]$ . Dans le premier cas, les concentrations de chrome et nickel dépendent essentiellement du processus de cristallisation fractionnée; on déduit donc une certaine "organisation" de ce processus vis à vis des séquences de cristallisation des minéraux ferro-magnésiens. Dans le deuxième cas, la concentration en Ti dépend du processus de cristallisation fractionnée, du taux de fusion partielle produisant le liquide initial, voire même du solide avant fusion; on déduit donc de l'absence de corrélation  $\log(Ni \text{ ou } Cr) = f \log(Ti)$  que l'ensemble des échantillons dans chaque site ne correspond pas à la différenciation d'un même liquide (Bougault, 1977).

Dans la vallée du Rift de la zone FAMOUS, si l'échantillonnage est restreint au Mont de Vénus (ARP 73 1 et 4, ARP 74 10-16, 10-14, 9-12, 10-15, 11-17, CYP 74 31-35), il est possible de considérer que  $\log(Ni \text{ ou } Cr) = f \log(Ti)$  est représenté par une droite. Encore convient-il de remarquer que la plupart de ces échantillons sont identiques et définissent le liquide initial (Ni : 250 ppm, Cr : 600 ppm), deux échantillons seulement ARP 74 10-15 et 11-17 pouvant dériver de ce liquide initial. Ce qui rend possible cette hypothèse, c'est la limitation géographique de la répartition de ces échantillons, la pente négative de  $\log(Ni \text{ ou } Cr) = f \log(Ti)$ ; la valeur de la pente 1 pour Ni et Cr correspondrait à une valeur de l'ordre de 2 pour le coefficient de partage global de ces éléments. Cette valeur du coefficient de partage global serait en accord avec la conclusion obtenue à partir du comportement de Co, c'est-à-dire l'impossibilité de cristallisation d'olivine ou olivine + spinelle en quantité importante.

Au site 332, les séries situées à la partie supérieure des trous 332A et 332B, b, c, d, e<sub>1</sub>, peuvent également dériver d'un même liquide initial. L'unité a, porphyrique à plagioclase a également été portée (fig.III.9,10), en tenant compte de l'effet de dilution apporté par les phéno-

cristaux de plagioclase vis à vis des éléments considérés (coefficients de partage très inférieurs à 1 pour Ni, Cr et Ti pour les plagioclases). Les coefficients de partage ainsi déterminés seraient de l'ordre de 2 pour Ni et de 4 pour Cr. On obtient donc le même type d'information vis à vis de la quantité de minéraux ferro-magnésiens susceptibles d'être extraits du liquide qu'avec les échantillons FAMOUS. La valeur plus élevée du coefficient de partage de Cr peut être due à la cristallisation de clinopyroxène. Les phénocristaux présents dans l'unité a, sont en effet plagioclases (en grande proportion), olivines et quelques clinopyroxènes.

En dehors de ces deux séries d'échantillons, chacune représentant un ensemble possible dérivant d'un même liquide, il n'est pas possible suivant les critères choisis -Cr, Ni, Ti- d'identifier dans les autres forages effectués dans l'atlantique nord, d'autres séries d'échantillons pouvant dériver l'une ou l'autre par simple cristallisation fractionnée. (Bence et al., 1979; Bryan and Thompson, 1979; Rhodes et al., 1979). Lorsqu'on considère la possibilité de faire dériver un liquide basaltique d'un autre liquide basaltique en ne se servant que des éléments majeurs, (Wright and Doherty, 1970; Bryan et al., 1969) on constate qu'il est très souvent possible de trouver un excellent "fit" en ajustant convenablement la proportion d'olivine, de plagioclase et de clinopyroxène; néanmoins presque toujours ce "fit" ne convient pas lorsqu'on considère le titane (Bryan and Moore, 1977; Bryan and Thompson, 1979).

Le modèle simple qui consiste à envisager un liquide stocké dans une poche magmatique évoluant d'une façon continue suivant un processus de cristallisation fractionnée, ne permet donc pas d'expliquer les données obtenues à la fois pour les éléments à forts coefficients de partage (Cr, Ni) et à faibles coefficients de partage (Ti). De la même façon, White and Bryan (1977) et Hart et al., (1973) constatent que les ordres de grandeur de variation des éléments à faibles coefficients de partage (LIL éléments) ne sont pas compatibles avec les taux de cristallisation calculés. En admettant que les concentrations de Ni et Cr varient peu dans les solides initiaux et dans les liquides produits par fusion partielle (§ III-2), l'absence de corrélation  $(Cr, Ni) = f(Ti)$  peut être expliquée par une variation des éléments à faibles coefficients de partage (Ti) indépendamment de la cristallisation : solide initial, degrés de fusion partielle différents pour un site donné, et par le mélange de différents liquides. Que le phénomène de production de liquide soit un processus continu ou discontinu, cette notion de mélange de liquides primaires (avant différenciation) ou de liquide primaire et de liquide déjà différencié, correspond vraisemblablement à un processus très probable (O'Hara, 1977). Rhodes et al. (1979) considèrent ce processus comme banal et commun au niveau des dorsales. Il convient néanmoins de mentionner que la démonstration donnée par ces auteurs est restrictive; ils considèrent en effet que tous les liquides primaires produits ont la même concentration en Ti. Or, dans la seule zone de FAMOUS, les liquides primaires ont une concentration en Ti variant, au moins, de 3000 à 6000 ppm.

Variabilité de la concentration initiale des liquides primaires en Ti et processus de mélange rendent donc difficile la détermination des coefficients de partage globaux de Cr et Ni. Les deux exemples cités, Mont de Vénus dans la zone FAMOUS et site 332 du leg 37, où une série d'échantillons peut être considérée dérivant d'un même liquide initial, permettent d'aboutir à des valeurs de coefficients de partage globaux de Ni et de Cr compatibles avec la contrainte apportée par le comportement de Co : les minéraux ferro-magnésiens olivines (+ spinelles) et cli-

nopyroxènes ne peuvent cristalliser seuls en quantité très appréciable; il est nécessaire pour rendre compte du comportement de ces éléments de faire intervenir la cristallisation d'un minéral à coefficient de partage faible vis à vis de ces éléments.

## 5- LIQUIDES PRIMAIRES ET CRISTALLISATION FRACTIONNEE

-----

La détermination de la nature des magmas primaires produits à partir du manteau constitue l'un des problèmes majeurs de la pétrologie des roches ignées. L'identification des magmas primaires est rendue difficile par les effets dûs à la cristallisation fractionnée et les phénomènes de mélange. Les résultats obtenus à partir du comportement de Co, Ni et Cr apportent quelques contraintes vis à vis de la nature des liquides primaires et du processus de cristallisation fractionnée. On se propose dans ce paragraphe de comparer ces contraintes vis à vis de la genèse des basaltes des dorsales aux données de la pétrologie expérimentales et aux bilans qui peuvent être établis à partir des séries ophiolitiques. Le problème se pose de la façon suivante : le manteau n'est pas homogène tout le long d'une dorsale, l'évidence la plus certaine étant montrée par les variations de certains éléments radiogéniques, le rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  par exemple (ex.: Tatsumoto, 1966; O'nions and Pankurst, 1974; White and Bryan, 1977; White and Schilling, 1978); l'interprétation du comportement des éléments à faibles coefficients de partage, terres rares notamment, repose sur cette hétérogénéité du manteau et sur des degrés de fusion partielle différents (Gast, 1968; Treuil, 1973; Schilling, 1973 a, b; Langmuir et al., 1977; Bougault et al., 1979). Malgré cette "variabilité", la composition des liquides primaires (éléments majeurs) produits le long d'une dorsale est-elle constante (indépendante de cette variabilité)? Cette composition (ou ces compositions) est-elle capable de rendre compte des séquences observées dans une série ophiolitique - basaltes, gabbos, péridotites de cumulats (Coleman, 1977)?

### 5-A- COMPOSITION DES LIQUIDES PRIMAIRES ( $\text{Mg}$ , $\text{Mg}^{++}/\text{Mg}^{++} + \text{Fe}^{++}$ )- CONTRAINTES APORTEES PAR Co et Ni -.

Dans cette discussion, la contrainte la plus importante est sans nul doute représentée par la remarquable homogénéité des données relatives aux éléments majeurs (voir l'ensemble des tableaux); les tholéiites océaniques peuvent être parfaitement définies sur la base des données des éléments majeurs et constituent vraisemblablement à cet égard, le type de basalte le mieux défini compte-tenu des volumes énormes produits le long des 65 000 Km de dorsales médio-océaniques pendant des dizaines, voire des centaines de millions d'années. Bryan et al., 1976; Bryan and Moore, 1977; Arcyana, 1977; Bougault and Hekinian, 1974; Donaldson et al., 1976; Frey et al., 1974; Kay et al., 1970; Melson et al., 1968; Melson and Thompson, 1973; Melson et al., 1976; Muir and Tilley, 1964; Muir and Tilley 1966; Hart et al., 1973; Engel and Engel, 1964; Engel et al., 1965a; Engel et al., 1965b; Aumento, 1967; Aumento, 1968; Hekinian and Aumento, 1973; Hekinian et al., 1976; Bence et al., 1975; Bender et al., 1978; Langmuir et al., 1977; Cann, 1971; Blanchard et al., 1976; Nicholls, G.D., et al., 1964; Miyashiro et al., 1969; DSDP initial reports, vol. 34, 37, 45, 46, 51, 52, 53, 54, 55, 65.

La meilleure compilation de données "éléments majeurs" concernant les tholéiites océaniques est vraisemblablement celle de Bence et al. (in press); 1500 analyses de basaltes et 1200 analyses de verres basaltiques provenant de tous les océans y sont représentées (dont 965 analyses de verres de Melson et al., 1976). Dans leurs interprétations, ces auteurs font clairement la différence entre verre d'une part et basaltes d'autre part, permettant d'éviter au niveau des interprétations tous les phénomènes d'accumulation de cristaux.

Les expériences de pétrologie expérimentale indiquent que la composition des liquides basaltiques primaires dépend de plusieurs paramètres: pression, température, degré de fusion (Yoder and Tilley, 1962; Green and Ringwood, 1967; Kushiro, 1968) et des pressions partielles de H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub> (Mysen and Boettcher, 1975). Néanmoins, en dépit des effets dus à la cristallisation fractionnée, l'"homogénéité" des tholéiites océaniques implique que l'ensemble de ces paramètres ne varie pas d'une façon arbitraire. Bien que présentant des résultats relatifs à un système simplifié (CaO, MgO, Al<sub>2</sub>O, SiO<sub>2</sub>), Presnall et al. (1979) montrent que la courbe solidus d'un matériel mantellique présente très certainement des discontinuités correspondant à l'intersection du solidus et des courbes subsolidus liées à des réactions univariantes. Chacune de ces discontinuités correspond à un point invariant. Un tel point invariant peut contrôler la composition des liquides basaltiques primaires. D'après Hanson et Langmuir, (1979) et Bender et al., (1978), le rapport  $Mg^{++}/Mg^{++} + Fe^{++}$  dépend peu du degré de fusion tant que le liquide est en équilibre avec les phases ferro-magnésiennes de la source (coefficients de distribution de FeO et MgO de Roeder and Emslie, 1970).

Ainsi, l'"homogénéité" des tholéiites océaniques d'un point de vue éléments majeurs, peut-elle être expliquée par cette notion de point invariant sur la courbe solidus et l'équilibre liquide-solide pour le rapport  $Mg^{++}/Mg^{++} + Fe^{++}$ . Néanmoins, l'intervalle de variation proposé pour ce rapport dans les liquides par différents auteurs est 0,68-0,75 qui correspond à des compositions en éléments majeurs significativement différentes (Frey et al, 1978; Bence et al., 1979). Pour 0,70 on obtient une composition proposée par Rhodes et al., (1979) qui correspond aux tholéiites océaniques les plus "primitives" (MgO  $\approx$  10%); pour 0,75 on obtient une composition comparable à celle proposée par Don Elthon (1979) (MgO  $\approx$  17%). D'un côté, une composition qui correspond aux basaltes identifiés comme non différenciés, mais qui ne permet pas la cristallisation de minéraux ferro-magnésiens en quantité très importante compte-tenu de l'intervalle de variation des éléments majeurs des tholéiites océaniques; de l'autre, une composition de liquide primaire, jusqu'ici jamais observée pour des échantillons de basaltes océaniques, mais qui permet de rendre compte des séries "cumulatives" observées à la base des séries ophiolitiques. En raisonnant en termes de coefficients de partage, pour autant que cette notion puisse s'appliquer sous forme de bilan pour les éléments majeurs, l'homogénéité des tholéiites peut s'expliquer par des coefficients de partage des majeurs voisins de l'unité.

Les informations obtenues à partir des éléments à forts coefficients de partage permettent-elles d'apporter une contrainte en faveur de l'une ou l'autre de ces deux possibilités?

Le premier argument concerne les résultats des calculs relatifs à la fusion partielle pour les éléments à forts coefficients de partage (§ III-1). Un "fit" est obtenu pour les concentrations de Co, de Ni, et à un moindre degré de Cr, pour des liquides présentant des concentrations en éléments à faibles coefficients de partage différentes (vraisemblablement variation du taux de fusion partielle) dont les valeurs de  $Mg^{++}/Fe^{++} + Mg^{++}$  est de 0,70.

Le deuxième argument concerne les propriétés de ces éléments Co, Ni, Cr, c'est-à-dire leurs coefficients de partage élevés : pour respecter le spectre observé en éléments majeurs des tholéiites océaniques (MgO entre  $\sim 7\%$  et  $10,5\%$ ), il faut admettre en partant d'un liquide à  $17\%$  de MgO, une cristallisation importante de minéraux ferro-magnésiens -qui formeraient les cumulats suivant Don Elthon (1979)-. Cette hypothèse impliquerait en corollaire des concentrations très faibles en Co, Ni et Cr pour l'ensemble des tholéiites océaniques jusqu'ici échantillonnées, y compris pour les échantillons à  $10\%$  de MgO. Ou bien, deuxième façon de présenter ce phénomène hypothétique, partant d'un liquide primaire ayant des concentrations en Ni et Co bien supérieures à  $250$  et  $50$  ppm (même en supposant une variation des coefficients de partage avec MgO), il faudrait admettre la cristallisation de minéraux ferro-magnésiens en quantité d'une régularité telle qu'elle permette de rendre compte du spectre observé pour la concentration de ces éléments. Ceci ne peut être en accord avec le caractère alléatoire de l'éruption de lave à partir d'une chambre magmatique dont le liquide a déjà subi une différenciation quelconque au moment de l'éruption. Statistiquement, compte-tenu de l'ensemble d'échantillons océaniques disponibles, nous devrions avoir trouvé des échantillons dont les teneurs soient nettement plus grandes que  $50$  ppm et  $250$  ppm pour Co et Ni (en contradiction avec la théorie) correspondant à des concentrations en MgO comprises entre  $11$  et  $17\%$ . Des tholéiites océaniques présentant ces caractéristiques n'ont jamais été observées; on considèrera comme très peu vraisemblable une composition présentant des teneurs élevées en MgO pour les liquides tholéitiques primaires.

En tenant compte de l'ensemble des résultats présentés, il est possible de conclure à une faible variation des compositions des liquides tholéitiques primaires au niveau des dorsales médio-océaniques; ces compositions correspondent à une valeur de  $Mg^{++}/(Fe^{++} + Mg^{++})$  de l'ordre de  $0.7$  (Rhodes et al., 1979) très voisine des basaltes "primaires" échantillonnés dans la zone FAMOUS (ARP 10-16, CYP 31-35, ARP 9-12) et aux sites 411 et 413 de DSDP.

#### 5-B- CRISTALLISATION : INFORMATIONS DE PETROLOGIE EXPERIMENTALE ET COMPORTEMENT Co-Ni -.

Les études expérimentales effectuées sur les basaltes océaniques (Kushiro, 1973; Bender et al., 1978; Fisk, 1978) indiquent que la séquence de cristallisation sous faible pression, pour les liquides primaires ( $Mg^{++}/Mg^{++} + Fe^{++} = 0,7$ ) est la suivante : olivine; olivine + plagioclase; olivine + plagioclase + clinopyroxène (entre  $0$  et  $10$  kb). Les clinopyroxènes cristallisent tardivement à faible pression. Sous forte pression, ( $\sim 10$ kb) les clinopyroxènes constituent la phase qui apparaît au liquidus pour ces liquides primaires. Une petite quantité d'eau peut réduire cette pression à  $3$ kb.

La très grande majorité des données concernant les verres basaltiques correspondent au cotectique faible pression olivine-plagioclase (Bence et al., 1979); les verres les plus différenciés correspondent au péritectique olivine-plagioclase-clinopyroxène. Ces informations sont en parfait accord avec les résultats et les coefficients de partage globaux présentés au paragraphe précédent. On note toutefois la nécessité de faire intervenir une petite quantité de spinelle avec l'olivine pour expliquer le fractionnement de Cr. Variation des éléments majeurs, variations des éléments à forts coefficients de partage correspondent donc à la cristallisation olivine (+ spinelle) et plagioclase; ce sont effectivement les phénocristaux observés dans les

basaltes porphyriques. A faible pression, les clinopyroxènes apparaissent tardivement pour des liquides déjà évolués; l'apparition de ce minéral peut expliquer le coefficient de partage global de Cr plus élevé  $P_{Cr} = 4$  trouvé à partir de la figure III.10a (site 332) par comparaison à la figure III.10b (Mont de Vénus  $P_{Cr} = 2$ ). Les échantillons du site 332 correspondent en effet à des liquides nettement plus évolués que les échantillons du Mont de Vénus.

Un bilan quantitatif du processus de cristallisation fractionnée reste difficile à établir du fait de la variabilité des taux de fusion partielle conduisant aux liquides primaires (évidence d'après la dispersion des points dans un diagramme  $\log(Ni) = f \log(Ti)$ , et par l'impossibilité de "fit" de Ti en utilisant un modèle de cristallisation pour les éléments majeurs, (Rhodes et al., 1976; Bryan and Moore, 1977; Bence et al., 1979) et surtout en raison des possibilités de mélanges (O'Hara, 1977; Rhodes et al., 1979). Néanmoins, la composition des liquides primaires (MgO 10%), l'intervalle de variation des compositions des basaltes océaniques (MgO: 7 à 10%) dû au processus de cristallisation, la nature et les proportions de minéraux susceptibles de cristalliser (en volume : plagioclase) > olivine (+ spinelle) > clinopyroxène, Bryan and Moore, (1977) apportent des contraintes pour toute comparaison croûte océanique - série ophiolitique.

#### 5-C- BASALTES THOLEIITQUES OCEANIQUES ET SERIES OPHIOLITIQUES -.

Deux théories se trouvent en présence en ce qui concerne la notion de basaltes primaires et effets de la cristallisation fractionnée :

a) Liquide pricritique - Cette théorie repose sur le principe qu'aucun des basaltes tholéitiques jusqu'ici échantillonnés sur les rides médio-océaniques, représente un liquide primaire (Don Elthon, 1979; O'Hara, 1977; Ohnenstetter, 1975; Bottinga et Allegre, 1976). Cette théorie permet de considérer l'ensemble "péridotites du cumulat" (observé dans les séries ophiolitiques) et les basaltes "cogénétiques", au sens de la cristallisation fractionnée. Le lieu de formation de la croûte océanique est exclusivement l'axe d'accrétion, le phénomène cristallisation intervenant dans une chambre magmatique de taille relativement grande (Bryan and Thompson, 1979).

b) Liquide primaire  $Fe^{++}/Mg^{++} + Fe^{++} = 0,7$  : MgO = 10,5% (Rhodes et al., 1979). Cette théorie ne signifie pas, bien au contraire, que tous les basaltes océaniques sont des liquides non différenciés. Les concentrations en Co, Ni et Cr dans ces liquides initiaux sont compatibles avec les calculs relatifs à la fusion partielle (concentrations indépendantes du taux de fusion partielle). La nature des phénocristaux observés dans les basaltes, olivine (+ spinelle), plagioclase et rarement clinopyroxène et la composition des verres basaltiques, qui se situe sur le cotectique olivine-plagioclase ou pour les échantillons les plus évolués sur le péritectique olivine-plagioclase-clinopyroxène sont en accord avec la faible variation de Co et les ordres de grandeur des coefficients de partage globaux de Ni et Cr. La composition d'un tel liquide primaire et les intervalles de variation des éléments majeurs et des éléments Co, Ni et Cr ne permettent pas d'envisager l'ensemble "péridotite de cumulat" comme cogénétique des liquides basaltiques sur le plan cristallisation fractionnée. Cette théorie permet d'envisager des "chambres magmatiques" de taille beaucoup plus réduite que précédemment, en accord avec la notion de discontinuité des processus à l'axe (Bottinga and Allegre, 1976; Bougault et al., 1979) et beaucoup

plus conforme à la zone très étroite d'extrusion des laves sur le plancher interne du Rift (Needham and Francheteau, 1974

Il faut noter que la contradiction à propos des liquides primaires repose finalement sur l'appréciation du caractère cumulatif de certaines péridotites dans les ophiolites, dont les abondances rapportées sont très variables. Il convient de bien faire la distinction entre ce que sont les données dorsales médio-océaniques et ce que sont les données et les observations sur les massifs ophiolitiques; il faut se garder de choisir des arguments dans un domaine et dans l'autre pour aboutir à une conclusion d'ensemble (Don Elthon, 1979). Si l'origine océanique d'un massif ophiolitique ne peut être mise en doute, ceci ne signifie pas une identité avec la croûte océanique actuelle âge zéro.

Les données relatives aux éléments à forts coefficients de partage disponibles pour la croûte océanique permettent de rendre compte de la cristallisation des gabbros; la plus grande partie des péridotites doit donc être considérée comme un résidu de fusion partielle; cette observation est en accord avec les résultats concernant les éléments à faibles coefficients de partage (Montigny et al., 1973; Allègre et al., 1973, Loubet, 1976).

Si l'interprétation de certains faciès de séquences dunitiques en termes de cumulat (résultat d'une cristallisation fractionnée) est exacte (Laurent, Fox, communications personnelles) la conciliation des données dorsales médio-océaniques et des données ophiolites ne peut pas être faite sur la base de l'identité ophiolite - relique d'une dorsale médio-océanique âge zéro.

## CHAPITRE IV

---

### LES ELEMENTS A FAIBLES COEFFICIENTS DE PARTAGE OU HYGROMAGMAPHILES

Le terme "hygromagmatophile" remplacé ici par hygromagmaphile a été proposé initialement par Treuil (1973) pour introduire la notion d'affinité pour le liquide de certains éléments afin de ne pas limiter l'interprétation de leur comportement général (faible coefficient de partage) à la seule notion d'encombrement stérique dans une phase minérale. On désignera par cet adjectif hygromagmaphile les éléments dont le comportement général traduit une affinité pour le liquide.

Beaucoup de ces éléments, les terres rares en premier lieu, ont fait l'objet de nombreuses études; éléments de la première série de transition, Sc, Ti, V, de la deuxième série de transition Y, Zr, Nb, de la troisième série de transition Hf, Ta ainsi que Th et U. Il reste néanmoins que très rarement - si ce n'est jamais à ma connaissance - l'ensemble de ces éléments n'a fait l'objet d'une investigation dans les *mêmes* échantillons. C'est l'originalité d'une partie de ce mémoire que de présenter des données homogènes pour l'ensemble de ces éléments obtenues sur les mêmes échantillons. Ces données correspondent à un effort conjoint du Groupe des Sciences de la Terre du Laboratoire P. Sue du C.N.R.S. pour ce qui est des éléments accessibles par analyse par activation et du Groupe de Géochimie du Centre Océanologique de Bretagne (C.N.E.X.O.) pour les éléments accessibles par spectrométrie de fluorescence X. Aussi, avant de considérer les informations que peuvent apporter tels ou tels de ces éléments sur le plan des processus magmatiques ou des propriétés croûte-manteau océanique, convient-il de tirer parti de ces données sur le plan des propriétés géochimiques comparées de ces éléments dans le but de compléter les informations données chapitre II.

Dans un premier temps on se servira des variations continues des propriétés des Terres Rares le plus souvent exprimées par un diagramme de Coryell - Masuda (Masuda, 1962; Coryell et al., 1963); on essaiera de voir dans quelle mesure le comportement des éléments hydromagmaphiles, autres que terres rares, peut se comparer aux éléments terres rares. Dans un deuxième temps, cet essai de géochimie comparative sera tester sur un plan un peu plus théorique - notion d'incompatibilité et d'affinité pour le liquide - à l'aide de la relation proposée § II.6. Les propriétés croûte-manteau et la variabilité des processus magmatiques seront ensuite discutées.

## 1- TERRES RARES ET AUTRES ELEMENTS HYGROMAGMAPHILES : GEOCHIMIE COMPAREE

---

Les éléments hygromagmaphiles dont on se propose de comparer le comportement à celui des terres rares lors de la genèse des basaltes océaniques sont les suivants :

- 1ère série de transition : Sc, Ti, V.
- 2ème série de transition : Y, Zr, Nb.
- 3ème série de transition : Lantanides, Hf, Ta.  
Actinide : Th.

Pour la plupart de ces éléments, leur comportement hygromagmaphile peut être considéré comme un fait acquis. L'Yttrium, dont les propriétés, voisines des terres rares lourdes (ou terres Yttriques), sont bien connues, a d'ores et déjà très souvent été intégré aux diagrammes terres rares. Un diagramme Zr, Ti, Y reposant sur l'observation empirique des données plutôt que s'appuyant sur les propriétés de ces éléments a été proposé par Pearce et Cann (1971). Une corrélation Ti-Dy a été observée dans les basaltes océaniques et dans des séries ophiolitiques a été montrée par Bougault (1977). Le comportement de Zr et Nb a été discuté par Erlank and Kable (1976). Hf, Ta et Th ont fait l'objet d'un travail important par Treuil (1973). Une classification de ces éléments suivant leur "affinité hygromagmaphile" a été proposée par Bougault et al. (1979), classification mentionnée § II.5. En procédant également par comparaison élément-élément, on constate que la corrélation Ti-V n'est pas évidente (Bougault et Hékinian, 1974). Le Scandium, qui possède pourtant, comme Y, une structure très voisine des terres rares ne suit pas le comportement de l'une des Lanthanides (légères ou lourdes). Le but de ce paragraphe est de montrer, dans quelle mesure et avec quelle précision, les éléments hygromagmaphiles non terres rares peuvent se comparer aux terres rares et de voir s'ils apportent des informations comparables ou non vis à vis du (des) matériau(x) source et des processus magmatiques. Pour ce faire, on se propose d'inclure ces éléments dans un diagramme Terres Rares de Coryell et Masuda, qu'on appellera diagramme terres rares "élargi" (sous-entendu, aux éléments hygromagmaphiles non terres rares). Il convient d'abord de justifier la possibilité de "normalisation", puis de choisir pour chaque élément la concentration de référence pour normalisation et de trouver la place qu'il doit occuper parmi les terres rares.

Justification de possibilité de normalisation : contrairement aux éléments à forts coefficients de partage envisagés au chapitre précédent, outre leur propriété hygromagmaphile, les éléments considérés ici possèdent les deux propriétés suivantes :

- non volatilité lors des processus d'accrétion planétaire
- caractère lithophile

Ces deux propriétés, communes aux éléments étudiés et aux terres rares, justifient au moins dans un premier temps, la notion de "normalisation" suivant les critères jusqu'ici adoptés pour les terres rares. La normalisation des concentrations de ces éléments dans un échantillon basaltique par rapport aux chondrites (rapport concentration dans un échantillon / concentration dans les chondrites) devrait donc permettre d'étudier le comportement de ces éléments les uns

vis à vis des autres en éliminant les hétérogénéités des concentrations dues à l'abondance naturelle des éléments (loi d'Oddo-Harkins par exemple pour l'abondance relative des éléments suivant les numéros atomiques pairs et impairs).

#### 1-A - VALEURS DE NORMALISATION : CONCENTRATIONS DANS LES CHONDRITES -.

L'abondance des terres rares et des autres éléments considérés dans les chondrites varie de plus d'un facteur deux. La concentration de chaque élément des terres rares utilisée comme valeur de normalisation est en général une moyenne obtenue à partir de l'analyse de différentes chondrites (Frey et al., 1968). Certains préfèrent choisir des valeurs obtenues à partir d'une seule chondrite à la condition, pour parler le même langage, de multiplier la concentration de chaque élément par le rapport (total des concentrations des terres rares d'une chondrite composite moyenne / total des concentrations des terres rares dans l'échantillon chondritique de référence utilisé), (Sun and Hanson, 1975). L'une et l'autre de ces valeurs de normalisation conduisent à des petites différences d'abondance relative des éléments. Ni l'une, ni l'autre de ces deux méthodes n'est applicable pour les éléments Th, Ta, Nb, Zr, Hf, Ti, V. Les concentrations moyennes de ces éléments, obtenues à partir des mêmes chondrites que les concentrations moyennes de terres rares, ne sont pas disponibles dans la littérature et il n'existe pratiquement pas de chondrite pour laquelle l'ensemble des concentrations de ces éléments (+ terres rares) ont été mesurées. De plus, il existe une dispersion très importante (plus d'un facteur deux) sur les résultats obtenus par divers auteurs pour le même élément dans la même chondrite. Les raisons de cette dispersion sont très souvent dues aux faibles niveaux de concentration de ces éléments, à la précision analytique ainsi qu'aux quantités d'échantillons disponibles pour analyse. En raison de ces difficultés, on se propose de calculer les concentrations de normalisation de ces éléments de la façon suivante :

- on fait l'hypothèse que ces éléments suivent effectivement un comportement voisin de celui des terres rares.

Etape 1 - On choisit un échantillon basaltique A dont le diagramme terres rares est plat, c'est-à-dire un échantillon pour lequel toutes les lanthanides présentent un rapport normé aux chondrites  $R_A$  constant ou à peu près constant. Si l'hypothèse faite pour les éléments hygromagmaphiles est exacte, ces éléments présentent le même rapport "normé aux chondrites"  $R_A$ . A partir de la valeur du rapport  $R_A$  et des concentrations des éléments  $i$  mesurées dans cet échantillon A,  $C_{A,i}$ , on peut déduire une concentration de normalisation pour chaque élément  $Ch_i$  :

$$Ch_i = \frac{C_{A,i}}{R_A}$$

Etape 2 - On vérifie que les valeurs  $Ch_i$  trouvées permettent pour d'autres échantillons B, C ..., dont les courbes terres rares sont également plates, mais pour lesquelles les concentrations de terres rares (ou les concentrations normées aux chondrites  $R_B, R_C \dots$ ) sont différentes  $R_A, R_B, R_C \dots$ , d'obtenir pour les éléments  $i$  les valeurs  $R_A, R_B, R_C \dots$  correspondant à chaque échantillon.

En fait, il est difficile de trouver plusieurs échantillons dont les courbes de terres

Th	La	Ta	Nb	Ce	Pr	Nd	
0,028	0,32	0,031	0,53	0,85	0,112	0,60	
Zr	Hf	Sm	Ti	Eu	Gd	Tb	
5,13	0,128	0,19	460	0,070	0,25	0,047	
Y	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	V
2,16	0,32	0,07	0,21	0,03	0,20	0,033	22

Tableau IV.1: Valeurs de normalisation des éléments hygromagmaphiles non-terres rares (en grands caractères) calculées par rapport aux terres rares.

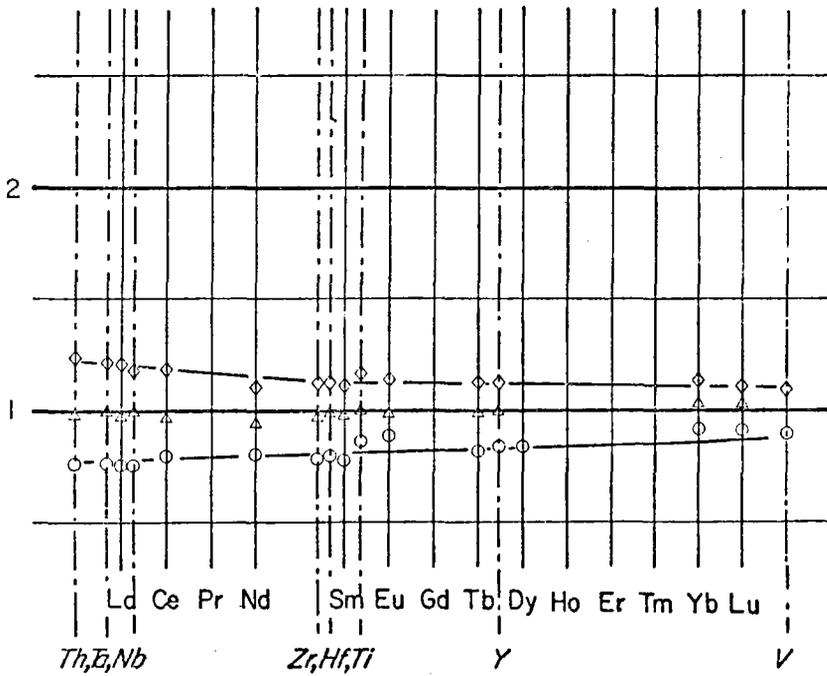


Figure IV.1: Diagramme Terres rares "élargi": distribution "plate" ou à peu près "plate". La position des éléments non terres rares par rapport aux terres rares résulte du § 1B. Echantillons du forage 332B (36°N):  $\diamond$ 3-4;  $\Delta$ 25-3;  $\circ$ 36-3, 37-1.

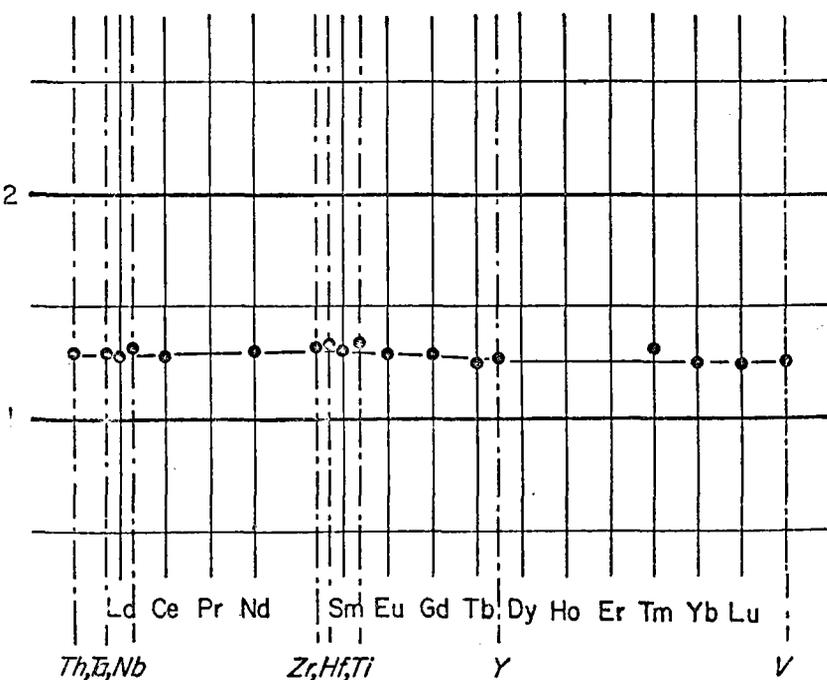


Figure IV.2: Mêmes informations que figure IV.1. Echantillons du site 409 (63°N): 13-3 à 31-1.

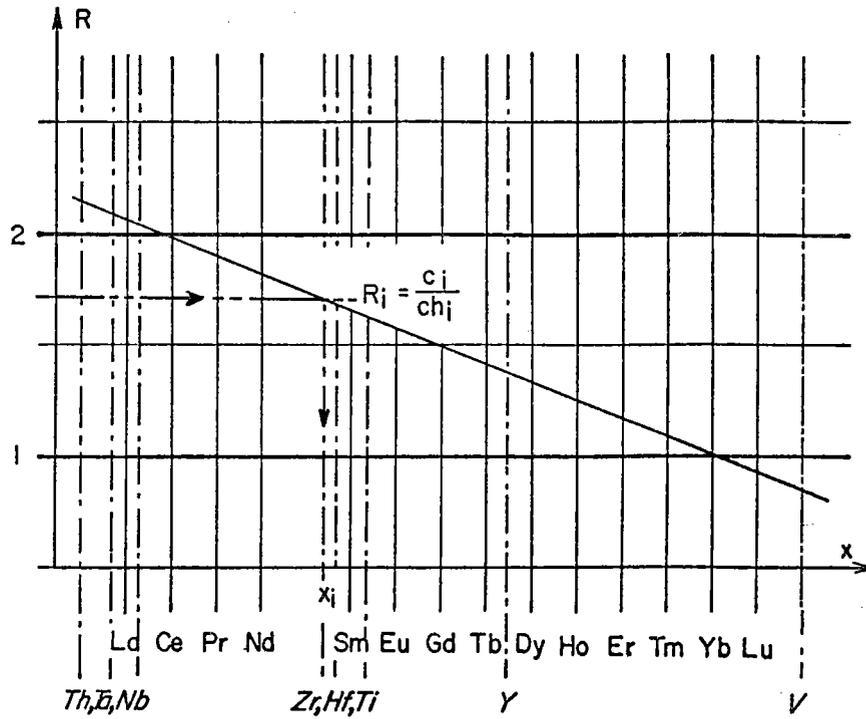


Figure IV.3: Détermination de la "position" d'un élément hygromagnaphile non terre rare par rapport aux terres rares, en utilisant des concentrations normées.

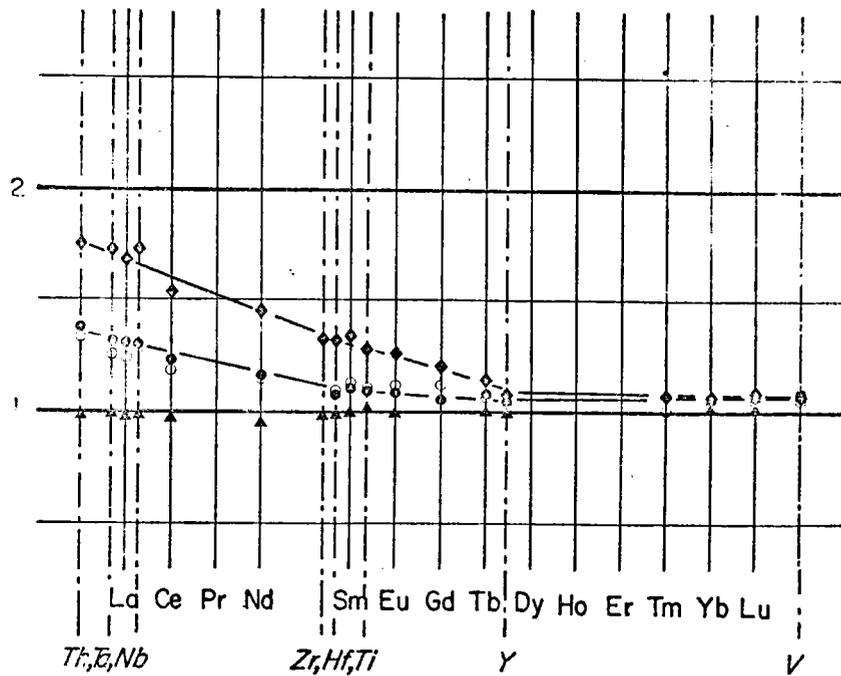


Figure IV.4: Diagramme terres rares "élargi"; zone FAMOUS.  
 ◆ forage 413, 3-1; ● forage 411, 5-1; ○ forage 412, 15-1;  
 ▲ forage 332B, 25-3.

rare sont rigoureusement plates et pour lesquels les concentrations normées aux chondrites  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $R_C$  ... sont différentes. Aussi, pour tenir compte des légères variations des concentrations normées dans un même échantillon, a-t-on considéré le classement préliminaire des éléments par rapport aux terres rares, présenté § II.5, pour calculer les  $Ch_i$  (exemple : comportement de Ta voisin de La; on a choisi pour calculer  $Ch_{Ta}$  la valeur normée aux chondrites de La, plutôt que celle de Sm ou Lu).

Les résultats trouvés, valeurs de normalisation, pour les éléments hygromagmaphiles sont présentés tableau IV.1.A titre d'exemple, les diagrammes terres rares "élargis" correspondant à différents échantillons dont la distribution terres rares est à peu près plate, mais pour lesquels les concentrations normées sont différentes, sont présentés figure IV.1 et IV.2. La figure IV.1 correspond à trois échantillons du leg 37 du Glomar Challenger (site 332 situé à l'Ouest de la Zone FAMOUS), tableau V.5; les concentrations de terres rares, autres que La, Eu et Tb sont de + et de ++. Les valeurs de normalisation ne correspondent pas à une zone géographique particulière; la figure IV.2 correspond aux échantillons 13-3 à 31-1 (moyennes sur 37 échantillons) du site 409 de D.S.D.P. situé à l'Ouest de Reykjanes Ridge § leg 49, tableau V.19; les données terres rares, autres que La, Eu et Tb, correspondent aux données de Wood et al., (1979). La position des éléments non terres rares dans ces figures par rapport aux terres rares tient compte du résultat du paragraphe suivant. + Schilling et al., (1977), ++ Puchelt et al., (1977)

#### 1-B - DIAGRAMME TERRES RARES "ELARGI" : POSITION DES ELEMENTS "NON TERRES RARES" PAR RAPPORT AUX TERRES RARES -.

On a montré au paragraphe précédent que pour des distributions de terres rares plates, ou à peu près plates, les éléments hygromagmaphiles non terres rares pouvaient être inclus dans un tel diagramme. Pour montrer que l'ensemble des éléments hygromagmaphiles peut être représenté d'une façon générale suivant un tel diagramme "terres rares élargi", il convient dans un deuxième temps de considérer les cas des diagrammes "enrichis" ou "appauvris" en terres rares légères. Cette opération nécessite de connaître avec précision la position de chaque élément non terre rare, par rapport aux terres rares. En tenant compte du classement des éléments déjà proposé § II.5, il est possible de trouver la position de chaque élément par rapport aux terres rares en deux étapes.

Etape 1 - On choisit un échantillon dont la distribution terres rares est très différente de la distribution plate, enrichie en terres rares légères par exemple; on calcule pour chaque élément non terres rares, la concentration normée  $R_i$  en se servant des valeurs de normalisation calculée § I-A. On recherche alors à partir des valeurs de normalisation  $R_i$  ainsi trouvée (axe y), la position  $x_i$ , (axe x) que doit occuper l'élément pour que le point représentatif de cet élément soit situé sur la courbe terres rares (c.f., fig.IV.3).

Etape 2 - On vérifie, pour des échantillons dont les distributions terres rares sont différentes (facteurs d'enrichissement ou appauvrissement en terres rares légères), que l'ensemble des éléments,  $R_i = f(x_i)$ , sont situés sur la courbe terres rares.

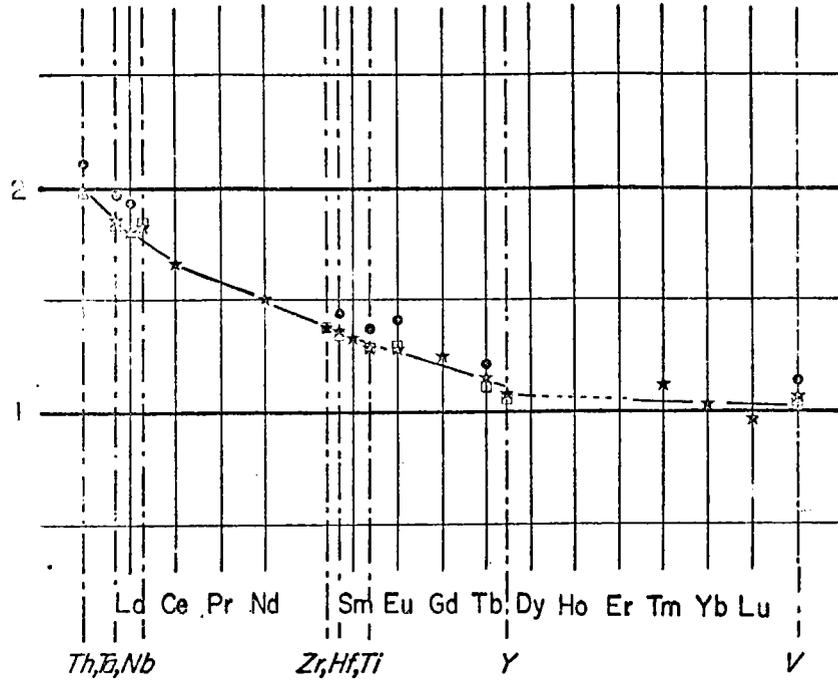


Figure IV.5: Diagramme terres rares "élargi"; 45°N.  
forage 410A, ★ 4-4, □ 3-3, ● 6-1.

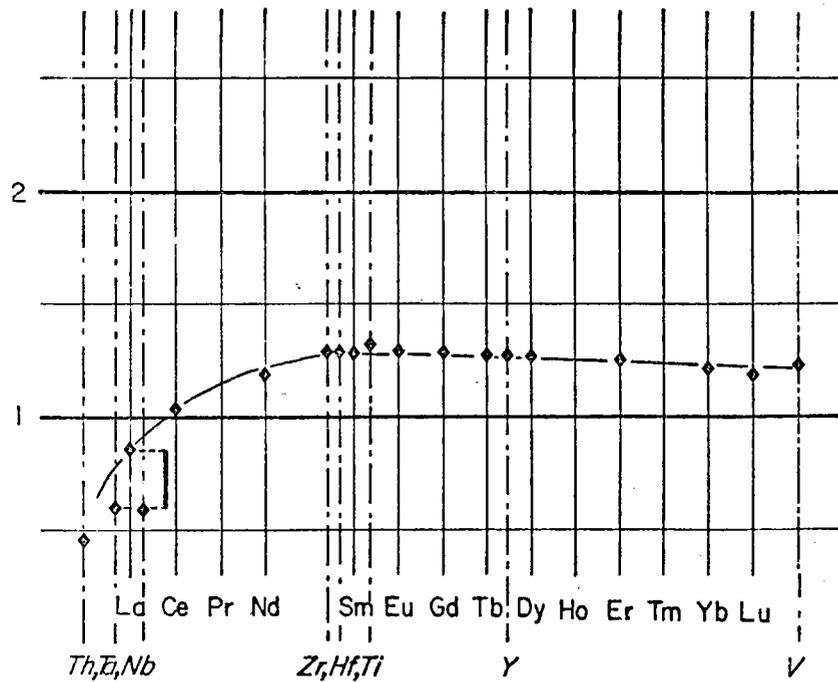


Figure IV.6: Diagramme terres rares "élargi"; 25°N, 110  
millions d'années. Forage 417D.

Les données terres rares sont de Masuda et al.,  
dans Initial Reports of DSDP, Vol. 51, 52.

Les figures IV.4,5 et 6 présentent, en même temps que la position des éléments les uns par rapport aux autres, trois exemples pour des zones géographiques différentes : figure IV.4 zone FAMOUS ou proximité immédiate; figure IV.5, 45°N et figure IV.6, site 417 110 my à 25°N.

Pour le site 417 (fig.IV.6), les valeurs normées du Ta et du Nb ne correspondent pas à celles de La; ce point sera discuté ultérieurement.

La méthode qui a été présentée § I-A pour le calcul de normalisation et ce paragraphe pour trouver la position relative des éléments peut être rendue plus précise en tenant compte d'un nombre plus grand d'échantillons, et en appliquant un calcul statistique. Les valeurs de normalisation trouvées § I-A et la position des éléments trouvée tiennent compte de cet aspect statistique.

Les résultats trouvés permettent donc d'affirmer que les éléments hygromagmaphiles non terres rares dans les basaltes présentent un comportement global identique à celui des terres rares. L'axe x du diagramme classique utilisé, permettant d'établir le classement relatif des éléments les uns par rapport aux autres, repose sur le numéro atomique des terres rares. Plutôt que de conserver ce paramètre, numéros atomiques des terres rares, (ou rayon ionique) et d'indiquer par exemple que le Zr de numéro atomique 40 (ou de rayon ionique 0,79) a un comportement identique au Sm de numéro atomique 62 (ou de rayon ionique 0,96), il paraît plus judicieux d'essayer de trouver un paramètre dont les valeurs puissent rendre compte de la classification obtenue.

## 2- INCOMPATIBILITE ET AFFINITE POUR LE LIQUIDE; PARAMETRE $\phi$

-----

La discussion des propriétés des éléments à faibles coefficients de partage a conduit ( § II.6 ), à tenir compte de la notion d'incompatibilité (difficulté à entrer dans une structure cristalline) et de la possibilité de formation de complexes dans le liquide et à proposer le paramètre :

$$\phi = \left[ a (\Delta R_i)^2 + 1 \right] \phi$$

$R_i$  : différence du rayon ionique de l'élément considéré et de l'élément majeur substituable.

$\phi$  : potentiel ionique ( $n/R$ ),  $n$  étant la charge de l'ion simple et  $R$  son rayon.

$a$  : paramètre définissant le "poids" relatif de l'incompatibilité par rapport à la possibilité de formation de complexe.

Il avait été constaté que ce paramètre rendait compte du classement des éléments suivant une méthode permettant de les comparer deux à deux. Il s'agit maintenant de savoir dans quelle mesure ce paramètre  $\phi$  est en accord avec le classement des éléments plus précis obtenu en 1-B.

	Th	La	Ta	Nb	Ce	Pr	Nd		
R	0,99	1,06	0,68	0,69	1,03		0,99		
n	4	3 3	5	5	3	3	3		
$\Phi$	8,34	7,35	7,25	7,35	6,90		6,33		
	Zr	Hf	Sm	Ti	Eu	Gd	Tb		
R	0,79	0,79	0,96	0,68	0,95	0,94	0,92		
n	4	4	3	4	3	3	3		
$\Phi$	5,74	5,74	5,89	5,88	5,71	5,56	5,37		
	Y	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	V	Sc
R	0,92	0,90		0,88		0,86	0,85	0,59	0,73
n	3	3	3	3	3	3	3	5	3
$\Phi$	5,34	5,16		4,93		4,72	4,64	9,23	4,22

Tableau IV.2: Rayons ioniques (R), charges des ions (n), et valeurs calculées du paramètre pour l'ensemble des éléments hygromagphiles étudiés présentant une structure électronique "gaz rare". Ainsi que montré au § II.6, la valeur de  $\Phi$  calculée pour un degré d'oxydation 5 ne correspond pas au classement de V suivant l'étude de géochimie comparée; cet élément se trouve très vraisemblablement à un degré d'oxydation inférieur.

Rappelons que la valeur de "a" a été calculée à partir de l'observation suivant laquelle un grand nombre d'échantillons présentant des courbes terres rares plates ou enrichies en terres légères, ne présente pas de fractionnement La, Ta, Nb. La valeur du rayon ionique du majeur substituable a été choisie égale à 0,68 Å (Fe<sup>++</sup> et Mg<sup>++</sup>). Pour ces conditions, a = 11.07. Les résultats de calcul pour l'ensemble des éléments étudiés sont présentés tableau IV.2. On constate que le paramètre  $\phi$  permet effectivement de classer ces éléments de la même façon qu'au §II.5 suivant l'étude de géochimie comparée. Une exception existe pour Zr, Hf qui devraient se situer entre Sm-Eu; on considèrera toutefois que la relation semi-empirique proposée pour  $\phi$  ne peut pas rendre compte du classement des éléments à mieux "qu'un numéro atomique près" vis à vis des terres rares.

L'étude de géochimie comparée § 1-A,B et l'approche semi-empirique par la notion d'incompatibilité et celle de formation de complexes, apportent donc deux résultats :

- une concentration calculée de normalisation de certains éléments vis à vis des terres rares;
- un classement des éléments rendant compte d'un comportement non alléatoire de ceux-ci au cours des processus pétrogénétiques conduisant à la formation de basaltes.

Ces deux points sont discutés au cours des deux paragraphes suivants.

### 3- VALEURS DE NORMALISATIONS CALCULEES ET CONCENTRATIONS DANS LES CHONDRITES

-----

Bien qu'obtenues par comparaison aux concentrations des lanthanides dans les chondrites, les valeurs obtenues en I-A n'ont été appelées jusqu'ici que "valeurs de normalisation". Pour les éléments non terres rares, il existe une dispersion considérable des données relatives aux chondrites; encore convient-il, avant de proposer les valeurs trouvées § I-A en tant que valeurs moyennes possibles dans les chondrites, de les comparer avec les valeurs disponibles dans la littérature.

Les valeurs trouvées et les moyennes dans les chondrites obtenues à partir de différentes sources, sont les suivantes:

Th : 0.028 ; 0.04	-	Ta : 0.031 ; 0.022	-
Nb : 0.53 ; 0.5	-	Zr : 5.13 ; 6	-
Hf : 0.128 ; 0.18	-	Ti : 460 ; 550	-
Y : 2.16 ; 1.96	-	V : 22 ; 40	-

En dehors de V, les valeurs calculées se situent dans un intervalle de 30% par rapport à ces valeurs moyennes. Pour donner une idée de la dispersion des valeurs obtenues dans la littérature, on peut citer l'exemple de Zr dans "Orgueil". 3,1 ; 4,0 ; 5,2 ; 9,4; 11, valeurs obtenues par Ganapathy et al. (1976), Palme (1974), Ehmann and Chyi (1974), Ehmann and Rebagay (1970) et Schmitt et al. (1964). Une valeur plus précise, semble-t-il est proposée par Shima (1979) : 3,82.

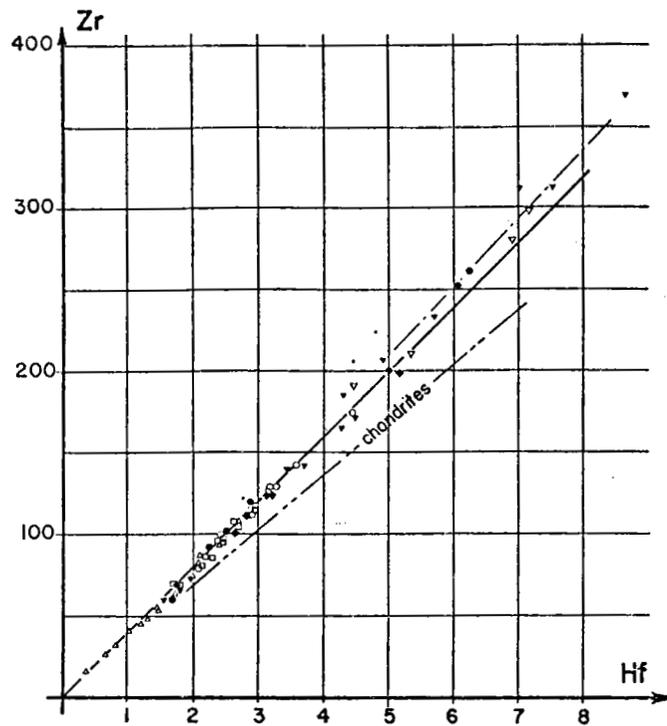
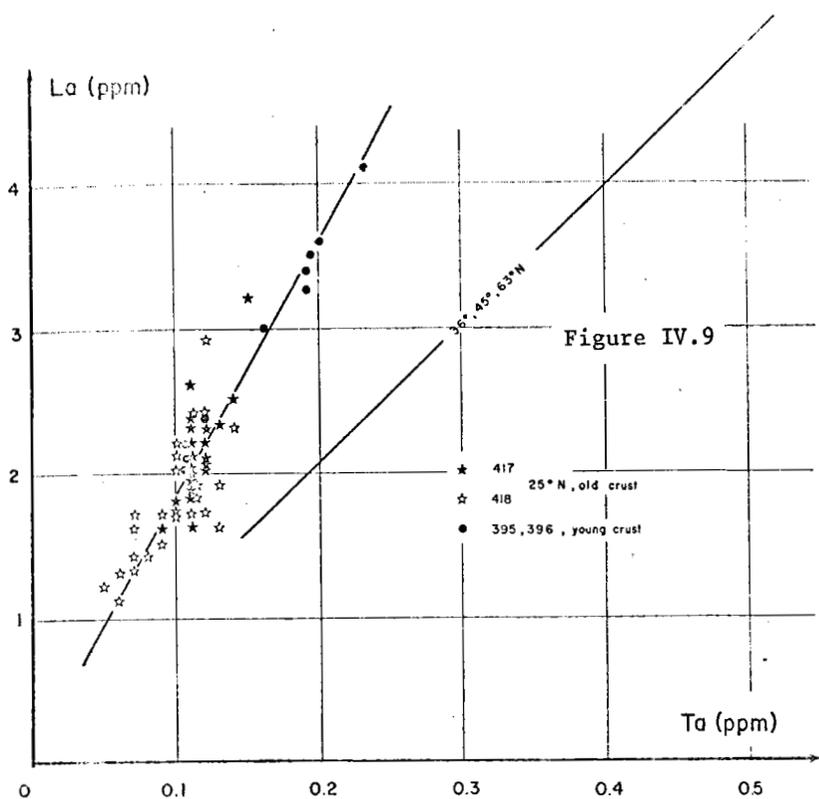


Figure IV.7

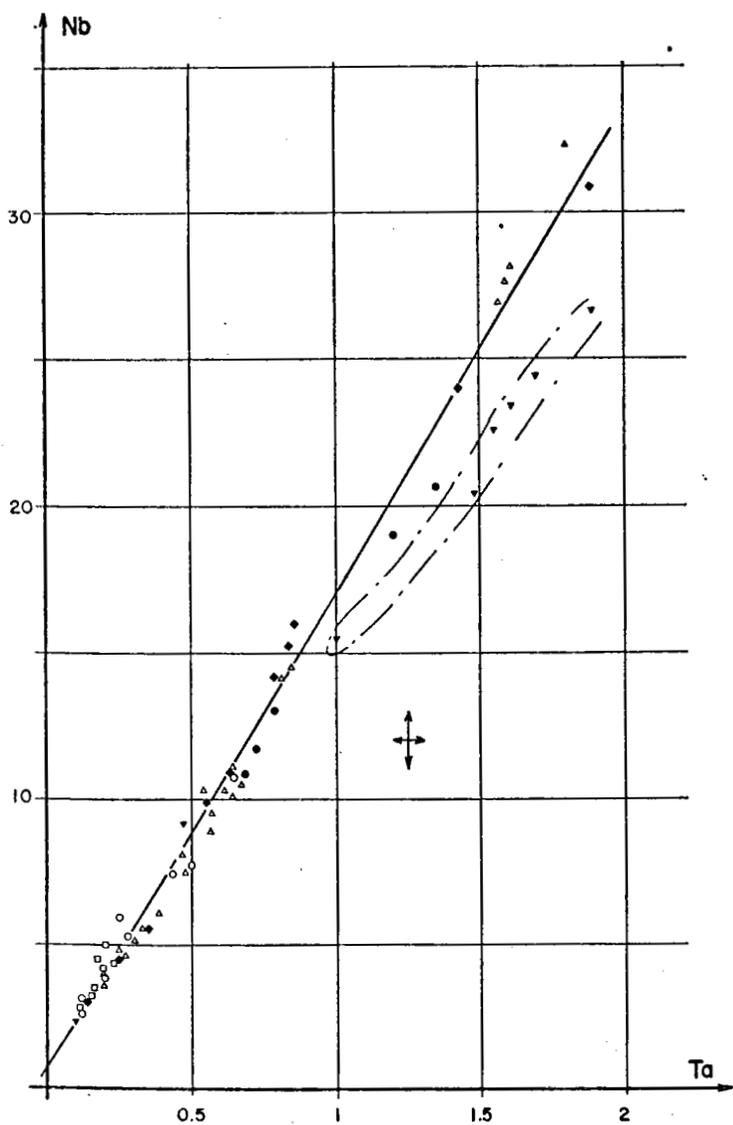


Figure IV.8

Figure IV.7:  $Zr = f(Hf)$ Figure IV.8:  $Nb = f(Ta)$ 

□ sites 395, 396 (22°N), 417, 418 (25°N, 110my.)

△ sites 411, 412, 413, 332B, FAMOUS

● "sud Oceanographer" et 15°N

○ "Kane, sud Kane, sud Atlantis, sud Vema"

◆ Reykjanes, ▽ Walvis, ▼ Gibraco

Figure IV.9: Différence La/Ta entre 22°N, 25°N et 36, 45 et 63°N.

L'idée initiale était de comparer les valeurs de normalisation calculées par rapport aux valeurs moyennes dans les chondrites pour voir si quelque "anomalie" pouvait apporter quelque information - au niveau du manteau par exemple - en tenant compte des propriétés chimiques de ces éléments. Il est évident que la précision des concentrations dans les chondrites est insuffisante pour effectuer une telle comparaison.

Pour ce qui est de la comparaison de certains rapports de concentrations, Graham et Mason (1972) présentent deux valeurs de Nb/Ta, 14 et 17; ces valeurs sont en excellent accord avec le rapport calculé à partir des valeurs de normalisation (17).

Les données récentes de Shima (1979) concernant Ti, Zr et Hf, permettent une comparaison plus précise. La valeur de Zr/Hf trouvée est  $34,3 \pm 0,05$ . Cette valeur semble différer significativement de celle proposée pour les basaltes standards BCR1 et W1 ( $38,4 \pm 0,9$  et  $37,8 \pm 0,7$  respectivement). Cette différence entre Zr/Hf dans les chondrites et Zr/Hf dans les basaltes est confirmée par Zr/Hf calculé à partir des valeurs de normalisation, reflétant nécessairement le rapport dans les basaltes ( $5,13/0,128 = 40,1$ ). La figure IV.7,  $Zr = f(Hf)$ , montre la constance de ce rapport dans un très large intervalle de variation des concentrations. La figure 7 (Zr-Hf) montre que les échantillons Gibraco, banc d'Ampère, s'écartent de la valeur Zr/Hf = 40. La même observation peut être faite en ce qui concerne Nb/Ta (fig. IV.8). Les échantillons Gibraco, banc de Gorringe, ne sont pas portés sur ces deux figures; ils montreraient un fractionnement Zr/Hf plus important que le fractionnement Nb/Ta. De ce fractionnement relatif observé pour ces deux couples d'éléments, pour des concentrations élevées (fort enrichissement en terres légères), il est possible d'admettre que la valeur Nb/Ta trouvée dans les basaltes est plus proche de la valeur chondritique que ne l'est Zr/Hf. Le rapport Zr/Hf croîtrait légèrement en fonction de la concentration (fig. IV.7) (confirmé par les valeurs de W1 et BCR1 de Shima, 1979) et c'est la tangente à l'origine de la "courbe" Zr-Hf qui correspondrait à la valeur chondritique.

La valeur de Zr/Nb (16) proposée par Graham et Mason pour les achondrites et les échantillons lunaires, diffère très significativement de la valeur de ce rapport obtenue à partir des valeurs de normalisation calculées (9,7). On peut toutefois remarquer que les valeurs de normalisation de Nb et Ta ont été calculées à partir d'échantillons présentant une distribution terres rares, plate et un rapport La/Ta égal à 9 (fig. IV.9). Si ce calcul avait été effectué à partir des échantillons présentant un rapport La/Ta égal à 17 (fig. IV.9), la valeur de normalisation trouvée pour Nb aurait été de 0,31. Cette valeur permettrait de trouver le même rapport Zr/Nb que Graham et Mason.

Cette discussion "valeurs de normalisation calculées et concentrations dans les chondrites" peut être résumée de la façon suivante :

a) Les comparaisons valeurs de normalisation calculées et concentrations dans les chondrites ne peuvent être effectuées au mieux qu'à 30% près, compte tenu de la dispersion considérable des données observées dans la littérature. Du fait de cette dispersion (naturelle et analytique) il est très vraisemblable que les valeurs calculées constituent une approche plus précise en tant que "valeur moyenne".

b) Les valeurs de Shima (1979) pour Ti, Zr, Hf, les plus précises, permettent d'observer

ver une différence significative du rapport Zr/Hf dans les chondrites (34.3) comparée aux basaltes terrestres (40). Cette différence peut être expliquée par un léger fractionnement Zr-Hf au cours des processus pétrogenétiques; une légère augmentation du rapport Zr/Hf est observée en fonction des concentrations en ces éléments.

c) Les achondrites et les basaltes lunaires présentent un rapport Zr/Nb égal à 16 (Graham et Mason, 1972) qui correspond à une "valeur de normalisation" calculée relative aux basaltes "appauvris" en éléments très hygromagphiles, (ou plus exactement  $La/Ta = 17$ ) tandis que ce rapport serait de 9,7 pour des "valeurs de normalisation" calculée pour des basaltes à "courbes terres rares" plates ou enrichies en éléments très hygromagphiles.

#### 4 - CLASSEMENT DES ELEMENTS HYGROMAGPHILES ET PROCESSUS PETROGENETIQUES

-----

Du fait des disponibilités analytiques de chaque laboratoire, tel ou tel auteur présente et interprète généralement des résultats qui concernent préférentiellement certains éléments. La classification des éléments proposée suivant leur comportement global permet au moins dans un premier temps, une comparaison de résultats ou d'interprétations, obtenus à partir d'éléments différents, terres rares et éléments hygromagphiles non terres rares, sans attribuer une vertu spéciale à tel ou tel groupe d'éléments.

Dans un deuxième temps, cette classification permet d'éviter certaines erreurs d'interprétation ou certaines maladresses; par exemple, quel que soit le but recherché, porter Sm/La en fonction de Zr/Nb pour une étude de tholéiites (Sun et al., 1979) est redondant en vue d'une interprétation pétrologique; d'après notre classification Zr est très voisin de Sm et Nb très voisin de La.

Cette classification permet également de justifier ou de mieux comprendre certains critères ou observations. Le premier exemple évident concerne Ti. Cet élément dont la concentration exprimée sous forme de  $TiO_2$  est disponible dans toute analyse de majeurs (et mineurs), est l'un des critères retenu pour différencier basaltes tholéiitiques de basaltes alcalins. Ce critère trouve une explication logique, Ti se classant entre Sm et Eu; il correspond tout simplement à une appréciation d'un "enrichissement" en terres rares de numéro atomique voisin de Sm. On conçoit également que ce critère soit ambigu et prête dans certains cas à hésitation, puisque reposant en fait sur la mesure d'une concentration, il ne peut pleinement rendre compte du facteur enrichissement en terres légères qui nécessite au minimum le rapport de deux concentrations.

Le caractère hygromagphile de Ti, et l'assimilation de son comportement à celui de Sm permet de comprendre pourquoi les calculs ne tenant compte que de la cristallisation fractionnée trouvent une solution au niveau des éléments majeurs *excepté Ti* (Bryan and Moore, 1977). Cet élément, qui devrait pourtant rendre compte par  $1/Ti$  du taux de cristallisation, interdit de limiter localement la variabilité des processus magmatiques à la seule cristallisation fractionnée. Processus de mélange, variation de fusion partielle et caractéristique initiale de la source doivent également être envisagés.

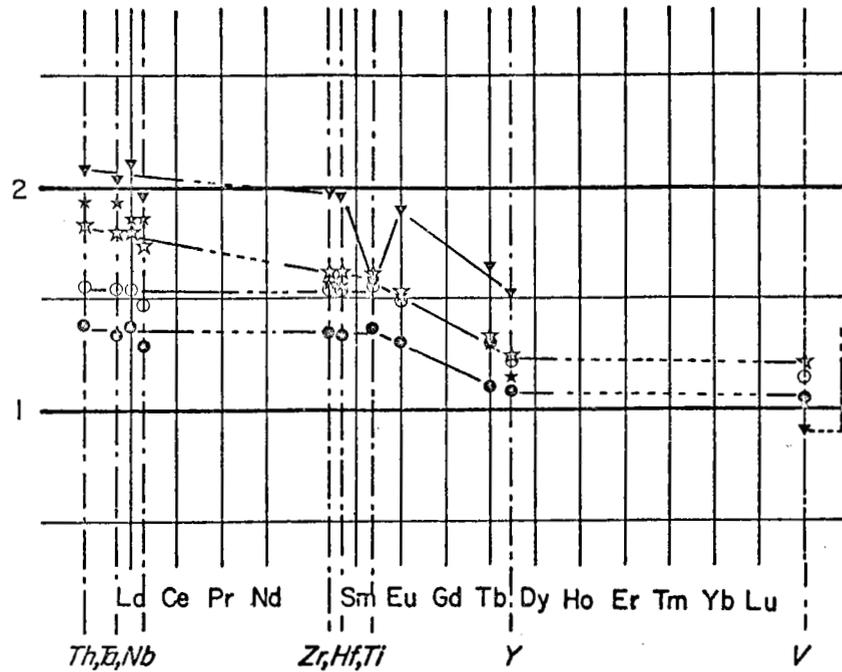


Figure IV.10: Diagramme terres rares "élargi"; anomalies en Ti et V dans les Hawaïtes ( $\nabla$ ) par rapport aux basaltes "alcalins" ( $\star\star$ ) et aux basaltes "transitionnels" ( $\circ$ ●). Echantillons des emperor sea-mounts, (Initial reports leg55 DSDP);  $\nabla$  forage 430A, hawaïtes 5-5 125-129; forage 432A, basalte alcalin 5-1 128-130; forage 433A, basaltes alcalins, moyenne; forage 433C, basaltes "transitionnels", ● 11-1 135-137, ○ 20-2 132-134.

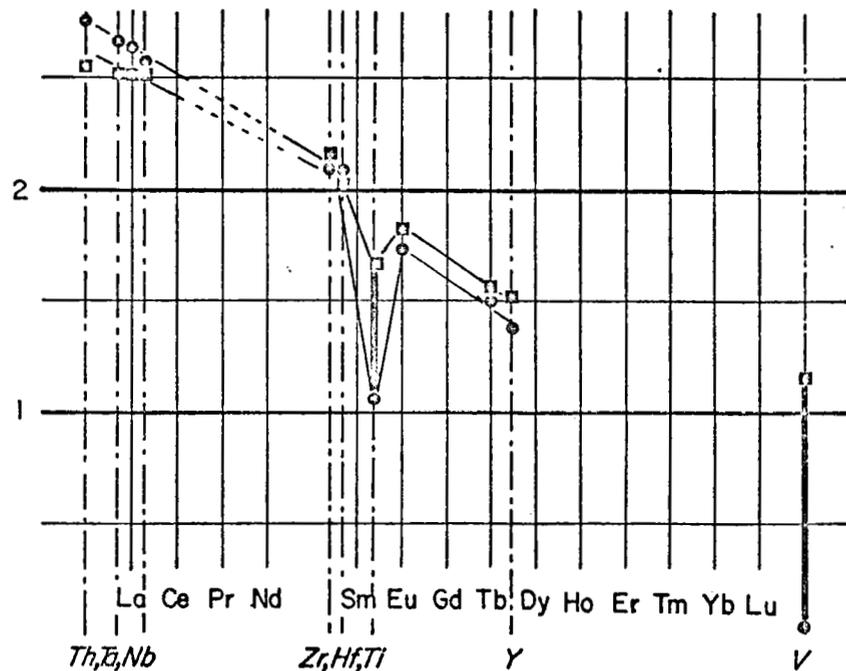


Figure IV.11: Diagramme terres rares "élargi"; anomalies en Ti et V dans des basaltes alcalins des bancs de Joséphine et de Gorrिंगe (GIBRACO).

● G07-06, Joséphine; ■ G06-07, Gorrिंगe.

Il en est de même de l'hypothèse faite par Rhodes et al., (1976) concernant la constance de la concentration de cet élément dans les liquides primaires; ayant la certitude de l'identité de comportement de Sm-Ti, ferait-on l'hypothèse de la concentration constante de Sm dans les liquides primaires ?

Pearce et Cann,(1971) proposent un diagramme triangulaire Zr, Y, Ti, pour apprécier différents types de basaltes. D'après l'ensemble des données présentées, il est très clair que Zr, Ti et Y fractionnent très peu dans les tholéiites; (Zr-Ti) et Y fractionnent (par comparaison à une courbe terres rares plate) dans les basaltes dits "transitionnels" et dans les basaltes alcalins. La figure 10 montre un exemple dans le cas des échantillons obtenus sur les "Empereurs"Sea Mount du Pacifique (leg 55 du Glomar Challenger). Le diagramme proposé par Pearce et Cann (1971) correspondrait donc simplement de ce point de vue, à la représentation de ce fractionnement; encore convient-il de remarquer que pour traduire des différences, deux éléments suffiraient Zr ou Ti et Y. Pourtant, la représentation suivant un diagramme "terres rares élargi" est plus riche d'enseignement. En effet, de la même façon qu'elle peut montrer le comportement anormal de Eu, du fait de la possibilité de son degré d'oxydation 2, cette représentation peut montrer le comportement "anormal" d'un ou plusieurs éléments; par exemple, à partir d'un certain degré de différenciation, magnétite ou ilménite peuvent cristalliser et fractionner, Ti et V vis à vis des autres éléments hygromagmaphiles; un tel exemple est présenté figure IV.10, pour les hawaïites des "empereurs Sea Mounts" et pour les échantillons obtenus pendant la campagne GIBRACO sur les bancs de Gorringer et de Joséphine(fig.IV.11). Ainsi, par rapport au diagramme triangulaire, la représentation terres rares "élargie" permet d'une part de se rendre compte du "fractionnement terres rares", mais aussi d'autre part du fractionnement dû aux minéraux opaques. Les données peuvent ainsi plus facilement être interprétées soit au niveau de la caractérisation de la source ou des processus de fusion, soit au niveau des processus de cristallisation.

Les données publiées jusqu'ici dans la littérature permettent de se rendre compte qu'il existe une certaine "covariance" Ti-V, sans qu'il soit possible de dégager une loi simple. Le classement des éléments hygromagmaphiles et le diagramme terres rares élargi permettent par comparaison de rendre compte de cette observation; "covariance" et fractionnement Ti-V sont tout à fait analogues à ceux du couple Sm-Lu.

Enfin, bien que Sc présente une structure électronique très voisine de celle des terres rares, son comportement en est différent; dans l'ensemble des basaltes analysés, la concentration de cet élément ne varie guère qu'entre 30 et 40 ppm. La classification proposée rend compte de ces résultats, ainsi que de la valeur du paramètre  $\phi$  la moins élevée des éléments hygromagmaphiles; le coefficient de partage "global" de cet élément est très vraisemblablement voisin de l'unité.

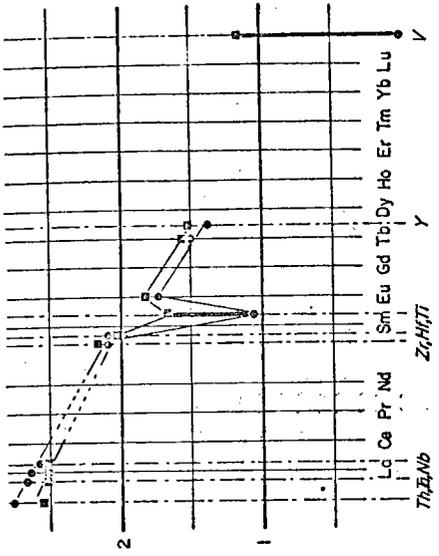


Figure IV.14 : Gorringe, Joséphine

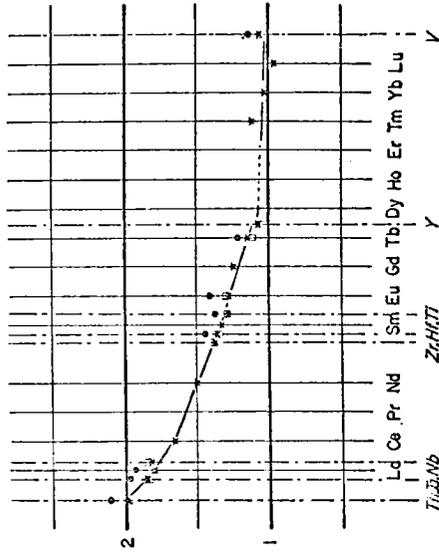


Figure IV.13 : 45°N

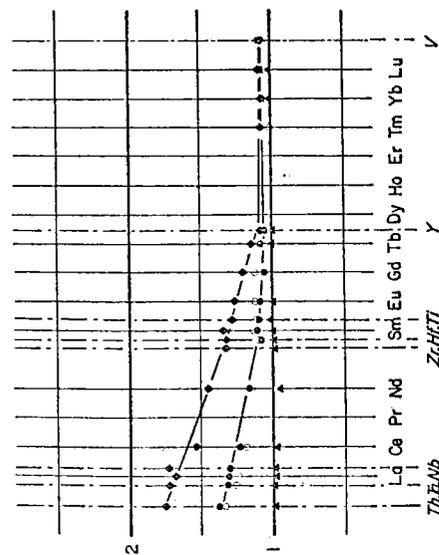


Figure IV.12 : FAMOUS

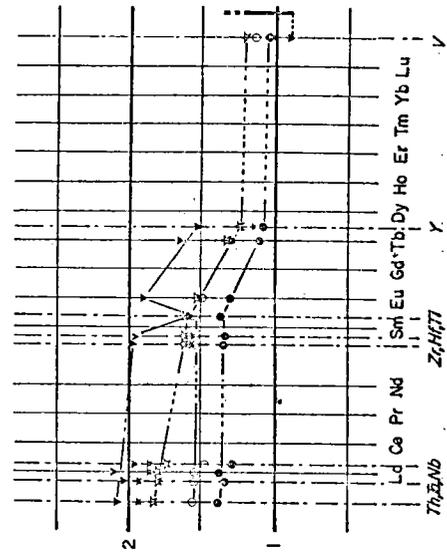


Figure IV.16 : Empereur Sea-Mounts: (pacifique)

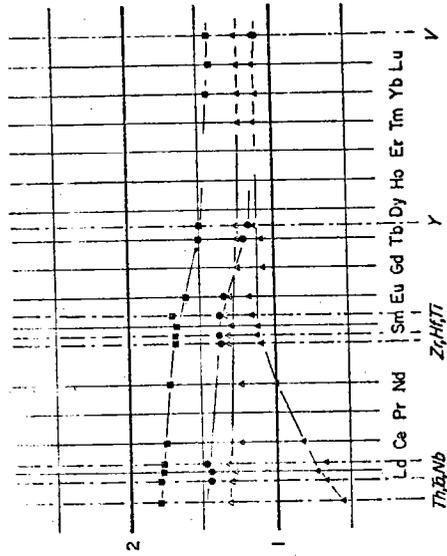


Figure IV.15 : Reykjanes

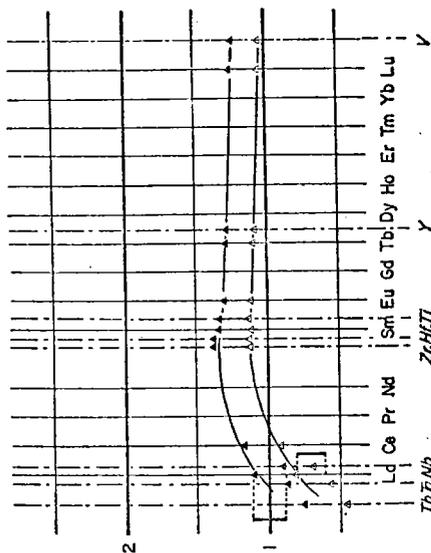


Figure IV.17 : 22°N

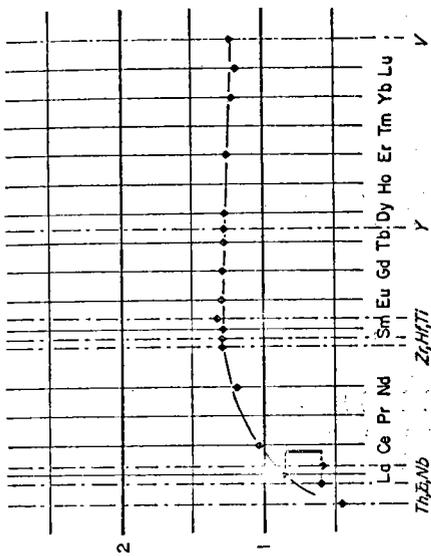


Figure IV.18 : 25°N

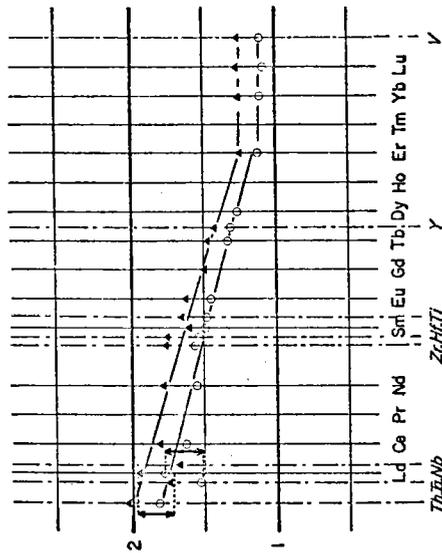


Figure IV.19 : Walvis Ridge  
Les données Terres rares sont de Montigny, 1975.

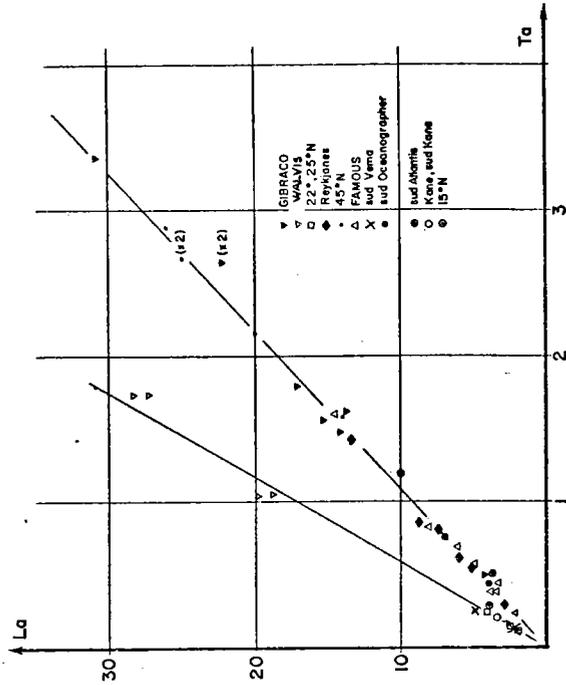


Figure IV.20 : La-Ta pour l'ensemble des sites étudiés

## 5- ANOMALIE Ta/La (ou Nb/La); PROCESSUS PETROGENETIQUE OU MATERIAUX SOURCES ?

-----

L'utilisation du traceur naturel  $^{143}\text{Nd}/^{146}\text{Nd}$  (ou  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ) repose dans son principe sur la notion de fractionnement des terres rares (Richard et al., 1976; De Paolo et Wasserbury, 1876; O'Nions et al., 1977).

Compte tenu de la période du  $^{147}\text{Sm}$  ( $1.06 \cdot 10^{11}$  ans) qui par émission  $\alpha$  donne naissance au  $^{143}\text{Nd}$ , les différences de rapports isotopiques  $^{143}\text{Nd}/^{146}\text{Nd}$  (ou  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ) ne peuvent s'expliquer, en supposant une composition originelle du manteau traduite pour Sm et Nd, par un rapport chondritique à un facteur près, que par un (ou plusieurs) événement antérieur à 500 millions d'années (modification de  $^{143}\text{Nd}/^{146}\text{Nd}$  de  $2 \cdot 10^{-4}$ ). C'est en définitive grâce à cette information qu'on peut affirmer qu'une distribution de terres rares mesurée dans des basaltes, peut être caractéristique d'une source. En effet, si un processus de fusion partielle suivant un modèle de batch partial melting est peu capable de fractionner les éléments hygromagnaphiles, notamment pour des taux de fusion plus grand que 5%, il n'en reste pas moins qu'un tel processus envisagé en deux ou plusieurs étapes (Bougault et al., 1979) ou suivant un modèle "dynamic melting" (Langmuir et al.) si une quantité finie de liquide reste en équilibre avec le solide § I.4, est parfaitement capable de fractionner ces éléments suivant leurs coefficients de partage. Hormis informations, type  $^{143}\text{Nd}/^{146}\text{Nd}$  (ou rapport isotopique de Sr et de Pb), le fractionnement des terres rares peut trouver son explication soit par le type de modèle de fusion envisagé (processus moderne), soit par une caractéristique initiale du matériau source (impliquant un processus ancien) ou par la combinaison des deux. Du fait de la variation régulière des propriétés des terres rares, il n'y a pas d'anomalie possible (si ce n'est  $^{143}\text{Nd}/^{146}\text{Nd}$ ) permettant de trancher entre contribution moderne (processus de fusion) ou ancienne (caractéristique de la source). A cet égard, le fait de pouvoir inclure dans le diagramme terres rares des éléments ayant des propriétés très voisines mais qui néanmoins présentent certaines différences quant à leurs charges ioniques ou à leurs rayons ioniques, peut être utile pour marquer certaines "discontinuités" ou "anomalies" attribuables soit à un processus magmatique, soit à une qualité du matériau source. Un exemple a déjà été donné §IV.4, à propos de Ti et V, anomalie expliquée par le processus de cristallisation de minéraux opaques. A cet égard, les résultats (Nb, Ta)-La semblent très intéressants.

Il a en effet été observé, qu'indépendamment de l'enrichissement en terres légères, les échantillons provenant de l'Atlantique, de la zone de fracture Oceanographer ( $35^\circ\text{N}$ ), de la zone FAMOUS (incluant les forages effectués à la même latitude  $36^\circ\text{N}$  des legs 37 et 49 du Glomar Challenger), de la zone du point triple (campagne GIBRACO) de  $45^\circ\text{N}$  et des forages perpendiculaires à Reykjanes ridge et dans le Pacifique des "Empereurs Sea Mounts" (leg 55), présentent le même rapport La/Ta (Bougault et al., 1979 b, c; Wood et al., 1979 a,b; Cambon et al., in press) (fig. IV-12, IV-13, IV-14, IV-15, IV-16). Par contre, pour les échantillons provenant de  $22^\circ\text{N}$  croûte jeune (leg 45, 46; Bougault et al., 1979 b,d) et  $25^\circ\text{N}$  croûte vieille (leg 51,52; Joron et al. in press), ce rapport est différent (fig. IV-17, IV-18); ces échantillons correspondent aux basaltes océaniques dits typiquement appauvris. Pour les échantillons de Walvis Ridge (fig. IV-19) qui sont au contraire enrichis en terres légères, la valeur de ce rapport La/Ta est voisine de celle des échantillons appauvris. L'ensemble de ces résultats est résumé figure IV-20.

$P = D_0 = 0.02$		$F_2 = 0.05$			
$P = D_0 = 0.03$					
$f$	0	0.005	0.025	0.05	
$F_1$					
0	18.5 16.38				
0.005		18.74 16.30			"batch" = 14.49 12.74
0.025	10.14 9.96	11.51 11.7	17.3 14.89		
0.04	5.29 7.56	8.21 9.3	14.54 12.95		
0.05	4.05 6.36	6.66 8.16	12.99 11.83	14.49 12.74	

Tableau IV. 3a: Fusion partielle; rapports concentration dans le liquide / concentration dans le solide initial suivant un modèle où une quantité finie de liquide reste en équilibre avec le solide. Le rapport est calculé pour un liquide "regroupé" homogène des liquides produits entre le taux de fusion  $F_1$  et  $F_2$  (cf. § II. ). Deux éléments à faibles coefficients de partage voisins sont considérés (les valeurs des rapports correspondants sont indiqués l'un en dessous de l'autre pour chaque valeur de  $F_1$ ).

$P = D_0 = 0.2$		$F_2 = 0.05$			
$f$	0	0.005	0.025	0.05	
$F_1$					
0	4.52				
0.005	4.47	4.49			
0.025	4.29	4.3	4.34		"batch" = 4.17
0.04	4.16	4.18	4.23		
0.05	4.07	4.09	4.15	4.17	

Tableau IV. 3b: Mêmes informations qu'en IV.3a pour un coefficient de partage de 0.2

$$P = D_0 = 0.02$$

$$P = D_0 = 0.03$$

$$F_2 = 0.20$$

f	0	0.005	0.025	0.05
$F_1$				
0	5			
	5			
0.005	3.99	5.15		
	4.33	5.14		
0.025	1.61	2.56	5.68	
	2.45	3.21	5.59	
0.05	0.51	1.07	3.74	6
	1.2	1.79	4.04	5.80
0.10	0.051	0.19	1.68	3.8
	0.29	0.57	2.16	3.94
0.15	0.006	0.038	0.81	2.49
	0.077	0.20	1.21	2.74
0.20	0.001	0.01	0.42	1.69
	0.025	0.079	0.72	1.97

"batch" = 4.63  
4.47

Tableau IV. 3c: Mêmes informations que tableau IV.3a pour  $F_2 = 0.20$

$$P = D_0 = 0.2$$

$$F_2 = 0.20$$

f	0	0.005	0.025	0.05
$F_1$	3.36			
0	3.36			
0.005	3.32	3.36		
0.025	3.16	3.20	3.33	
0.05	2.97	3.02	3.16	3.28
0.10	2.63	2.68	2.85	2.99
0.15	2.32	2.38	2.59	2.74
0.20	2.05	2.11	2.31	2.50

"batch" = 2.77

Tableau IV. 3d: Mêmes informations que tableau IV.3a pour  $F_2 = 0.20$ .

Ces deux valeurs du rapport La/Ta ou Nb/Ta étaient observables sur trois diagrammes "élargis" présentés par Sun et Al. (1979). Les données de ces auteurs et celles présentées ici sont actuellement les seules données disponibles. La dispersion de ces rapports autour de chacune des deux valeurs peut être attribuée aux erreurs analytiques et à un léger fractionnement de ces éléments. Il sera nécessaire d'obtenir d'autres données, correspondant notamment à des contextes géologiques différents, pour affirmer que Ta/La (ou Nb/La) ne possède que deux valeurs singulières dans les basaltes. Néanmoins, la diversité des types de basaltes (tholéiites typiquement "appauvries", tholéiites "transitionnelles", basaltes alcalins) et des lieux d'échantillonnage (ride médio-océanique, sea-mounts, ride asismique) permettent de penser que le rapport Ta/La est caractérisé par deux valeurs en milieu océanique.

Indépendamment des "anomalies" de comportement de certains éléments signalées ci-dessus, expliquer les diagrammes terres rares "élargis" est équivalent à expliquer les diagrammes terres rares. On n'a pas ici la prétention d'expliquer ces diagrammes d'une façon univoque (variations des coefficients de partage par la proportion des minéraux du matériau source et de la proportion des minéraux fondus, concentrations dans le matériau source, processus de fusion); on se propose plus simplement de rechercher l'origine possible des deux valeurs du rapport Ta/La (ou Nb/La) observées.

a - Processus de fusion partielle - A partir d'un matériau source donné, et en supposant les coefficients de partage globaux de Ta (ou Nb) voisins de ceux de La, est-il possible de fractionner Ta et La par un processus de fusion partielle ?

Pour obtenir un tel fractionnement pour des éléments à coefficients de partage voisins, il est nécessaire d'envisager le processus de fusion ayant le maximum d'efficacité, c'est-à-dire un processus de fusion fractionnée (seul un élément de liquide restant en équilibre avec le solide) (§ I.4). Le tableau 3 représente la valeur de  $CL/CS_0$  pour différentes valeurs de  $f$  (fraction de liquide en équilibre avec le solide) pour des liquides "regroupés" entre le taux de fusion  $F1$  et  $F2$ . Pour deux éléments à coefficients de partage globaux de l'ordre de 0.02, un faible taux de fusion partielle (5%) est insuffisant pour obtenir un fractionnement d'un facteur 2 (tableau 3). Pour un taux de fusion partielle de 20%, un tel fractionnement est possible; il serait même possible pour des différences (0.02 et 0.03 dans l'exemple choisi) plus faibles entre les coefficients de partage. On observe néanmoins que pour obtenir un tel fractionnement entre éléments à coefficients de partage voisins, on obtient un fractionnement considérable terres rares légères ( $D_0 = 0.02$ ) - terres rares lourdes ( $D_0 = 0.2$ ) (appauvrissement) jamais observé dans les basaltes. De plus le rapport Ta/La pourrait prendre différentes valeurs et non pas les deux valeurs singulières observées. En outre, la même valeur Ta/La (17) est observée aussi bien pour des distributions appauvries (22°N, fig. 17) qu'enrichies (Walvis Ridge, fig. 19) en terres légères.

Il n'est donc pas possible de rendre compte de ces deux valeurs singulières de Ta/La (ou Nb/La) par variation d'un taux de fusion partielle.

b - Coefficients de partage - Il est possible d'admettre qu'à une valeur du rapport Ta/La correspond un coefficient de partage global (une composition minéralogique du matériau

Tableau IV.4

	Nb/Ta	Zr/Hf	Y/Tb
Basaltes cette étude	17	40	46
Chondrites	14; 17*	34,3**	42,5***

\* Graham and Mason (1972)

\*\* Shima (1979)

\*\*\* Frey et al (1968)

source) et qu'à l'autre rapport correspondrait un autre coefficient de partage global (une autre composition minéralogique du matériau source). Suivant cette hypothèse, nous serions conduits à attribuer dans le cas A, basaltes appauvris en terres légères (fig. 17) au Ta, Nb un coefficient de partage global voisin de celui de Th; mais en même temps, dans le cas B, basaltes enrichis en terres légères de Walvis, il faudrait attribuer à Ta, Nb un coefficient de partage correspondant à un numéro atomique supérieur à celui du La (fig. 19). L'hypothèse suivant laquelle les deux rapports La/Ta correspondent à deux coefficients de partage globaux différents, ne peut donc rendre compte des résultats observés.

c - Source - Si variation de taux de fusion ou (et) différence entre coefficients de partage Ta (ou Nb) et La ne permettent pas d'expliquer les deux valeurs singulières obtenues pour Ta/La, il ne reste qu'une possibilité d'interprétation des deux rapports observés : une hétérogénéité en concentrations initiales de la source.

Une deuxième manière de présenter cette démonstration consiste à écrire le rapport de deux éléments à faible coefficient de partage au cours de la fusion partielle suivant une hypothèse de batch melting (Bougault et al., 1979; Joron et al., 1978):

$$\frac{CL_1}{CL_2} = \frac{CSo_1}{CSo_2} \frac{Do_1}{Do_2} \frac{Do_2 + F}{Do_1 + F}$$

Do<sub>1</sub> et Do<sub>2</sub> étant voisins, des valeurs différentes de CL<sub>1</sub>/CL<sub>2</sub> doivent traduire des valeurs différentes initiales du matériau source initial. Observant que le rapport Ta/La reste constant alors que le rapport de deux éléments à coefficients de partage différents varie très significativement (Ta/Zr, fig. IV-12, IV-13) on conclue que les deux rapports La/La observés traduisent des caractéristiques différentes de la source initiale.

#### 6 - HETEROGENEITE DU MANTEAU - (type 1, 2, 3)

Une séance de la Royal Society sur ce thème s'est tenue à Londres en Décembre 78. Un article d'Allègre et al. à paraître dans les Proceedings de la Royal Society relatifs à cette séance traite de l'ensemble de ce sujet - évidences et interprétations -.

Les évidences observées à partir des basaltes, produits de fusion partielle d'une partie du manteau, concernent :

- 1) les rapports isotopiques de Sr, Pb et Nd, non susceptibles de modification en fonction du temps dans les basaltes océaniques du fait de la constante de temps des éléments pères,
- 2) les éléments hygromagmaphiles.

En ce qui concerne les éléments hygromagmaphiles et en fonction des résultats décrits au cours des paragraphes précédents, leur classification, géochimie comparée des éléments non terres rares vis à vis des terres rares, on se propose d'examiner l'interprétation de leur comportement en terme d'hétérogénéité du manteau.

A- Les éléments hygromagmaphiles qui ne fractionnent pas ou qui fractionnent peu. Il s'agit des couples Nb/Ta, Zr/Hf et Y/Tb. Les valeurs des rapports de concentrations correspondant à ces trois couples d'éléments sont très voisines des rapports chondritiques. On notera toutefois que les rapports Y/Tb et Zr/Hf mesurés à partir des basaltes sont légèrement supérieurs aux rapports mesurés dans les chondrites (Tableau 4). Le rapport Nb/Ta ne peut être comparé qu'aux deux valeurs proposées par Graham et Mason (1972). Les différences entre rapports moyens dans les basaltes et rapports dans les chondrites doivent être attribuées à un léger fractionnement pour chaque couple considéré. La figure 7 montrait en effet un accroissement de la valeur Zr/Hf en fonction de la concentration; pour les échantillons basaltiques du banc d'Ampère (tab. V.2) le fractionnement Zr/Hf est le plus important (terres rares légères très enrichies); c'est également le cas pour les échantillons des forages 410 et 410 A (45°N)(tab. V.20,21), et du banc de Gorringe (tab. V.2).

On considèrera que les rapports Nb/Ta, Zr/Hf et Y/Tb pratiquement constants pour l'ensemble des basaltes étudiés (exception faite des sites mentionnés ci-dessus), et voisins des valeurs chondritiques apportent leur contribution à l'hypothèse de la composition initiale chondritique de la terre. Les différences observées pour ces rapports sont difficilement interprétables en terme d'hétérogénéité du manteau pour des raisons analytiques. Il faudrait, pour obtenir une précision suffisante sur ces rapports, recourir à une technique d'analyse par dilution isotopique du type de celle utilisée par Shima (1979).

B- L'anomalie Ta/La. Alors que Ta et La se comportent pratiquement d'une façon identique pour la plupart des échantillons étudiés, il a été observé une anomalie pour les échantillons prélevés à 22°N (site 395 et 396), à 25°N croûte de 110 millions d'années, les échantillons prélevés au voisinage de zone de fracture KANE (~20°N, les échantillons de Horse Shoe rise et ceux de Walvis ridge. L'ensemble de ces données se trouve résumé figure 21. Le mode de représentation utilisé dans cette figure, Log (rapports d'éléments normés aux chondrites) en fonction du Log (rapports d'un autre couple d'éléments normés aux chondrites) permet d'observer l'écart des compositions des échantillons par rapport aux chondrites; l'origine correspond aux valeurs chondritiques.

Log (Ta/La normé aux chondrites) est porté volontairement en fonction du logarithme d'un rapport normé d'éléments (Hf et La), qui fractionnent. On observe les deux valeurs Ta/Hf. Cette anomalie de comportement de Ta (et Nb) est considérée comme une hétérogénéité de type 2 (une hétérogénéité de type 1 étant relative à la variation d'un rapport isotopique Sr, Nd ou Pb): elle est indépendante de la notion d'enrichissement ou d'appauvrissement en terres rares légères (rapport Hf/La). Cette "anomalie" définit une hétérogénéité du manteau "régionale". Tous les échantillons prélevés au niveau du point Triple (GIBRACO, DR 17, 19 et 20, tableau V.2) de la zone FAMOUS (tableau V.3), zone de fracture Oceanographer (tableau V.29), et des sites de forage situés dans cette zone (jusque ~15 millions d'années), présentent le même rapport Ta/La. Tous les échantillons prélevés au voisinage de 20°N, zone de fracture KANE (tableau V.31), dorsale sud Kane (tableau V.32), 22°N (site 395 et 396 symétriques par rapport à la dorsale, ~ 5 et 7 millions d'années, tab. V.10 à 16) présentent une autre valeur. Il est intéressant de constater que les échantillons prélevés sur horse Shoe Rise (Gibraco DR 11, 12, tableau V.2) présentent la même valeur qu'à 20°N; il en est de même au niveau de la ride Walvis (tableau V.1).

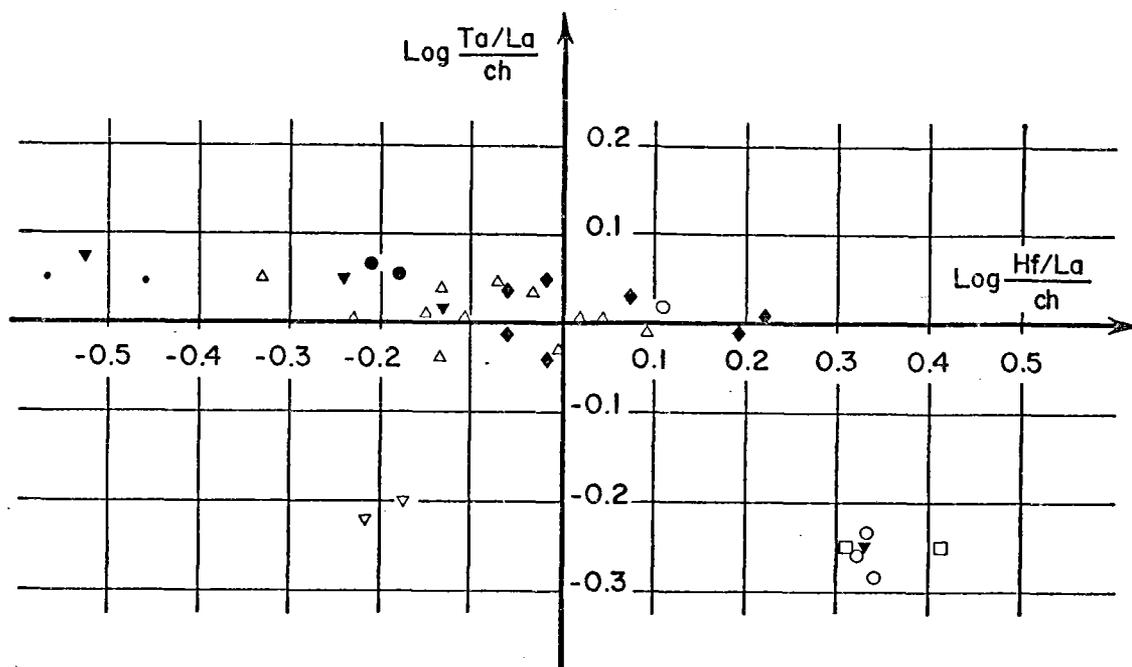


Figure IV.21:  $\log(\text{Ta/La}, \text{normé})$  en fonction de  $\log(\text{Hf/La}, \text{normé})$   
 • 45°N; ▼ "GIBRACO"; ▽ Walvis; △ sites 411, 412, 413, FAMOUS (36°N)  
 ◆ Reykjanes (63°N); ● sud Oceanographer (35°N) et 15°N;  
 □ sites 395, 396 (22°N) et 417, 418 (25°N, 110my.)  
 ○ Kane, sud Kane (24°N), sud Atlantis (30°N) et sud Vema (9°N)

C- Les "distributions terres rares" - La notion de distribution terres rares doit être élargie à la distribution des éléments hygromagmaphiles plus générale. La figure 22 utilisant le même mode de représentation que la figure 21, permettant de visualiser l'écart de la composition d'un échantillon par rapport à la composition chondritique, résume l'ensemble des données vis à vis du fractionnement des éléments hygromagmaphiles [ $\log(\text{La/Th}, \text{normé})$  en fonction de  $\log(\text{Hf/Th}, \text{normé})$ ]. Comparativement à l'"anomalie" Ta, Nb par rapport aux distributions terres rares (fig. 20), le fractionnement de ce qu'on peut considérer comme deux "terres rares légères" exprimé en fonction du fractionnement d'une "terre rare lourde" et d'une "terre rare légère" présente une continuité. Dans le quadrant ++ (les deux logs positifs) figurent les tholéiites classiques dites "appauvries"; dans le quadrant -- (les deux logs négatifs) se situent les basaltes alcalins; au voisinage de l'origine se situent les tholéiites dites transitionnelles.

Du fait de cette relative continuité, l'interprétation en terme de caractéristique du

matériau source ou en fonction de l'"amplitude" des processus pétrogénétiques est plus délicate que pour l'"anomalie" Ta, Nb et nécessite une approche par modèles. Il s'agit de faire la différence entre caractéristique du matériau source ou fractionnement ancien et processus pétrogénétique moderne.

On remarquera tout d'abord qu'en utilisant un modèle simple de batch partial melting (cf. § I.4) on ne peut obtenir à partir d'une source de composition chondritique, qu'une distribution enrichie en éléments à faibles coefficients de partage ou à la limite "plate" pour des taux de fusion importants (fig. 23). De tels échantillons seraient situés dans le quadrant -- ou, dans ce quadrant s'approchant de l'origine; il n'existerait pas d'échantillons situés dans le quadrant ++. Nous sommes alors obligés d'admettre que les échantillons situés dans le quadrant ++ proviennent d'une source préalablement "appauvrie" en éléments à faibles coefficients de partage (Gast, 1968); une source relative aux basaltes tholéitiques, une autre pour les basaltes alcalins. Néanmoins, la continuité observée figure 22, pose un problème : faut-il admettre autant de sources différentes qu'il existe des rapports Hf/Th différents ou faut-il envisager un nombre de sources plus réduit, des processus de mélange et une contribution de taux de fusion partiel différents ?

Un modèle de "mantle mixing" à partir de deux sources (Schilling, 1975), une source à caractère "appauvri" (conduisant à des tholéiites "typiques") et une source "enrichie" (conduisant à des basaltes alcalins), doit être écarté. Pour les échantillons de Reykjanes Ridge ou FAMOUS, la valeur de La/Ta devrait être intermédiaire entre les valeurs trouvées pour des basaltes alcalins et des tholéiites "appauvries"; en d'autres termes, la figure 21 représentant  $\log(Ta/La)$  en fonction de  $\log(Hf/La)$  devrait présenter le même type de continuité que la figure 22. Si un ou deux types de sources ne permettent pas d'expliquer les valeurs des rapports d'éléments hygromagphiles, faut-il considérer que chaque valeur d'un rapport (ou chaque distribution terres rares "élargies") est caractéristique d'un domaine du manteau ayant donné naissance aux échantillons basaltiques étudiés ? La valeur d'un rapport type Hf/La (ou Zr/La) résulte vraisemblablement de la contribution des trois grandeurs intensives ou extensives; une grandeur intensive : caractéristique de la source et de son histoire; deux grandeurs extensives : le degré de fusion partielle et le mélange de deux magmas. Il s'agit de déterminer le facteur prépondérant.

Si l'on considère que dans une zone donnée, des basaltes peuvent être formés à partir de taux de fusion partielle différents à partir d'une même source, quelle peut en être l'influence sur un rapport du type Hf/La ? En prenant un taux de fusion partielle variant entre 10 et 20%, des coefficients de partage globaux moyens de 0,2 et 0,02 et un processus de fusion type "batch partial melting" le rapport du type Hf/La varie de 0,42 à 0,60, soit un facteur 1,42 correspondant à une valeur du logarithme de 0,15. Cet ordre de grandeur est compatible avec les variations Hf/La observées dans la zone FAMOUS ou dans les sites forés à proximité pour lesquelles les rapports isotopiques de Sr ou de Pb sont constants. Un modèle de fusion fractionnée peut rendre compte de la dispersion d'un rapport Hf/La, mais on notera que le fractionnement possible suivant un tel modèle est beaucoup trop important (surtout pour les éléments à très faibles coefficients de partage) et non compatible avec la dispersion observée en un site donné. Un même modèle ne peut donc rendre compte à la fois de la dispersion d'un rapport Hf/La à l'échelle d'un site et à l'é-

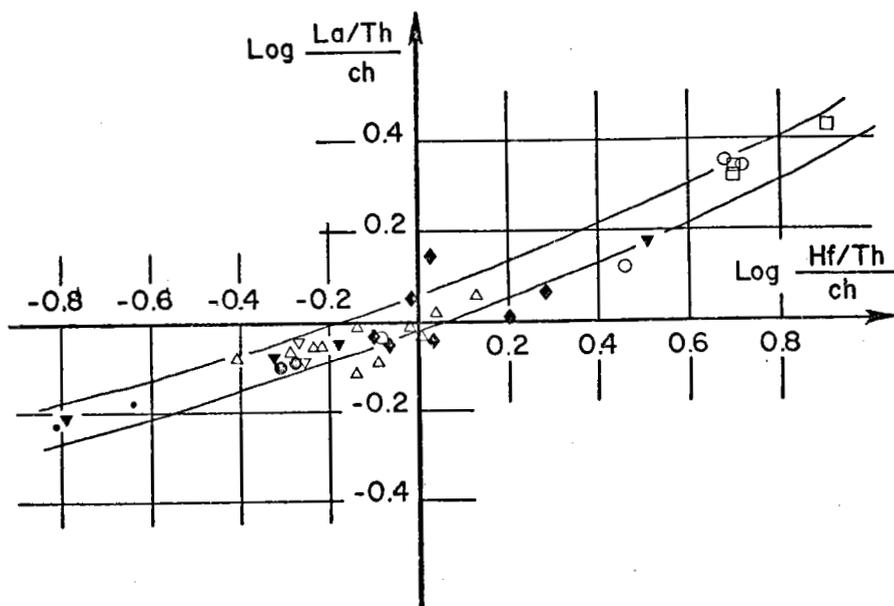


Figure IV.22:  $\log(\text{La/Th, normé})$  en fonction de  $\log(\text{Hf/Th, normé})$ .  
 • 45°N; ▾ "GIBRACO"; ▽ Walis; △ sites 411, 412, 413, FAMOUS (36°N)  
 ◆ Reykjanes (63°N); ● sud Oceanographer (35°N) et 15°N;  
 □ sites 395, 396 (22°N) et 417, 418 (25°N, 110my.)  
 ○ Kane et sud Kane (24°N), sud Atlantis (30°N) et sud Vema (9°N)

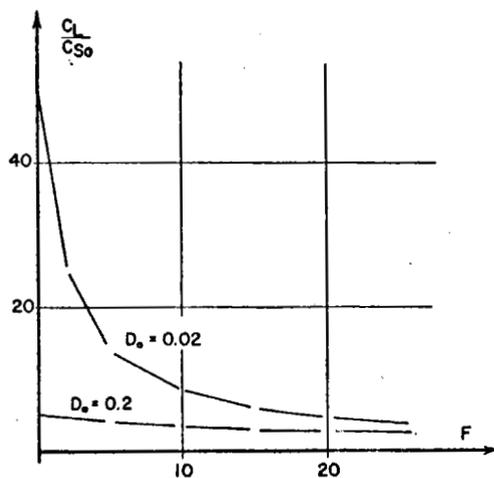


Figure IV.23: Evolution de la concentration dans le liquide d'éléments de coefficients de partage 0.02 et 0.2 suivant un modèle "batch partial melting".

Tableau IV.5

	Ta/La	Hf/La	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\Delta\text{Nd}$
	Ch	Ch			
1 22° N (leg 45, 46)					
KANE, Sud KANE (VEMA)	0.56	2.04-2.6	18.0	0.7025	+ 13
Sud VEMA (VEMA)	0.49	2.14			
Horse Shoe Rise (GIBRACO)	0.56	2.09			
2 Sud OCEANOGRAPHER (VEMA)	1.09	.77-1.4			
FAMOUS, Leg 37	1.05	0.6 -1.26	18.8	0.7028	+ 10
Point Triple (GIBRACO)	1.07	0.6 -0.76			
15° N (VEMA)	1.17	0.63			
3 45° N (Leg 49)	1.1	0.28,0.35	19.6	0.7033	+ 6
Ampère (GIBRACO)	1.15	0.3			
Goringe (GIBRACO)	1.15	0.29			
4 Rey Kjanes (Leg 49)	1.05	0.87-1.58	18.6	0.7030	
5 Walvis Ridge (Walda)	0.62	0.63			

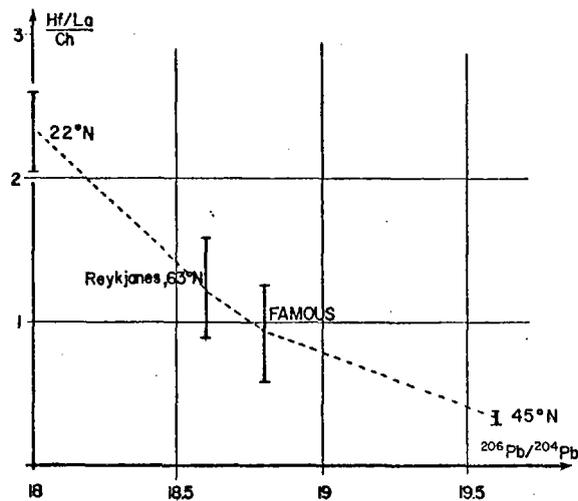


Figure IV.24: Variation de Hf/La normé en fonction de  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (d'après Allègre et al., in press).

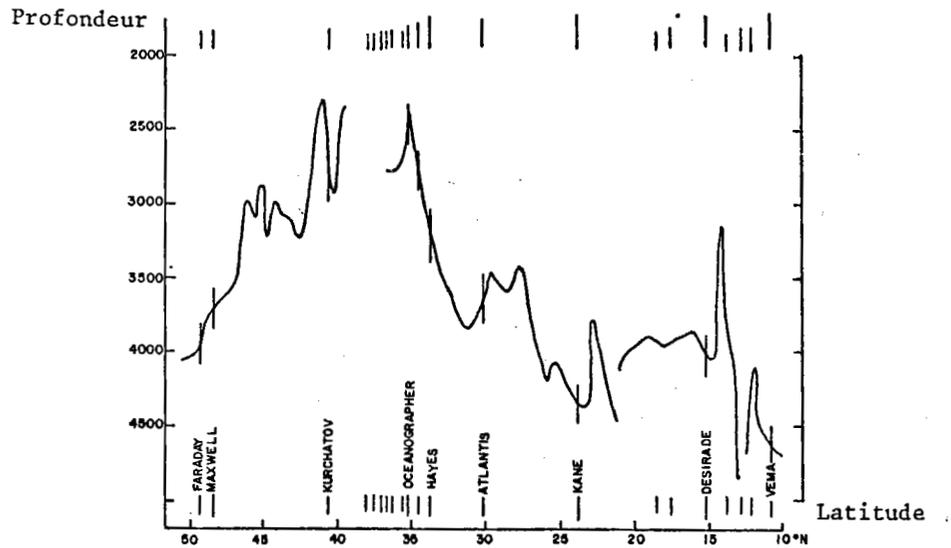
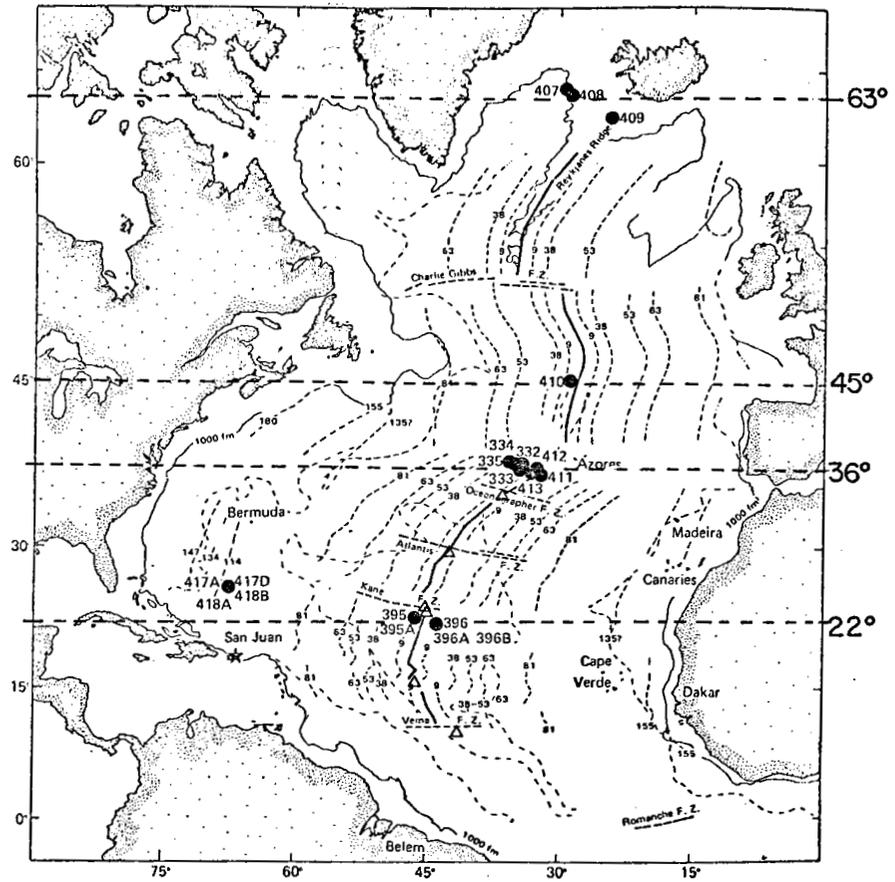


Figure IV.25: Position des différents sites de forage ● ou de dragage Δ et variation de profondeur à l'axe de la vallée du rift (âge zéro) d'après S. Le Douaran (1979).

chelle de l'Atlantique nord. Un processus de mélange de magma, en conservant ces mêmes hypothèses pour la fusion, conduirait nécessairement à des valeurs intermédiaires du rapport Hf/La. Si l'on admet un modèle de batch partial melting, à une variation d'ordre de grandeur de 0,15 près,  $\text{Log (Hf/La)}$  peut donc être considéré comme étant caractéristique de la source. Cette conclusion est confirmée par la corrélation qui existe entre Hf/Th et  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  présentée figure 24 (Allègre et al., in press). On considèrera ce type d'hétérogénéité, mis en évidence par le fractionnement de terres rares ou d'éléments hygromagphiles qui suivent le même comportement que les terres rares (notion de fractionnement présentant une continuité, fig. 22), comme une hétérogénéité de type 3.

## 7 - NOTION D'HETEROGENEITE REGIONALE

En fonction des trois types d'hétérogénéité définis, est-il possible de définir une "échelle" d'hétérogénéité du manteau. Tant que l'explication de la nature de ces hétérogénéités (hétérogénéité initiale, évènement catastrophique, cellules de convection dans le manteau, stratification du manteau) reste largement fonction d'hypothèses, il convient de rester proche des données; c'est la raison pour laquelle les types d'hétérogénéité 1, 2 et 3 ont été définis à partir des rapports isotopiques ou rapports d'éléments ayant permis d'approcher ces hétérogénéités. Suivant cette approche, une homogénéité vis à vis d'un type n'exclue pas une hétérogénéité vis à vis d'un autre type. Un domaine homogène pourra être défini lorsque les types 1, 2 et 3 présenteront les mêmes caractéristiques dans ce domaine.

Les domaines définis ci-après reposent essentiellement sur les données présentées dans ce mémoire, type 2 et 3; une information sur le type 1 sera également indiquée. Le tableau IV.5 définit cinq types de sources mantelliques. Le premier type correspond aux tholéiites océaniques "appauvries" traduit par une valeur élevée du rapport Hf/La et un rapport Ta/La normé de l'ordre de 0,5. Corrélativement ce type de source est caractérisé par des rapports  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  et  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  faibles. Le deuxième type correspond à des basaltes tholéiitiques "transitionnels"; le rapport Ta/La normé est de l'ordre de 1 et le rapport Hf/La normé compris entre 0,6 et 1,4 est situé autour de la valeur chondritique. Les valeurs de  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  et de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  sont respectivement de l'ordre de 18.8 et 0.7028. Régionalement, les sources 1 et 2 sont très largement représentées d'une part à 22°N par les sites 395 et 396 (symétriques par rapport à la dorsale) les échantillons de la zone de fracture KANE et SUD KANE et les échantillons des sites 417-418 à 25°N, 110 millions d'années, d'autre part entre la zone de fracture Oceanographer et le point Triple et les sites du leg 37 et du leg 49 voisins de la zone FAMOUS (fig. 25). Cette homogénéité au niveau régional signifie soit que le manteau supérieur présente un caractère d'homogénéité au niveau régional, soit que dans une région une partie préférentielle du manteau est "échantillonnée" (dans l'hypothèse d'une stratification du manteau). On remarquera que la profondeur moyenne du Rift au niveau de la zone FAMOUS et la profondeur du Rift au niveau de 22°N sont différentes de 2000 m (S. Le Douaran, 1979). Une telle différence ne peut trouver son origine dans l'épaisseur de la croûte océanique (couche 2) et doit nécessairement faire intervenir le manteau.

Le troisième type de source est relatif aux basaltes alcalins caractérisés par le même rapport Ta/La que les basaltes transitionnels mais par un rapport Hf/La plus petit (enrichissement en terres rares légères). Les valeurs isotopiques en Sr et en Pb sont les plus élevées.

Bien que présentant des valeurs Ta/La et Hf/La proches des basaltes "transitionnels" définissant une source de type 2, on a réservé un type de source différent pour les basaltes de Reykjanes. La raison réside dans le fait que la courbe terre rare "élargie" présente un point d'inflexion et témoigne vraisemblablement d'une histoire plus complexe.

Enfin, le domaine type 5 est relatif à la Walvis Ridge pour lequel le rapport Ta/La est voisin des basaltes de ride appauvris (type 1) mais présente un enrichissement en terre légère caractérisé par un rapport Hf/La normé nettement inférieur à 1.

Ces observations ou ces définitions de sources présentant un caractère régional posent deux problèmes :

A) Comment passe-t-on d'un type de source à un autre type le long de la dorsale ? Cette question constitue le thème principal de la Mission MAPCO (oct.-nov. 79) entre la zone FAMOUS et 20°N (Bougault et Treuil, en préparation).

B) Un type de source est-il constant dans le temps au niveau de la dorsale, ou bien, les échantillons prélevés à âge croissant présentent-ils les mêmes caractéristiques ? Cette question peut-être abordée par une campagne de forage avec le souci de compléter les informations déjà disponibles : 22°N - 25°N (sites 395, 396, 5 et 7 millions d'années, sites symétriques par rapport à la dorsale, sites 417, 418 à 110 millions d'années) et 36°N (FAMOUS et sites DSDP 332, 334 et 335, 0 à 15 millions d'années). Un échantillonnage de basaltes le long d'une zone de fracture peut également aborder ce problème, à la condition qu'une zone de fracture ne constitue pas un lieu où des processus pétrogénétiques différents de ceux des dorsales puissent se produire.

Il a été indiqué au début du § IV.5 que la possibilité d'interprétation de la distribution des éléments hygromagmaphiles en termes de caractéristique d'une source du manteau ne repose pas uniquement sur les données et les interprétations relatives à ces éléments. En plus de la notion de fractionnement d'un élément par rapport à un autre, il faut pouvoir affirmer que ce fractionnement n'est pas fonction d'un processus pétrogénétique; ce type d'information n'est accessible que par la mesure d'un rapport isotopique (Pb, Sr, Nd). C'est en définitive l'observation suivant laquelle il existe une corrélation entre rapports isotopiques et rapports de certains éléments hygromagmaphiles (tableau IV.5, fig. IV.24) qui constitue le meilleur support pour indiquer que certains rapports d'éléments hygromagmaphiles peuvent être caractéristiques ou fonction d'une source du manteau.

Du fait que processus modernes (fusion partielle) et processus anciens (ayant donné à une source certaines caractéristiques) influent sur les rapports d'éléments hygromagmaphiles dans le produit de fusion (basalte) et qu'il n'est pas possible de calculer la contribution du processus moderne avec certitude (dépendant du type de modèle choisi), il est bien évident qu'il ne faut pas assimiler un rapport d'éléments hygromagmaphiles ou une distribution terres rares "élargie" trouvé dans un basalte à ce rapport ou cette distribution dans le matériau source.

La meilleure preuve est qu'il existe des distributions terres rares "élargies" plates - ce qui signifie que le rapport de deux éléments pris deux à deux est le rapport chondritique - sans pour autant que la valeur des rapports isotopiques Pb, Sr et  $\Delta$ Nd correspondent à la valeur chondritique (21.5, 0.7048 et 0 respectivement). Cette observation constitue précisément la preuve que les valeurs des rapports d'éléments hygromagmaphiles sont fonction des processus modernes et anciens. Rapport isotopique: caractéristique de la source; rapports d'éléments hygromagmaphiles: fonction de la source et du taux de fusion partielle; éléments hygromagmaphiles présentant des propriétés physico-chimiques différentes (La - Ta, Nb), (Sm - Hf, Zr); l'étude de ces trois types de paramètres sur les mêmes échantillons provenant de contextes géologiques différents devrait contribuer à préciser les notions de matériaux sources, différenciation du manteau et fusion partielle.

#### 8- CONCLUSION

La discussion qui vient d'être développée à propos de la notion d'hétérogénéité du manteau repose sur la notion de fractionnement de deux atomes pendant les réactions qui interviennent au cours des processus internes. Il peut s'agir de deux atomes d'un même élément ou de deux atomes d'éléments différents.

S'il s'agit de deux isotopes d'un même élément, les éléments considérés (Sr, Nd, Pb) sont suffisamment lourds pour considérer qu'un fractionnement isotopique n'intervient pas au cours des processus magmatiques. Ce postulat est vérifié par le non-fractionnement d'isotopes non radiogéniques. Le non fractionnement d'éléments à propriétés voisines (Nb-Ta, Zr-Hf, Y-Tb) et pourtant de masse très différentes ne peuvent que confirmer le non-fractionnement des rapports isotopiques  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{146}\text{Nd}$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  au cours des processus magmatiques. C'est la raison pour laquelle ces données peuvent être interprétées d'une façon univoque en termes de caractéristiques du matériau source, indépendamment de tout modèle de fusion.

L'interprétation du fractionnement des éléments hygromagmaphiles repose d'une part sur les propriétés de ces éléments et d'autre part sur un modèle de fusion. Le classement de ces éléments présenté dans ce mémoire peut être considéré comme un postulat; mais il est certain que le modèle de fusion choisi pour une interprétation n'a pas la "valeur" du non-fractionnement de deux isotopes d'un même élément. C'est sur cette différence fondamentale, quant aux principes et aux postulats qu'un rapport isotopique permet "en toute rigueur" une interprétation univoque en termes de matériau source.

Ceci ne signifie pas, bien au contraire, que les éléments traces, en général, n'apportent pas leur contribution, du fait que leur interprétation repose sur un postulat moins "solide" que le non fractionnement isotopique d'un élément de numéro élevé. Ces éléments constituent un outil géochimique qui doit être utilisé en parallèle et en complément des données isotopiques, voire indépendamment, du fait précisément de l'éventail des possibilités de fractionnement offert par ces éléments:

- en parallèle, vis à vis de l'hétérogénéité du manteau: certaines données permettent d'aboutir à cette notion d'hétérogénéité indépendamment des données isotopiques (Joron et Treuil, 1977; Joron et al., 1978; Bougault et al., in press).

- en complément ou indépendamment vis à vis des processus de fusion et de cristallisation. On dispose pour cela d'un ensemble d'éléments à faibles et forts coefficients de partage. Il est possible de tirer parti du classement des éléments hygromagmaphiles proposé dans ce mémoire; les différences de propriétés parmi ces éléments (charges des ions par exemple) pourront être utilisées pour tracer un phénomène particulier (notion d'anomalie dans une distribution terres rares élargie). Pour les éléments à forts coefficients de partage, des progrès sensibles sur le plan estimation quantitative de la cristallisation fractionnée devraient être obtenus par mesure de la concentration de ces éléments dans chaque phase et non pas seulement dans la roche totale (Ni dans les microphénocristaux d'olivine par exemple).

## CHAPITRE V

---

### DONNÉES

#### OCÉAN ATLANTIQUE

#### BASALTES : ÉLÉMENTS MAJEURS ET ÉLÉMENTS TRACES

Ce chapitre présente les tableaux de données (éléments majeurs et éléments traces) des échantillons basaltiques prélevés dans l'Atlantique au cours des campagnes DSDP-IPOD et des campagnes françaises. Certaines de ces données ont été obtenues à bord (conteneur Géochimie). Les méthodes analytiques utilisées sont la spectrométrie de fluorescence X (Laboratoire de Géochimie du COB; voir chapitre VI) référencée XRF et l'analyse par activation neutronique (Laboratoire Pierre Sue du CNRS à Saclay) référencée NAA.

Ces données sont présentées par campagnes, dans l'ordre chronologique où elles se sont déroulées. Chaque groupe de données, donc chaque campagne, fait l'objet d'un commentaire donnant les buts de la campagne, les lieux de prélèvements et les références permettant d'avoir accès à des informations plus détaillées.

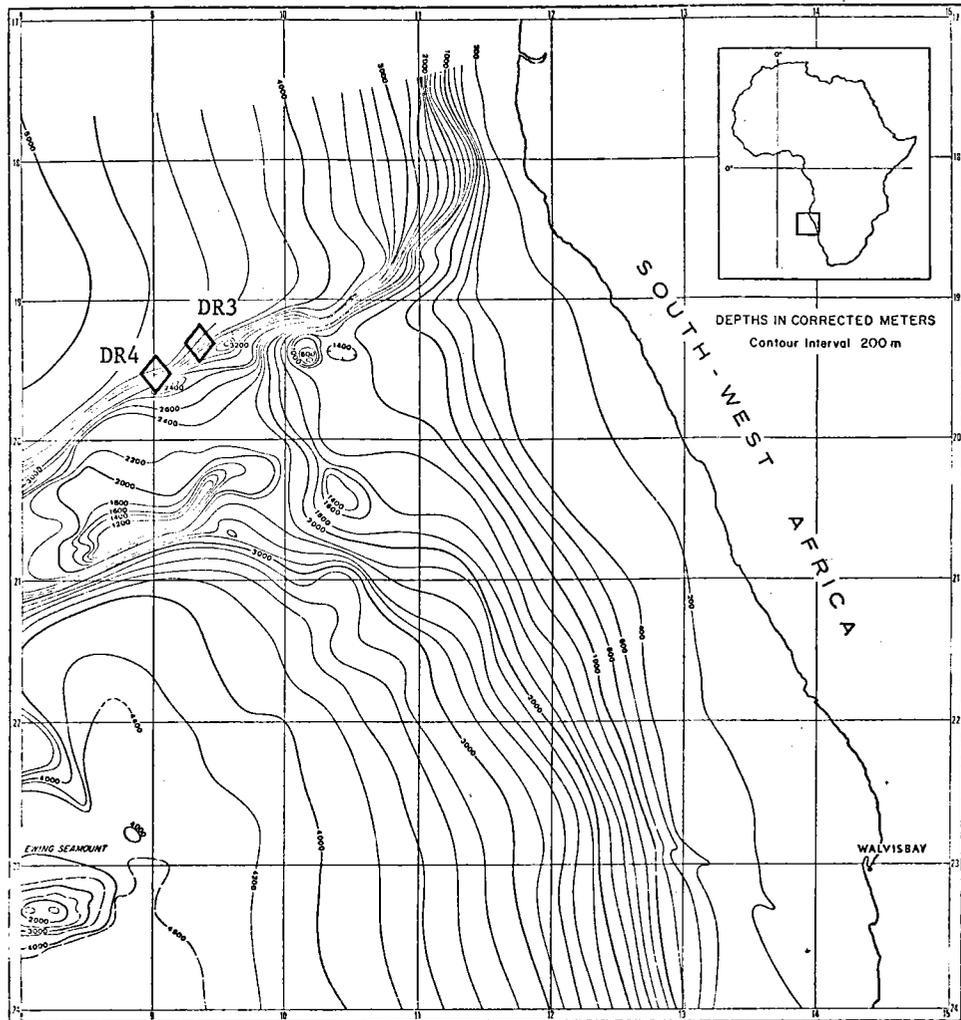


Figure V.1: Walvis Ridge; position des dragages.

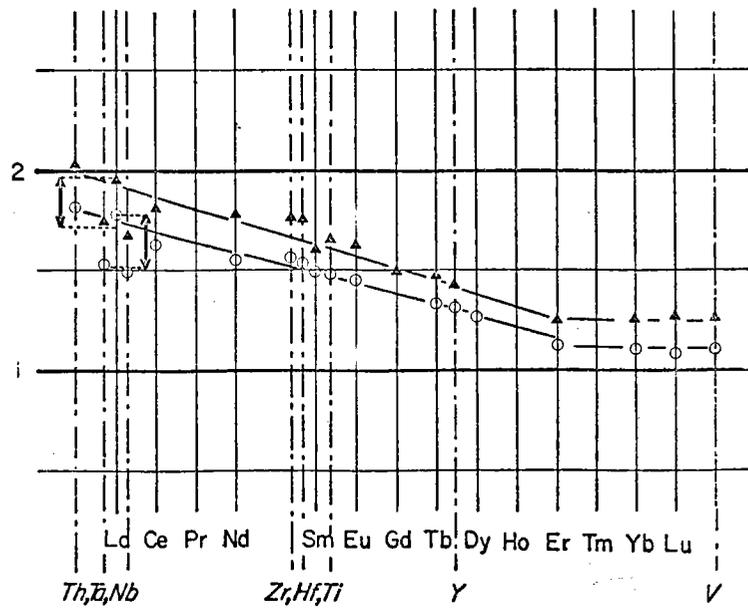


Figure V.2: Diagramme terres rares "élargi"; les données terres rares sont de Montigny (1975).

WALVIS RIDGE  
-----

La ride de Walvis est une structure aséismique, non continue, d'orientation générale Sud-Ouest - Nord-Est, formant un trait majeur de l'Atlantique Sud-Est entre la dorsale médio-Atlantique (voisinage des Iles de Tristan da Cunha et Gough) et la marge sud-africaine (voisinage du Cap Frio, 18° S). Les résultats gravimétriques (Goslin, 1973) suggèrent que la dorsale Walvis surmonte une "racine" de matériau de densité voisine de 2.95 g/cm<sup>3</sup>, densité de la couche 3 océanique. Cette racine atteint une profondeur de 25 à 30 km, alors que le Moho est situé à 10 ou 15 km dans les bassins adjacents. Sa densité apparaît inférieure à celle du "manteau anormal" présent sous les dorsales médio-océaniques. Goslin indique qu'il semblerait donc exister sous la dorsale Walvis une croûte océanique anormale créée par des processus différents de ceux que l'on rencontre sous les dorsales médio-océaniques.

Il existe peu de données sur la pétrologie des roches des rides aséismiques (Hékinian et Thompson, 1976). Ces roches semblent toutefois se distinguer des tholéiites océaniques par un faible indice de cristallisation, la présence de plagioclases plus sodiques, une teneur en olivine plus basse et une concentration en minéraux d'oxydes de Fer plus grande. La description des échantillons dont les données sont présentées ici, a été faite par Hékinian (1972). Cet auteur indique que les concentrations en éléments alcalins et en Titane permettent de classer ces roches dans la série alcaline. Cette observation est confirmée par la courbe de terres rares élargie (fig. V.2).

CH 18 - DR 3 : Flanc nord de Walvis Ridge (19° 22.3 S, 9° 20.0' E - 19° 25.0 S, 09° 21.5' E), profondeur : 3480 m.

CH 18 - DR 4 : Flanc nord de Walvis Ridge (19° 33.8' S, 09° 01.0' E - 19° 35.0' S, 09° 01.3' E), profondeur : 2738 m.

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Total
CH18-DR3										
WD33	46.80	16.37	14.80	2.85	6.67	2.76	2.82	3.41	1.88	98.49
A	47.00	16.50	15.11	2.54	6.50	2.86	2.89	3.33	2.19	98.36
WD35	51.55	14.31	12.51	2.30	4.58	2.71	3.87	2.31	4.27	98.41
CH18-DR4										
WD43	49.18	16.00	11.63	4.84	9.54	2.6	1.02	2.21	1.83	98.85
A	50.77	15.60	12.05	2.81	7.37	2.74	1.22	2.90	3.02	98.48
B	51.19	17.04	11.27	2.72	7.56	2.80	1.61	2.46	2.87	99.52
C	51.72	15.37	11.60	2.12	6.17	3.04	1.39	3.22	3.62	98.25
WD41	51.48	16.37	9.87	2.48	7.24	3.00	1.01	3.28	4.43	99.10

Tableau V.1a: Walvis Ridge

"WALDA" : éléments majeurs.

Eléments	Sc	Ti	V	Cr	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sb	Cs	Ba	La	Eu	Tb	Hf	Ta	Th	U				
Méthode Analytique	NA	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	NAA	XRF	NAA	AA	AA	XRF	NAA	XRF	NAA	XRF	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA				
CH18-DR3																												
WD3.3	41.4	20400	546	63	103600	43	41	73	75	130	136	44.7	43.2	320	42.0	302	267	23.9	1.61	.38	339	27.4	2.93	1.35	7.23	1.73	2.92	1.01
A (*)	39.5	20000	492	66	105800	134	133	50	46	125	115	44.2	41.2	309	40.2	276	267	22.3	1.50	.34	261	26.1	2.78	1.14	6.82	4.55	2.78	.67
WD3.5	30.9	13900	274	80	87570	30	28	60	61	100	41	38.2	37.3	328	44.3	192	198	15.6	.61	.57	147	19.9	2.01	1.02	4.39	1.02	1.82	1.04
CH18-DR4																												
WD4.3	36.0	13300	291	160	81410	43	39	71	69	215	75	26.5	25.3	366	35.0	189	193	15.5	.21	1.23	176	18.8	2.11	.98	4.48	1.04	1.82	.47
A (*)	37.6	17400	354	89	84350	66	65	71	67	109	100	20.1	19.6	346	47.2	241	251	20.5	.41	.39	269	26.5	3.02	1.21	6.0	3.13	3.36	.87
B (*)	39.0	14800	321	191	78890	89	95	56	57	23	125	21.3	23.5	377	24.2	210	224	21.3	.45	.14	235	24.2	2.46	1.03	5.34	3.3	2.17	1.14
C	41.6	19300	387	57	81200	30	29	45	43	100	104	19.5	19.6	348	57.0	295	310	24.8	.28	.05	279	28.4	3.04	1.54	7.11	1.73	3.16	1.05
WD4.1 (*)	40.1	19700	414	57	69090	59	62	32	29	40	120	12.7	10.7	366	51.8	281	289	23.1	.14	.10	296	28.3	3.19	1.47	6.98	3.11	3.07	1.68

Tableau V.1b: Walvis Ridge

"WALDA" : éléments traces (en ppm). Les échantillons marqués (\*) ont été broyés en broyeur carbure de Tungstène : contamination en Co et Ta.

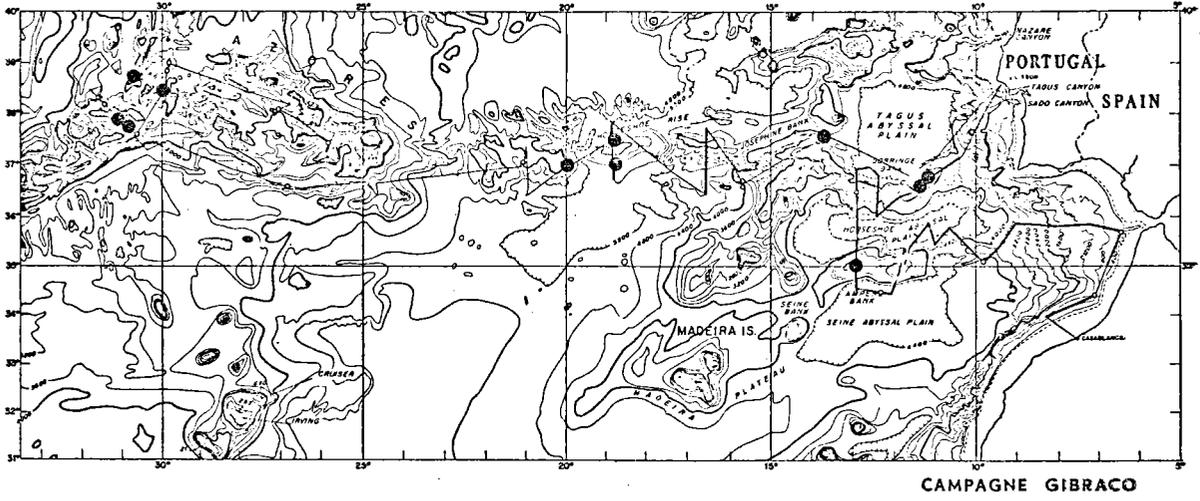


Figure V.3: Zone de fracture Açores - Gibraltar; campagne "GIBRACO".

## GIBRACO

-----

La campagne Gibraco, organisée conjointement par le Département Scientifique du C.O.B. et l'I.P.G. Paris, s'est déroulée en Août-Septembre 1972 autour d'un thème commun : la zone de fracture Açores - Gibraltar. Cette mission avait deux objectifs : l'un, Géologie Structurale ; l'autre, Pétrologie et Géochimie.

Les dragages réussis au cours de cette campagne concernent : le banc d'Ampère, le banc de Gorringe, le banc de Joséphine, Horse-Shoe Rise et la zone du point triple des Açores. Les bancs d'Ampère, Coral Patch et de Gorringe correspondent très vraisemblablement à l'origine de l'ouverture de l'Atlantique à des "Marginal Fracture Zones" ; en raison du mouvement Europe-Afrique (compression dans cette région), ces structures n'ont cessé d'évoluer depuis le Crétacé supérieur, avec un soulèvement important au Miocène (Bonnin, 1978 ; Olivet, 1978). Le banc de Joséphine appartient à l'alignement Torre-Madère (direction ouverture de l'Atlantique) ; cet alignement correspond à l'anomalie J, dorsale anormalement haute ; cette structure a été reprise, déformée et soulevée au Miocène. Horse-Shoe Rise fait partie de l'ensemble de la structure Gloria-Fracture zone approximativement orientée Est-Ouest (fig.V.3) ; cette grande zone de fracture traduit le mouvement relatif Europe-Afrique (décrochement). Le reste des échantillons a été prélevé dans la zone du point "triple des Açores", c'est-à-dire dans la région qui constitue le point de rencontre de la dorsale atlantique et de la zone de Fracture Açores-Gibraltar. Il convient de remarquer que la plupart des échantillons sont altérés (perte au feu à 110°C et 1050°C) et contiennent souvent une phase carbonatée (tableau V.2). Les descriptions mentionnées ci-après ont été effectuées par le Professeur Fabries (Muséum d'Histoire Naturelle), au cours de la campagne.

G02 : Pente sud du banc d'Ampère - (35° 01.1' N, 12° 55.6' W - 35° 01.1' N, 12° 57.5' W) ; profondeur : 1300 m.

G02 - 01 : Basalte à texture microlitique et fluidale ; nombreuses vacuoles de calcite ; phénocristaux : clinopyroxène subautomorphe, olivine entièrement altérée en oxyde de fer ; mésostase : verre important, très fines baguettes de plagioclase avec texture fluidale, minéraux opaques, microlites de pyroxènes.

G02 - 2 : Basalte très altéré + carbonate.

G02 - 03 : Pâte opaque noire, grandes plages de calcite + globules, très grands clinopyroxènes automorphes vert-jaune, fantômes d'olivine transformés en oxyde de Fer.

G02 - 04 : Lave altérée, nombreuses plages de calcite, fond vitreux avec nombreux opaques, zéolites (?), baguettes de plagioclase et de clinopyroxène.

G04 : Banc de Gorringer, partie nord ( $36^{\circ} 35.5' N$ ,  $11^{\circ} 43.0' W$  -  $36^{\circ} 35.3' N$ ,  $11^{\circ} 41.9' W$ ) ; profondeur : 2600 m.

G04 - 01 : Serpentine.

G06 : Banc de Gorringer, face nord ( $36^{\circ} 43.2' N$ ,  $11^{\circ} 21.5' W$  -  $36^{\circ} 41.5' N$ ,  $11^{\circ} 20.9' W$ ) ; profondeur : 1600 à 1189 m.

G06 - 01 : Phonolite à texture microlitique. Sanidine automorphe, plages incolores à centre brunâtre sub-isotrope ; parfois paillettes jaune-orange, biréfringentes (cancrinite ?) ; analcime (?) ; plagioclase rare ; amphibole brune, en aiguille avec bordure d'oxydes opaques ; biotite brun-noir ; pyroxène vert, aegyrinique en aiguille ; sphène ; minéraux opaques ; fond microcristallin ; présence de zéolites.

G06 - 02 : Galet allongé, aspect de lave brun-noir vacuolaire. Texture vitreuse à vitro-phyrique ; lattes rachitiques de plagioclase ; minéraux opaques abondants ; hydroxydes dans la pâte vitreuse : le verre est altéré par endroit en fines aiguilles de mica blanc avec hydroxyde de fer brun-rouille.

G06 - 03 : Galet, roche gris-clair à phénocristaux inférieurs à quelques millimètres. Texture microlitique fine à vitreuse. Plagioclases rares en lattes allongées ; biotite brun-rouge, abondante, sub-automorphe. Amphibole brune, plus rares en aiguilles. Augite incolore en baguettes. Apatite, magnétite et ilménite. Verre abondant.

G06 - 07 : Galet de roche noire vacuolaire. Texture microlitique à phénocristaux ferromagnésiens. Amphibole brune en baguettes. Clinopyroxène zoné, coeur verdâtre, bordure incolore. Plages incolore à crème, isotrope analcime (?). Minéraux opaques, apatite. Verre brun assez abondant. Vacuoles remplies de zéolites.

G07 : Banc de Joséphine, face N-E. ( $37^{\circ} 30.5' N$ ,  $13^{\circ} 50.4' W$ ) ; profondeur : 2050 à 2060 m.

G07 - 06 : Galet de lave grise. Texture microlitique plus ou moins fluidale. Plagioclase en lattes automorphes (An : 30), petits cristallites dans la pâte. Amphibole brune, rare ; bordure noire d'opaques. Minéraux opaques. Verre.

G10 : Horse-Shoe Rise : face sud ( $36^{\circ} 56.4' N$ ,  $18^{\circ} 46.8' W$  -  $36^{\circ} 58.5' N$ ,  $18^{\circ} 45.5' W$ ) ; profondeur : 5340 - 4975 m.

G10 - 04 : Galet de roche brun-noir. Texture microlitique. Phénocristaux de plagioclase (altéré) An : 65. Lattes plus ou moins entrecroisées de plagioclase. Fond ferrugineux avec phyllites cryptocristallines. Fantômes de minéraux altérés en hydroxydes bruns foncés (olivine ?). Calcite.

G11 : Horse-Shoe Rise : face nord ( $37^{\circ} 30.6' N$ ,  $18^{\circ} 49.9' W$  -  $37^{\circ} 30.4' N$ ,  $18^{\circ} 48.1' W$ ) ; profondeur : 5100 - 4550 m.

G11 - 04 : Bloc anguleux de lave altérée brun-jaune. Texture microlitique, vitrophyrique : bordure ferrugineuse, lattes de plagioclase plus ou moins altérées, microlites de plagioclase dans la pâte. Fantômes de phénocristaux altérés en hydroxyde de Fer et phyllite (olivine ou pyroxène ?). Minéraux opaques très frais. Hydroxydes de Fer.

G12 : Horse-Shoe Rise, partie S-W. ( $37^{\circ} 02.5' N$ ,  $20^{\circ} 05.3' W$  -  $37^{\circ} 00.3' N$ ,  $20^{\circ} 03.0' W$ ) ; profondeur : 3475 - 3075 m.

G12 - 01 : Bloc anguleux de serpentinite verte (+ zones couleur rouille) ; veine vert clair (aspect bréchique). Présence de chrysotile et de chlorite. Minéraux opaques brun-rouge.

G12 - 07 : Bloc irrégulier de lave altérée brun-jaune. Structure à tendance intersertale. Plagioclase en baguettes plus ou moins entrecroisées. Augite en microlites. Amas chloriteux et ferrugineux. Verre recristallisé. Hydroxydes ferriques. Epidote. Minéraux opaques.

G12 - 08 : Bloc irrégulier de lave altérée brun-jaune. Texture vitrophyrique. Lattes de plagioclase arborescentes ou en rosettes formant pratiquement la matrice de la roche. Fantômes d'un minéral transformé en bastite. Verre altéré en brun. Rares opaques. Chlorite dans les vésicules.

G12 - 13 : bloc anguleux de lave variolitique brun-vert. Texture vitreuse à vitrophyrique. Aiguilles de plagioclase très rachitiques Fantômes d'olivine. Verre avec légère dévitrification. Minéraux opaques. Vacuoles à chlorite.

G17 : M.A.R. zone du point triple. ( $37^{\circ} 55.2' N$ ,  $31^{\circ} 06.1' W$  -  $37^{\circ} 55.7' N$ ,  $31^{\circ} 06.7' W$ ) ; profondeur : 2138 - 2213 m.

G17 - 01 : Bloc de lave sombre à bordure altérée, vacuolaire. Texture intersertale, basalte vacuolaire. Plagioclase (An : 65) en lattes assez épaisses et très développées. augite assez important, (15% du mode). Olivine. Vacuoles, Verre jaune peu abondant. Minéraux opaques.

G17 - 02 : Bloc de lave sombre à texture microlitique. Plagioclase en rares phénocristaux (An : 65). augite en phénocristaux. Microlites très fins de plagioclase et d'augite dans la pâte. Amas cryptocristallins de chlorite autour des vacuoles. Verres opaques.

G17 - 03 : Bloc de basalte doléritique. Plagioclase en lattes (An : 65) bien développées. augite abondant. Olivine (très peu). Verre brun foncé, plus ou moins recristallisé. Minéraux opaques, vacuoles.

G19 - M.A.R. zone du point triple - ( $37^{\circ} 43.2' N$ ,  $30^{\circ} 51.3' W$  -  $37^{\circ} 42.6' N$ ,  $30^{\circ} 51.2' W$ ) ; profondeur : 1728 - 1350 m.

G19 - 01 : fragment anguleux de lave vert-gris. Texture vitreuse porphyrique. Plagioclase en phénocristaux. Pyroxène. Amas fibroradié de chlorite. Verre abondant. Petits minéraux opaques.

G19 - 04 : lave vacuolaire. Texture vitreuse porphyrique. Plagioclase : grands phénocristaux et baguettes. Pyroxène. Olivine avec bordure ferrugineuse. Vacuoles avec amas fibroradié de chlorite. Minéraux opaques. Verre abondant.

G20 : M.A.R. zone du point triple. ( $38^{\circ} 36.0' N$ ,  $30^{\circ} 42.5' W$  -  $38^{\circ} 35.8' N$ ,  $30^{\circ} 41.8' W$ ) ; profondeur : 1244 - 1152 m.

G20 - 01 : Basalte : structure à tendance intersertale. Plagioclase. Olivine automorphe avec bordure ferrugineuse. Microlites de plagioclase et de pyroxène. Opaques. Verre altéré. Vacuoles remplies de calcite.

G21 : M.A.R. zone du point triple. ( $38^{\circ} 35.7' N$ ,  $30^{\circ} 40.5' W$  -  $38^{\circ} 45.5' N$ ,  $30^{\circ} 40.0' W$ ) ; profondeur : 914 m.

G21 - 01 : Bloc de lave plus ou moins scoriacé. Basalte porphyrique à olivine. Phénocristaux de plagioclase sub-automorphes. Microlites allongés de plagioclase. Pyroxène en petits cristaux. Olivine transformée en iddingsite. Minéraux opaques. Verre ferrugineux. Vacuoles tapissées de minéraux blancs plus ou moins fibreux et avec parfois un peu de calcite au centre.

G22 : M.A.R. zone du point triple. ( $38^{\circ} 25.4' N$ ,  $29^{\circ} 59.6' W$  -  $38^{\circ} 23.5' N$ ,  $30^{\circ} 00.6' W$ ) ; profondeur : 1350 m.

G22 - 04 : Echantillon anguleux noir. Texture à tendance intersertale. Plagioclase en baguettes entrecroisées. Clinopyroxène abondant. Olivine avec un peu d'iddingsite.

L'interprétation des données géochimiques relatives à ces échantillons, notamment ceux qui correspondent à la partie orientale de la zone de fracture Açores-Gibraltar, ne peut être faite qu'avec beaucoup de prudence, au moins pour deux raisons :

- beaucoup de ces échantillons sont des galets ; bien que ces massifs aient pu être en partie émergés et qu'à la faveur des mouvements tectoniques ces galets puissent se trouver actuellement par grande profondeur, la certitude de leur origine n'est pas absolument évidente.

- l'altération est très importante ; la présence de minéraux d'altération néoformés est signalée à de nombreuses reprises ; dans certains cas, la quantité de carbonate est très importante. Ceci signifie que seules les concentrations d'éléments à faibles coefficients de partage, réputés peu sensibles à l'altération, peuvent être utilisées, à la condition de ne considérer que des rapports de concentrations ou des courbes normées.

En tenant compte de ces contraintes, le résultat majeur qu'il convient de constater est la différence fondamentale qui existe entre les laves échantillonnées sur les bancs d'Ampère Gorringe et Joséphine et les basaltes océaniques tholéitiques. La minéralogie des laves des bancs constituant la partie orientale de la zone de fracture Açores-Gibraltar, permet de

classer ces échantillons dans la série alcaline ; les courbes "terres rares élargies" (fig. V.4) confirment ce résultat.

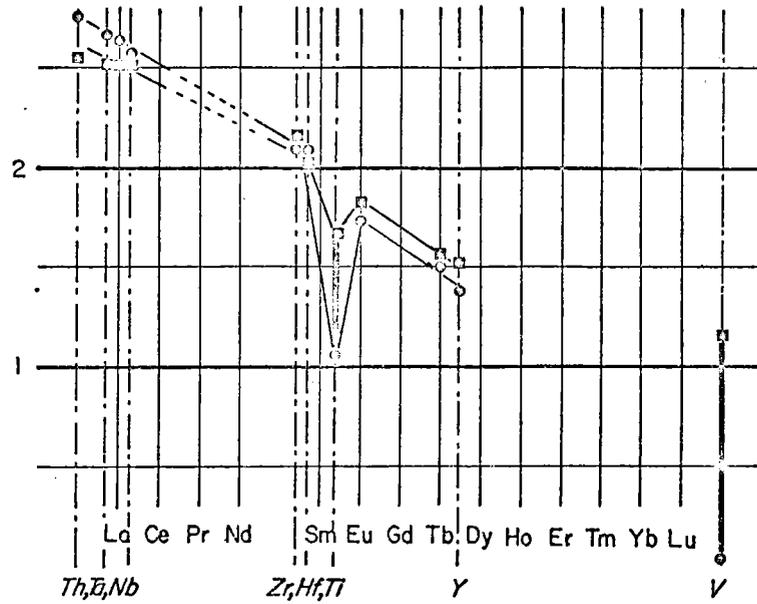


Figure V.4: Diagramme terres rares "élargi": banc de Gorringe et banc de Joséphine.

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P.F.110°C	P.F.1050°C	Total
G02-01	40.62	10.11	10.40	6.09	16.99	2.87	1.07	3.21	.66	.73	6.95	99.70
G02-02	19.26	5.01	7.50	7.93	27.55	1.05	.55	1.64	.76	2.38	25.49	99.12
G02-03	34.40	8.70	10.35	7.57	18.27	1.44	1.27	2.68	.98	1.94	11.06	98.66
G02-04	42.51	12.90	11.03	5.25	13.42	2.96	1.89	4.02	.80	.52	3.95	99.25
G02-05	21.62	5.71	8.26	6.55	25.50	1.41	.93	1.92	.75	2.95	23.50	99.10
G04-01	36.34	1.25	6.76	33.87	4.60	.20	.05	.03	.07	1.45	14.93	100.15
G06-01	52.87	21.50	4.17	1.11	1.20	4.52	4.99	.57	.14	2.08	5.65	98.78
G06-02	47.68	18.17	11.25	1.70	4.28	3.23	2.80	3.02	1.22	2.39	3.20	98.94
G06-03	41.94	16.17	9.17	5.85	9.37	1.89	2.51	2.88	.98	2.68	5.94	99.28
G06-07	40.65	14.20	11.16	7.18	11.68	1.48	2.09	3.69	1.10	1.95	3.85	99.03
G07-06	58.56	19.07	4.02	.96	1.80	5.66	4.26	.88	.21	1.79	1.89	99.10
G10-04	45.70	15.93	12.81	6.34	6.50		1.17	1.43	.13	3.06	3.77	96.84
G11-04	47.27	16.57	11.44	5.29	9.25	2.55	1.69	1.25	.15	1.16	2.67	99.29
G12-01	39.26	2.13	10.01	35.94	.09	.30	.12	.06	.03	1.05	11.71	100.70
G12-07	47.12	16.22	11.56	7.41	8.08	2.19	.66	1.14	.16	1.47	3.53	99.54
G12-08	48.02	15.83	10.33	8.37	10.90	2.36	.41	.98	.12	.56	2.13	100.01
G12-13	48.91	15.46	10.74	7.73	9.41	2.52	.34	1.17	.11	.39	2.38	99.16
G17-01	48.33	15.33	10.27	6.44	11.69	3.04	.51	2.03	.29	1.19	1.18	100.30
G17-02	49.98	15.83	9.91	6.30	12.07	3.04	.50	2.15	.32	.66	.78	100.54
G17-03	47.79	15.90	10.33	6.15	11.90	3.01	.55	2.18	.38	.73	.93	99.85
G19-01	42.45	16.02	11.32	8.00	10.33	2.80	.42	2.33	.66	1.37	4.50	100.20
G19-04	43.42	16.04	11.10	7.83	11.05	2.67	.30	2.31	.65	1.07	2.86	99.30
G20-01	39.81	14.92	11.48	6.65	15.24	2.13	.17	1.00	.21	.97	6.67	99.25
G21-01	30.35	16.07	12.29	9.59	7.81	2.74	.49	3.26	1.15	3.08	10.09	96.89
G22-04	42.89	13.94	10.02	11.14	10.28	2.79	.71	1.71	.37	1.15	5.61	100.61

Tableau V.2a:

"GIBRACO" : éléments majeurs.

Eléments	Sc	Ti	V	Cr	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sb	Ce	Ba	La	Eu	Tb	Hf	Ta	Th	U				
	Méthode Analytique	NA	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	NAA	XRF	NAA	AA	AA	XRF	NAA	XRF	XRF	NAA	XRF	NAA									
G02-01	28.7	19300	310	517	72800	55	57	304	319	87	95	20.9	20.7	622	30.8	309	351	46.	.16	.39	220	30.8	2.99	1.08	7.1	3.36	3.22	1.66
G02-02	17.2	9850	143	705	52500	29	32	344	365	45	79	8.1	8.9	214	22.5	184	203	30.6	2.34	2.34	31	29.0	2.25	.73	4.33	2.24	2.24	.88
G02-03	26.8	16100	287	579	72450	47	48	249	256	70	94	16.5	16.6	462	25.9	232	253	41.0	.59	.17	179	31.9	2.59	.86	5.70	2.99	2.62	.87
G02-04	27.7	24200	383	40	77210	45	46	100	102	81	104	33.2	34.9	803	35.2	366	380	71.4	.30	.43	377	48.5	3.65	1.15	8.60	5.30	4.90	1.45
G02-05	19.6	11530	156	740	57820	23	27	318	368	60	99	14.6	14.6	206	30.5	206	236	34.6	3.34	.30	.64	35.4	2.56	.81	4.90	2.61	2.63	1.05
G04-01	5.8	180	34	2260	47320	83	89	2140	2308	2	28	.4	.0	16	1	.0	.0	.3	.34	.0	.0	.19	.0	.02	.0	.0	.03	.67
G06-01	2.8	3420	63	29	29190	5	4	17	17	0	68	11.3	11.4	911	19.8	616	583	167	.41	2.30	1423	123	1.93	.50	11.0	6.26	26.0	5.40
G06-02	12.1	18150	169	48	78750	18	16	18	15	9	185	58.1	57	1243	36.6	637	661	169	1.47	.52	870	106	4.16	1.17	11.4	12.1	15.3	2.80
G06-03	18.7	17300	280	132	64190	23	24	45	45	18	125	52.7	52.3	738	34.2	836	863	225	.31	.32	1769	135	4.16	1.15	15.4	12.3	13.3	3.2
G06-07	33.1	22200	317	233	78120	36	35	75	73			47.2	43.8	817	72.9	740	770	178	.56	.53	1201	98	4.9	1.73	12.9	9.9	9.8	4.0
G07-06	2.4	5290	24	3	28140	2	2	33	34	12	92	63.0	60.3	420	51.8	628	635	189	.82	.26	1207	106	3.86	1.48	15.6	14.3	15.6	.49
G10-04		8580	192	49	89670	63		203				27.3		141	21.7	83.			4.3									
G11-04	41.4	7500	264	338	80080	34	33	204	220	118	122	26.0	25.0	97	32.3	71.0	81.0	3.1	.67	1.49	18.0	2.6	1.18	.67	1.95	.15	.11	.24
G12-01	10.5	360	62	3976	70070	126	126	2306	2489	185		2.7	3.4	7	1.2	16.0	13.0	.2	.76	.11	7.0	.7	.08	.02	.25	.02	.37	.22
G12-07	42.2	5850	205	341	80920	52	51	189	198	196	144	11.1	12.1	90	31.1	65.0	82.0	2.7	1.26	.43	29.0	3.0	.99	.68	1.81	.11	.17	.19
G12-08	39.7	5880	217	376	72310	45	45	180	186	70	72	4.2	2.2	95	27.4	55.0	51.0	.5	.38	.16	10.	1.1	.82	.59	1.43	.08	.07	
G12-13	38.1	7010	246	353	75180	49	48	190	195	118	80	3.6	2.7	110	31.5	74	79.0	2.6	.47	.09	8	2.2	.92	.65	1.91	.12	.13	.16
G17-01	35.2	12100	277	111	71890	45	47	80	85	64	77	11.4	9.3	317	30.2	139	161	23.3	.29	.84	122	13.8	1.68	.82	3.46	1.61	1.53	.44
G17-02	38.2	12900	289	107	69370	42	44	93	96	74	83	5.6	5.7	327	31.2	141	160	24.6	.15	.11	157	14.8	1.78	.92	3.69	.75	1.62	.34
G17-03		13100	299	111	72310	39		72		54	78	8.5		459	36.1	139		26.5										
G19-01	34.6	13980	265	367	79200	45	45	165	179	64	82	4.4	2.1	270	40.5	170	198	22.5	1.63	.05	56	15.3	2.19	1.12	4.53	1.55	1.52	2.95
G19-04	34.1	13880	256	376	77700	46	46	166	177	53	89	1.0	.0	273	38.3	162	194	20.4	1.09	.05	69	14.2	2.19	.98	4.28	1.48	1.40	2.95
G20-01	34.5	6000	214	391	80360	53	56	209	221	81	73	2.8	3.1	192	27.6	58	85	9.4	1.61	.14	9.0	4.3	.86	.52	1.54	.47	.45	.79
G21-01		19560	320	147	86030	40		103		48	101	9.1		371	33.0	236		39.3										
G22-04	32.0	10250	274	549	70140	47	48	220	239	95	86	8.5	7.6	295	28.8	129	130	26.6	.84	.12	167	17.1	1.51	.67	3.03	1.79	1.94	.81

"GIBRACO" : éléments traces (en ppm).

Tableau V.2b: Echantillons de la campagne GIBRACO: éléments traces

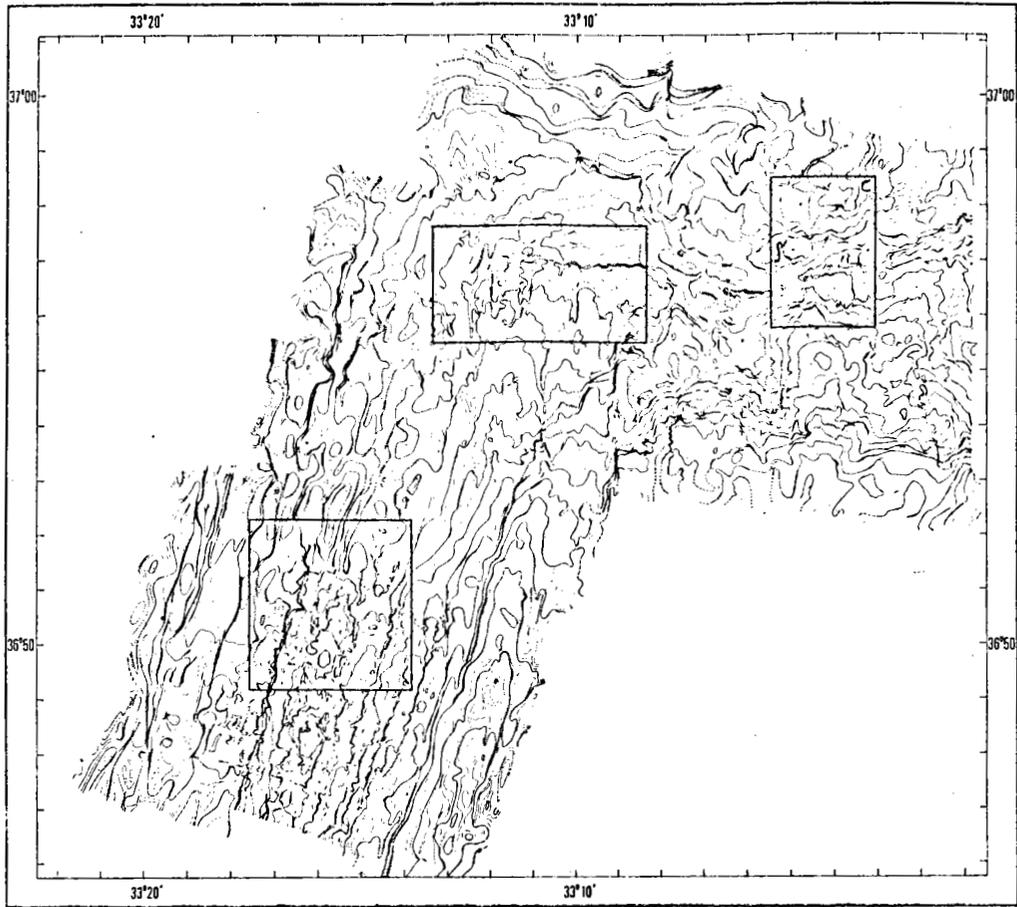


Figure V.5: "FAMOUS"; lieu de prélèvement des échantillons.

## FAMOUS (~ 36° 50' N)

-----

French American Mid Oceanic Undersea Survey est une étude géologique, géophysique et géochimique d'une portion de dorsale médio-océanique. Pour la première fois, des submersibles habités (Archimède, Alvin, CYANA) bénéficiant d'un système de navigation précis ont été utilisés, permettant d'effectuer une "description" de dorsale océanique "équivalente" grâce aux moyens utilisés à une "description" géologique d'un site à terre, (Ballard et al., 1975). Ces plongées ont permis d'étudier en détail une partie du Rift, son intersection avec une zone de fracture et une portion de zone de fracture (Arcyana, 1975 ; Ballard and Van Andel, (1977) ; Bellaiche et al., 1974 ; Needham and Francheteau (1974). La localisation des échantillons étudiés dont les résultats sont présentés tableaux V.3,4, est indiquée figure V.5. La description des échantillons prélevés par submersibles ou dragués dans cette zone lors des campagnes préparatoires, est donnée dans les articles suivants : Bougault et Hékinian (1974), ARCYANA (1977), Bryan and Moore (1977), Bryan and Thompson (1977), Hékinian et al. (1973), Hékinian et al. (1976). L'ensemble de l'échantillonnage FAMOUS, leg 37 et leg 49 permet d'apprécier dans cette zone, la "relative homogénéité" du manteau supérieur observée par l'intermédiaire de certains rapports isotopiques et de la distribution des terres rares (élargies) : Allègre et al. (in press), White and Bryan (1977), O'Nions and Pankhurst (1977), Bryan et al. (1976). Un processus de fusion, plus complexe qu'un simple "batch partial melting" doit être considéré pour expliquer certains résultats (Langmuir et al., 1977 ; Bougault et al., 1979).

Echantillon	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P.F.110°C	P.F.1050°C	Total
ARP 74,7-5	50.00	14.70	8.88	1.43	.14	8.00	11.65	2.36	.28	1.43	.16	.21	.79	100.03
ARP 74,7-5 verre	50.70	14.59		11.27	.18	8.35	11.77		.23	1.43	.20	.00	-.61	98.11
ARP 74,7-6	50.10	14.61	9.28	1.09	.18	8.30	11.80	2.04	.25	1.44	.14	.11	.51	99.65
ARP 74,7-6 verre	49.63	14.66		9.28	1.10	.18	8.29	11.67	2.12	.24	1.43	.18	.02	99.34
ARP 74,7-7	50.21	14.41	9.33	.78	.17	8.13	11.65	2.71	.24	1.42	.15	.11	.50	99.81
ARP 74,7-8	50.30	14.45	8.41	1.76	.17	8.80	12.10	2.00	.29	1.25	.16	.18	.78	100.65
ARP 74,7-9	49.75	14.05	8.65	1.21	.16	8.67	11.89	1.88	.25	1.26	.15	.13	.79	98.34
ARP 74,8-10	50.60	14.70	8.72	1.61	.18	7.60	12.20	2.00	.20	1.16	.13	.11	.80	100.01
ARP 74,9-12	49.46	15.05	7.31	.86	.14	10.43	12.03	2.61	.18	.87	.10	.09	.40	99.59
ARP 74,9-13	50.00	15.80	8.20	1.84	.16	7.40	12.25	2.14	.23	1.23	.12	.11	.74	100.22
ARP 74,10-15	50.27	15.02	7.64	1.17	.15	10.11	12.02	2.04	.21	1.02	.13	.10	.60	100.48
ARP 74,10-15 verre	49.83	14.84	7.64	1.37	.16	9.95	11.82	2.09	.19	.99	.13	.05	.33	99.39
ARP 74,10-16	50.26	15.05	7.28	.84	.14	10.13	12.09	2.07	.16	.82	.08	.09	.39	99.40
ARP 74,10-16 verre	49.47	15.23	7.28	.97	.14	10.66	12.21	1.94	.16	.82	.10	.02	.23	99.23
ARP 74,11-17	50.12	15.04	8.10	1.07	.15	9.62	11.80	2.00	.22	1.14	.12	.09	.57	100.04
ARP 74,11-18	50.52	15.64	8.02	.96	.14	8.42	12.35	2.30	.20	1.07	.12	.08	.56	100.38
ARP 74,11-18 verre	49.44	14.57	9.28	1.05	.18	8.49	11.68	2.32	.24	1.43	.15	.02	.51	99.37
ARP 74,12-19	50.00	15.00	8.00	.98	.17	9.62	12.73	2.00	.16	1.00	.10	.07	.59	100.42
ARP 74,12-19 verre	49.97	14.88	8.00	1.17	.16	9.05	12.83	1.91	.14	1.00	.12	.06	.28	99.57
CYP 74,30-32	47.79	14.58	7.70	.89	.16	14.06	12.10	1.85	.11	.64	.07	.11	.34	100.40
CYP 74,30-33	50.17	15.33	8.32	.72	.16	8.70	11.91	2.21	.18	1.14	.13	.07	.30	99.34
CYP 74,30-33 verre	49.98	14.78	8.32	1.44	.16	8.65	11.99	2.31	.19	1.17	.14	.02	.33	99.48
CYP 74,30-34	48.10	14.51	7.71	.82	.16	14.26	12.00	1.70	.10	.63	.08	.06	.40	100.53
CYP 74,31-35	49.81	15.13	7.33	.93	.14	10.43	12.23	2.20	.18	.86	.09	.09	.49	99.91
CYP 74,31-35 verre	49.57	15.26	7.33	1.06	.14	10.63	12.11	2.11	.19	.85	.11	.10	.36	99.82
CYP 74,31-36	47.73	20.58	4.15	1.65	.11	6.66	14.90	1.83	.13	.55	.10	.24	.79	99.42
CYP 74,31-37	48.40	20.65	4.30	1.32	.10	6.59	14.89	1.90	.17	.55	.10	.14	.56	99.67
CYP 74,31-38	49.74	14.48	6.32	3.26	.18	8.04	13.00	2.18	.25	.98	.11	.72	.68	99.94
CYP 74,31-39	50.00	15.80	7.55	1.51	.16	8.00	12.65	2.16	.21	1.14	.12	.16	.66	100.12
CYP 74,31-40	49.90	16.30	7.28	1.76	.17	7.80	13.10	1.82	.16	1.16	.17	.17	.64	100.43
ARP 73,(1 et 4)														
ARP 73,-2														
ARP 73,-3														

Tableau V.3a:  
FAMOUS : plancher interne : éléments majeurs.

Eléments	Sc	Ti	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Y	Zr	Nb	Sb	Cs	La	Ce	Eu	Tb	Hf	Ta	Th
Méthode Analytique	NAA	XRF	XRF	XRF	AA	NAA	XRF	NAA	AA	XRF	XRF	NAA	XRF	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA
ARP 74,7-5	32.5	8580	270	263		39	115	121													
ARP 74,7-6	33.4	8340	271	264	46	39	125	123	64	84			.133	.08	8.7	15	1.08	.72	2.42	.83	.82
ARP 74,7-6 verre		8580		267	46		122		65	78			.023	.06	8.6	16	1.15	.75	2.40	.86	.91
ARP 74,7-7	32.6	8520	265	265		39	118	120					.09		8.8	16	1.12	.71	2.37	.85	.86
ARP 74,7-8	33.1	7500	275	362		39	144	139					.032	.12	8.0	14	1.0	.59	2.03	.85	.86
ARP 74,7-9	32.2	7660	270	366		38	142	141		5	27		.022	.08	8.3	13	.95	.61	2.02	.83	.83
ARP 74,8-10	34.6	6960	277	170	38	36	87	85	64	74					7.4	13	.95	.55	1.62	.64	.68
ARP 74,9-12	27	5280	188	612	38	37	238	248	72	59	2.5	19	.014	.045	5	10	.68	.42	1.38	.49	.51
ARP 74,9-13	31	7380		250			93	92	59	74	2	28	.016	.06	6.2	11	.97	.6	1.76	.57	.6
ARP 74,10-14 verre		5040	189	570			255		75	65											
ARP 74,10-15		6120	199	548	43		226		72	66											
ARP 74,10-15 verre		5940	199	549	46		229		72	66											
ARP 74,10-16	32.6	4920	192	625	41	37	240	245	74	60			.016	.03	5.6		.85	.43	1.32	.48	
ARP 74,10-16 verre		4920		626			247		74	61											
ARP 74,11-17	28.6	6840	217	473	40	37	196	199	72	64			.028	.06	6.5	13	.92	.55	1.9	.66	.69
ARP 74,11-18	28.4	6420	215	402		36	159	161	63	63	2	26			6.1	10	.9	.51	1.6	.55	.62
ARP 74,12-19	33.2	6000	239	412	37	36	153	167	73	63					4.8		.81	.5	1.74	.4	.44
ARP 74,12-19 verre		6000		410	46		141		73	69											
CYP 30-32		3840	187	1333			381			20					4.1	7	.5	.34	1	.3	.45
CYP 30-33xx verre	29.8	7020	225	453		33	159	154		2	25.3	67	.015	.041	5.8	11	.94	.56	1.76	.6	.66
CYP 30-34xx	30.9	3780	182	1321		47	392	371		.5	17.5	48			3.1	6.8	.54	.36	.9	.27	.32
CYP 31-35	27	5160		645		34	253	234	73	64			.033	.06	4.8	9	.76	.40	1.31	.49	.57
CYP 31-35 verre	27.3	5100	189	628		35	255	297					.034	.16	5.4	9	.76	.42	1.32	.52	.58
CYP 31-36x	20.7	3300	153	338		24	91	98			13.4	40	.05	.081	3.1	5.2	.58	.29	.94	.28	.32
CYP 31-37x	20.5	3300			23.1		99					31	.028	.084	2.4	4.4	.51	.266	.8	.27	.28
CYP 31-38	33.4	5880	251	83		36	61	69		6.5	22	48	.08		5.6	11	.85	.5	1.43	.6	.63
CYP 31-39	29.9	6840	237	370		35	115	122				41	.026	.045	7.0	11	1	.56	1.91	.68	.74
CYP 31-40	30	6940		360		34	110	115					.046	.038	7.5	12	.98	.56	1.8	.69	.71
ARP 73 (1 et 4)	25	5280	185	600	40	40	260	260	73	60					4.5		.79	.42	1.43	.52	.58
ARP 73-2	31.4	9480	300	130	42	40	78	81	54	86					8.7		1.18	.73	2.5	1.03	1.07
ARP 73-3	18.2	2700	140	1640	72	76	900	1155	85	50					1.41		.34	.2	.62	.15	.14

Tableau V.3b:  
FAMOUS : plancher interne : éléments traces (en ppm).

Echantillon	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P.F.110°C	P.F.1050°C	Total
ARP 74,13-22	50.5	14.9	8.15	1.75	.18	8.00	12.71	2.29	.24	1.06	.12	.12	.74	100.7
ARP 74,13-23	50.56	14.92	8.10	1.66	.17	8.00	12.81	2.24	.24	1.06	.12	.09	.70	100.67
ARP 74,13-24	50.45	14.91	8.19	1.51	.17	7.90	12.71	2.28	.27	1.05	.12	.11	.70	100.37
ARP 74,14-26	50.47	14.98	6.77	2.43	.16	7.37	13.49	2.30	.25	1.04	.12	.25	.95	100.58
ARP 74,14-27	49.73	15.00	6.61	2.68	.17	7.67	13.25	2.72	.26	1.03	.12	.21	.86	100.31
ARP 74,14-28*	50.37	15.16	7.04	1.66	.17	7.63	13.45	2.70	.16	1.05	.12	.28	.75	100.54
ARP 74,14-28**	49.34	14.98	6.58	2.78	.16	7.42	13.40	2.44	.25	1.02	.13	.68	1.17	100.35
ARP 74,14-29	49.60	14.64	6.55	3.34	.17	7.74	12.95	2.48	.33	1.03	.11	.54	.96	100.44
ARP 74,14-31	47.30	19.20	6.07	1.21	.13	8.60	13.85	1.95	.13	.43	.05	.16	.51	99.59
ARP 74,14-32	47.36	17.77	7.07	1.06	.14	9.56	13.37	1.82	.11	.48	.05	.18	.48	99.45
ARP 74,14-33	47.22	18.97	6.64	.98	.14	9.21	13.61	2.16	.07	.45	.05	.15	.53	100.18
ARP 74,16-36	50.10	15.20	7.47	1.30	.15	9.30	12.60	2.17	.22	1.09	.14	.18	.71	100.63
ARP 74,16-37	50.30	16.80	6.90	1.28	.15	7.50	13.48	1.00	.30	1.04	.11	.11	.69	100.45
ARP 74,17-40	50.17	15.37	7.20	1.81	.16	7.27	12.81	2.05	.39	1.11	.14	.28	.96	99.72
ARP 74,17-41	49.72	14.74	8.20	1.50	.17	7.62	12.3	2.32	.28	1.21	.15	.29	.99	99.52

Tableau V.3a: (suite)

FAMOUS : intersection rift - zone de fracture A : éléments majeurs.

\*frais - \*\*altéré.

Eléments	Sc	Ti	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Zr	Sb	Cs	La	Ce	Eu	Tb	Hf	Ta	Th		
Méthode Analytique	NAA	XRF	XRF	XRF	AA	NAA	XRF	NAA	AA	AA	AA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA		
ARP 74,13-22	32.9	6330	250	167	41	38	79	72	70	66	52	.03	.09	5.8	10	.87	.53	1.59	.57	.59
ARP 74,13-23	33.4	6330	253	170	40	77	76	76	86	64	50	.026	.13	5.8	10	.89	.51	1.62	.61	.63
ARP 74,13-24	30.8	6300	250	167	37	82	73	73	64	64	69	.055	.59	6.6	12	.86	.50	1.51	.61	.64
ARP 74,14-26	33.9	6240	242*	123	39	65	61	61	64	64	69	.055	.59	6.6	12	.86	.50	1.51	.61	.64
ARP 74,14-27	33.7	6180	243	122	36	68	58	58	64	64	69	.055	.59	6.6	12	.86	.50	1.51	.61	.64
ARP 74,14-28F	32.7	6300	245	127	41	39	72	66	86	67	54	.026	.13	5.8	10	.89	.51	1.62	.61	.63
ARP 74,14-28A	33.9	6120	235	122	41	39	73	66	86	64	50	.026	.13	5.8	10	.89	.51	1.62	.61	.63
ARP 74,14-29	33.4	6180	240	119	35	66	57	57	64	64	69	.055	.59	6.6	12	.86	.50	1.51	.61	.64
ARP 74,14-31x	26.9	2580	142	401	36	176	171	171	18	18	19	.07	1.8	2	.41	.29	.51	.13	.17	.17
ARP 74,14-32x	29.7	2880		430	39	183	183	183	19	19	19		1.7		.46	.30	.66	.15	.17	.17
ARP 74,14-33x	27	2700	143	412	35	177	172	172	25	25	25	.015	1.6	6.4	.44	.28	.53	.14	.16	.16
ARP 74,16-36		6540	237	511			160	160												
ARP 74,16-37:xx		6240		1407			718	718												
ARP 74,17-40		660	248	131			77	77												
ARP 74,17-41	39.6	7260	265	89	35	64	65	65	85	85	.024	.09	9.2	14	1.16	.57	2.09	.89	.94	.94
ARP 74,18-44B	45.1	6300	257	80	37	65	63	63	64	64	.016	.06	6.4	10	1.15	.54	1.68	.54	.65	.65

Tableau V.3b: (suite)

FAMOUS : intersection rift - zone de fracture A : éléments traces(en ppm).

Echantillon	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P.F.110°C	P.F.1050°C	Total
CYP 19-06	47.53	15.13		9.26	.17	8.20	11.55	2.26	.22	1.05	.11			99.77
CYP 74,22-09	47.50	15.64	7.83	1.83	.17	10.48	11.78	2.37	.19	.91	.08	.48	.48	99.74
CYP 74,22-10	48.06	15.85	8.04	1.00	.16	12.44	11.70	1.80	.05	.56	.04	.09	.47	100.26
CYP 74,23-11	47.26	15.49	7.77	2.24	.23	10.96	11.56	2.27	.16	.85	.11		1.25	100.14
CYP 74,27-18	49.54	14.40	6.62	2.03	.16	9.23	11.84	2.36	.32	1.11	.15		1.46	99.21
CYP 74,27-20	49.48	14.84	7.04	2.18	.16	8.60	12.15	2.27	.34	1.14	.13	.24	.98	99.55
CYP 74,27-21	48.10	14.63	7.12	2.41	.15	10.20	11.90	1.76	.24	1.12			1.59	99.33
CYP 74,27-26	49.18	14.77		10.42	.17	9.63	11.98	2.12	.31	1.16	.13			100.11
CYP 74,29-30	48.96	14.16	7.67	2.96	.18	7.33	11.34	2.35	.23	1.48	.17	1.46	1.67	99.96
CYP 74,29-31A	48.40	14.17	7.76	1.89	.16	9.74	10.80	2.36	.17	1.13	.10	1.16	2.31	100.15
CYP 74,29-31C	49.96	14.40	8.87	.89	.17	9.23	11.71	2.29	.20	1.10	.14	.10	.55	99.61

Tableau V.3a: (suite)

FAMOUS : zone de fracture A : éléments majeurs.

Eléments	Sc	Ti	V	Cr	Co	Ni	Zr	Sb	Cs	La	Ce	Eu	Tb	Hf	Ta	Th	
Méthode Analytique	NAA	XRF	XRF	XRF	NAA	XRF	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	
CYP 74,19-6		6300	237	212		87											
CYP 74,22-9	32.1	5460	197	466	47	242	260	19		.14	3.7	10	.8	.46	1.3	.36	.41
CYP 74,22-10	28.9	3360	149	658	49	336	381	19			1.3	.2	.5	.29	.7	.08	.17
CYP 74,23-11	28.6	5100	193	505	56	258	258	27	.146	.15	4.8	9	.71	.47	1.19	.51	.51
CYP 74,27-18	27.6	6660	226	535	40	212	222	75	.066	.19	6.7	13	.93	.60	1.82	.65	.71
CYP 74,27-20	30.7	7080	237	541	38		193	65	.02	.04	6.7	14	.99	.55	1.88	.66	.65
CYP 74,27-21	30.1	6720	233	536	39	210	210	58	.063	.11	6.8	12	.93	.55	1.82	.66	.66
CYP 74,27-26	31	6960	245	435	40	195	196	72	.036	.1	7.2	15	.95	.55	1.77	.69	.74
CYP 74,29-30	30.7	8880	278	304	38	127	136		.024		7	13	1.2	.75	2.35	.65	.73
CYP 74,29-31C	30.9	6600	246	399	37	157	163	67	.015	.07	6.4	11	.91	.57	1.73	.62	.68
CYP 74,29-31A	33.1	6780	242	404	37	164	176				6.0	15	.95	.58	1.85	.48	.49

Tableau V.3b: (suite)

FAMOUS : zone de fracture A : éléments trace (en ppm).

Echantillon	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	P.F.110°C	P.F.1050°C
DR9.3A	50.11	15.15	9.74	.16	8.32	13.16	.22	.87	.12	97.85	.23	.02
DR9.2A	50.16	14.81	10.04	.16	8.29	13.05	.18	.88	.15	97.72	.26	-.10
DR9.5	49.99	14.57	10.69	.18	7.63	12.32	.25	1.08	.13	96.84	.24	-.12
DR9.1B	50.59	15.22	9.41	.16	8.00	13.20	.24	.87	.12	97.81	.27	.18
DR8.2	48.44	16.11	8.81	.15	9.61	13.79	.07	.79	.14	97.91	.29	.05
DR5.	47.34	15.45	12.55	.22	7.22	12.34	.12	1.27	.43	96.94	.66	.82

Tableau V.3a: (suite)

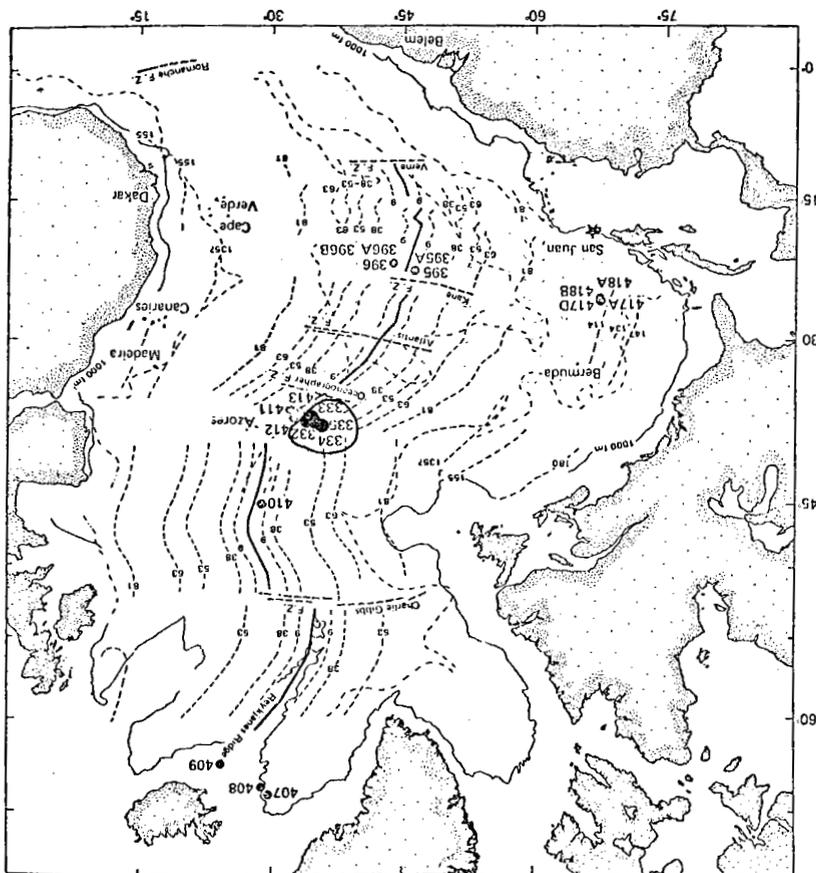
"Post Famous" CH.74 : éléments majeurs.

Eléments	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sb	Cs	Ba	La	Eu	Tb	Hf	Ta	Th	U			
Méthode Analytique	NAA	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	NAA	XRF	NAA	XRF	NAA	XRF	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA			
DR9.3A	37.3	5220	238	240	1240	68180	40	42	90	91	4.4	3.1	98	22.0	57	6.6	.04	.10	31	4.1	.82	.46	1.30	.38	.43	.15
DR9.2A	38.5	5280	229	241	1240	70280	42	44.4	93	97	2.8	5.3	99	20.7	42	5.7	.03	.10	30	3.8	.87	.49	1.33	.40	.46	.26
DR9.5	38.8	6480	256	70	1395	74830	48	48.4	78	78	5.0	2.8	113	28.1	76	8.9	.04	.07	35	5.0	.97	.56	1.80	.56	.61	.13
DR9.1B	37.8	5220	231	247	1240	65870	45	46.6	106	110	3.3	4.0	98	23.3	51	5.4	.02	.09	35	3.6	.86	.47	1.38	.38	.42	.16
DR8.2	37.8	4740	204	584	1160	61670	44	46.7	178	192	.7		101	21.9	39	5.2	.12	.04	11	3.3	.74	.44	1.30	.30	.34	.44
DR5	44.7	7620	293	81	1700	87850	52	51	71	70	.3		130	34.9	87	10.5	.39	.02	36	6.1	1.16	.63	2.11	.67	.73	1.52

Tableau V.3b: (suite)

"POST FAMOUS" CH74 : éléments traces

Figure V.6: Sites de forage du leg 37 de D.S.D.P.



D.S.D.P. : leg 37  
-----

Le leg 37 du Glomar Challenger dans le cadre du Deep Sea Drilling Project (D.S.D.P.) a été réalisé entre Mai et Juillet 1974 (Rio de Janeiro - Dublin). C'est un leg pré-I.P.O.D. (International Phase for Ocean Drilling) : en effet, pendant la phase I.P.O.D. du programme de forage, devait être abordé un nouveau thème, celui de la croûte océanique. Après des essais non satisfaisants de forage dans la couche basaltique (couche 2) pendant le leg 34, au point de vue technologie de forage, le leg 37 devait préparer la phase I.P.O.D. Pour réaliser un forage d'une profondeur supérieure à la centaine de mètres dans le basalte, un dispositif de "réentrée" a été testé ; il s'agit de pouvoir changer le trépan, nécessairement très vite détruit dans le basalte, et de réintroduire le train de tige de forage dans le trou en cours de forage.

Le choix des sites de forage s'est fait entre deux zones : 45° N proposée par les Canadiens à la suite de travaux importants dans cette région de la dorsale ; 36° N, à proximité de la zone FAMOUS, en raison des études de détails entreprises pour les plongées par submersibles habités. La deuxième zone a été choisie : quatre sites ont été forés suivant une direction perpendiculaire à la dorsale (fig.V.6) : forages 332, 333 : ~ 4 millions d'années ; forage 334 : ~ 8 millions d'années ; forage 335 : ~ 13 millions d'années.

Les données préliminaires sont présentées dans le volume 37 des Initial reports of D.S.D.P.

Echantillon Intervalle en cm	Unité Chim.	Unité Lith.	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	Total	LoI
6-2,92-94, 8A			47.34	.37	22.83	4.98	.08	5.63	15.84	1.53	.09	.05	.12	.60	.45	99.91	2.0
7-1,8-11, 1	a	I	47.73	1.07	14.26	9.39	.13	7.06	12.46	2.12	.28	.13	.27	1.2	.51	96.61	1.9
7-1,41-43, 5			45.77	.40	20.77	5.59	.10	5.60	15.45	1.53	.14	.06	.12	1.2	.3	96.93	1.9
7-1,98-100, 11			47.28	.39	21.24	5.89	.09	5.98	15.40	1.52	.11	.06		1.14	.76	99.96	
7-2,7-10, 18			49.59	1.17	13.50	10.62	.16	6.58	11.59	2.27	.37	.15	.12	1.1	.59	97.81	2.2
8-1,30-31, 4			48.77	1.17	13.99	11.59	.17	6.70	11.82	2.22	.46	.14	.28	.80	.59	98.70	1.5
8-1,95-98, 11			50.46	1.11	14.02	11.01	.17	6.91	12.21	2.20	.35	.13	.27	.50	.48	99.82	1.2
8-2,109-112, 27	b		48.44	1.06	13.73	10.47	.16	6.79	11.87	2.25	.32	.13	.26	.80	.39	96.67	1.3
9-1,67-68, 7			51.18	1.13	14.49	10.85	.17	6.90	12.09	2.25	.31	.12	.17	.70	.52	100.88	1.9
10CC,60-61, 3			49.69	1.18	14.57	11.38	.17	7.09	11.67	2.22	.47	.14	.12	.7	.78	100.18	1.7
10CC,80-81, 5			49.55	1.18	14.29	11.07	.17	6.53	11.80	N.D.	.27	.14	.19	1.7	.57		2.45
11-1,87-88, 4			49.42	.97	14.65	9.67	.16	7.85	13.03	2.15	.20	.11	.36	.8	.48	99.85	1.8
12-1,107-110, 12B		II	49.59	.91	14.59	9.66	.13	8.20	12.79	2.08	.10	.11	.06	1.8	.52	100.54	2.3
12-2,6-8, 12C			48.81	.89	14.47	9.46	.14	8.28	12.76	2.05	.18	.10		2.17	.40	99.71	
12-2,20-21, 12F <sub>P</sub>	c		49.05	.92	14.48	9.24	.16	8.19	12.87	2.24	.14	.11	.14	1.8	.54	99.88	2.3
12-2,20-21, 12F <sub>W</sub>			49.22	.90	14.68	9.32	.16	8.22	13.10	2.20	.23	.11	.08	1.5	.57	100.29	2.8
12-2,61-64, 15B			49.24	.90	14.57	9.63	.15	8.04	13.31	2.28	.17	.10	.1	1.20	.61	100.30	2.0
13-1,114-115, 1			49.47	1.05	14.56	10.17	.15	7.30	12.40	2.23	.28	.14	.09	.9	.58	99.32	1.60
14-1,123-126, 12			49.50	1.04	13.87	10.23	.12	7.09	12.04	2.22	.44	.12	.13	.9	.56	98.26	2.6
15CC, 1			49.19	1.04	14.80	10.01	.16	7.59	12.76	2.03	.31	.11	.09	.40	.48	98.97	.9
16-1,124-125, 11			50.71	1.16	14.53	10.00	.18	7.25	12.24	2.37	.25	.13	.10	.5	.54	99.96	1.0
17-1,72-73, 9	d		48.70	1.23	14.84	10.44	.17	8.09	12.27	2.15	.15	.12	.09	.7	.50	99.45	1.1
18CC, 1			50.47	1.03	14.63	10.73	.15	7.96	12.18	2.11	.16	.12	.09	.00	.37	100.00	.4
19-1,35-36, 1		IIIa	49.54	1.03	14.01	10.48	.16	7.10	12.51	2.25	.34	.11	.20	.40	.71	98.84	1.3
20-2,112-113, 7			49.48	1.03	14.51	9.99	.15	7.86	12.40	2.22	.18	.12	.06	1.3	.65	99.95	2.3
21-1,57-60, 4			49.61	.99	14.60	9.14	.14	7.89	12.69	2.19	.20	.12	.24	.7	.43	98.94	1.6

Tableau V.5a:

Leg 37, site 332, forage 332A, éléments majeurs.

Echantillon Intervalle en cm	Unité Chim.	Unité Lith.	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	Total	LoI
22-1,136-137, 16			49.37	1.22	14.51	11.24	.17	7.29	12.08	2.20	.38	.14	.12	1.0	.66	100.38	1.9
23-1,100-105, 14	e1	IIIb	50.17	1.23	14.38	11.15	.16	6.58	11.49	2.17	.39	.12	.34	.8	.58	99.56	2.07
24-1,120-125, 2A			50.40	1.08	14.55	10.45	.15	7.69	12.38	2.07	.24	.13	.20	.7	.47	100.51	1.6
25-1,36-37, 3			49.05	1.19	13.91	11.25	.16	7.22	11.85	2.36	.34	.12	.12	1.0	.58	99.15	1.4
26-1,39-42, 2			49.02	1.23	14.53	10.35	.16	7.24	12.19	2.26	.31	.15	.34	1.3	.52	99.60	2.6
27-1,35-36, 6			49.03	1.25	14.65	11.22	.17	7.64	12.14	2.21	.33	.16	.17	.7	.47	100.14	1.2
28-1,26-29, 3			48.56	1.04	16.44	9.35	.15	7.39	12.66	2.19	.27	.16	.19	1.5	.61	100.51	2.7
28-1,91-96, 11	e2	IV	48.25	1.20	14.49	11.17	.17	7.60	12.25	2.25	.20	.17	.20	.6	.45	99.00	1.1
28-2,59-62, 9			48.73	1.18	13.82	11.17	.17	7.18	11.78	2.22	.30	.15	.06	1.6	.69	99.05	2.8
28-3,28-31, 2			49.09	1.22	13.92	11.25	.17	7.23	12.12	2.22	.37	.15	.06	1.6	.69	100.09	2.8
29-1,13-14, 2			47.12	1.27	15.06	11.19	.16	6.99	13.27	2.35	.26	.17	.71	.3	.48	99.33	1.2
29-1,26-29, 5			49.94	1.03	16.02	9.06	.15	6.63	12.80	2.09	.36	.12	.14	.5	.46	99.30	1.18
30-2,61-65, 28A			47.72	1.03	16.58	9.88	.15	7.40	12.89	1.84	.30	.14	.09	.7	.42	99.14	1.1
31-1,23-24, 3			49.22	1.03	16.35	9.79	.15	6.46	12.66	2.29	.36	.13	.07	.5	.59	99.60	1.2
32-1,108-111, 14A			49.48	1.22	15.18	10.65	.16	7.65	12.18	2.07	.39	.13	.05	.8	.57	100.43	1.5
33-1,115-116, 2			48.33	1.02	16.96	9.27	.15	7.24	13.09	2.13	.17	.13	.08	.7	.49	99.76	1.2
33-2,61-64, 7			49.61	1.02	14.53	9.00	.14	7.02	12.34	2.14	.12	.13	.15	.3	.68	97.18	1.6
33-2,95-100, 12			48.91	1.07	14.20	11.18	.17	7.00	11.96	2.18	.19	.14		2.21	.55	99.76	
33-2,99-103, 13	f	V	49.40	1.00	16.20	9.41	.15	7.26	13.00	2.07	.25	.13		.72	.49	100.08	
34-2,136-139, 17			48.49	1.08	14.70	10.15	.17	7.16	13.70	2.11	.23	.14	1.27	.2	.33	100.03	2.0
36-1,66-69, 9			48.31	1.06	16.75	9.42	.15	7.03	13.18	2.06	.25	.13	.09	1.3	.65	100.38	1.3
37-1,141-144, 8			49.73	1.12	14.37	10.97	.17	7.62	11.97	2.17	.16	.15	.28	.4	.47	99.58	2.3
39-1,38-41, 6			50.00	1.02	16.01	9.78	.15	6.92	12.73	2.19	.20	.12	.11	.5	.56	100.29	1.74
40-1,30-31, 3			47.77	1.08	14.57	11.23	.17	7.31	12.43	2.11	.13	.13	.47	2.0	.81	100.21	3.8
40-1,121-124, 11		VI	48.18	.56	16.90	7.26	.11	8.83	15.26	1.48	.23	.08	.81	.5	.56	100.76	2.3
40-2,132-134, 8	g		49.55	1.18	14.32	11.63	.18	7.28	11.57	2.18	.27	.14	.33	1.4	.72	100.75	1.9
40-3,90-95, 7			47.05	.52	14.57	6.74	.11	11.12	13.73	1.40	.08	.07	.58	.6	.39	96.96	2.02

Tableau V.5a: (suite)

Leg 37, site 332, forage 332A, éléments majeurs. (suite).

		Unité	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
Méthode analytique			XRF	AA	XRF	XRF	XRF	AA	XRF	AA	AA
6-2	8A (92-94)		2220	135	265	620	35250	25	85	68	27
7-1	1 (8-11)	a	6530	265	200	1010	67000	43	90	90	71
7-1	5 (41-43)		2460	165	320	775	39800	33	76	76	31
7-2	18 (7-10)		7130	300	85	1240	75680	43	51	79	73
8-1	4 (30-31)		7130	300	82	1320	82250	43	53	64	73
8-1	11 (95-98)		6710	265	55	1380	77990	36	55	90	71
8-2	27 (109-112)	b	6470	300	55	1240	74350	43	49	86	71
9-1	7 (67-68)		6890	290	55	1320	76940	52	73	73	76
10CC	3 (60-61)		7190	300	50	1320	30930	38	46	72	78
10CC	5 (78-81)		7250			1320	79380				
11-1	4 (87-88)		5940	265	100	1260	68750	45	74	86	67
12-1	12B (107-110)		5580	250	107	1000	69250	43	76	92	61
12-2	12FF (20-21)	c	5540	265	132	1240	66300	41	72	90	64
12-			5520	265	115	1240	66660	41	70	86	63
12-2	15B (61-64)		5520	265	112	1160	68680	41	70	90	60
13-1	1 (114-115)		6410	270	107	1220	72320	41	50	69	70
14-1	12 (123-126)		6350	265	85	1240	72740	43	68	90	66
15CC	1 (0-0)		6290	270	130	1220	70710	43	76	74	65
16-1	11 (124-125)		7010	270	62	1350	70780	50	73	80	74
17-1	9 (72-73)	d	7490	270	57	1280	74000	45	52	76	74
18CC	(0-0)		6170	275	80	1240	75400	38	60	79	67
19-1	1 (35-36)		6290	285	100	1240	74280	41	62	76	66
20-2	7 (112-113)		6290	275	225	1160	71340	43	91	90	71
21-1	4 (57-60)		6000	255	85	1080	64840	38	72	86	62
22-1	16 (136-137)		7430	295	62		80020	41	65	69	72
23-1	14 (100-105)		7490	295	52	1320	79450	41	40	72	75
24-1	2A (120-125)	e1	6590	275	95	1320	74140	64	164	110	68
25-1	3 (36-37)		7250	280	47	1200	80000	45	49	79	75
26-1	2 (39-42)		7550	280	215	1280	79530	41	126	66	75
28-1	3 (26-29)		6350	280	215	1230	66940	43	85	67	76
28-1	11 (91-96)		7310	280	210	1280	79100	43	75	61	75
28-2	9 (59-62)	e2	7250	275	210	1320	80010	38	87	62	73
28-3	2 (28-31)		7430	280	215	1280	78690	43	85	65	78
29-1	2 (13-14)		7730	280	225	1220	79450	37	72	55	77
29-1	5 (26-29)		6230	235	225	1150	64070	41	100	70	65
30-2	28A (61-65)		6230	235	200	1160	69940	38	68	62	62
31-1	3 (23-24)		6230	235	200	1135	69240	37	65	63	64
32-1	14A (107-111)		7430	245	225	1240	75540	38	68	69	61
33-1	2 (115-116)		6170	240	200	1070	65680	41	113.5	65	64
33-2	7 (61-64)	f	6170	245	205	1080	63650	41	70	72	62
34-2	17 (136-139)		6590	242	215	1290	72320	37	57	68	69
36-1	9 (66-69)		6470	235	220	1160	67280	36	89	65	62
37-1	8 (141-144)		6770	265	232	1320	77640	54	181	69	73
39-1	6 (38-41)		6170	240	205	1150	69250	36	62	65	63
40-1	3 (30-31)		6710	275	92	1320	81200	49	88	54	72
40-1	11 (121-124)		3420	190	700	860	51760	36	137	52	40
40-2	8 (132-134)	g	7250	275	52	1390	83370	51	50	69	76
				280				59	60	76	
40-3	7 (90-95)		3180	180	812	900	47910	41	206	71	42

Tableau V.5b:

Leg 37, site 332, forage 332A, éléments trace (en ppm).

Echantillon Intervalle en cm	Unité Chim.	Unité Lith.	Prof. (m)	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	Total	LoI	
2-1,21-24, 3A	a	I	151.72	47.10	.37	21.83	5.6	.09	7.08	15.12	1.53	.03	.05	.12	.7	.84	100.46	1.7	
2-3,31-34, 4			154.83	48.26	.55	15.59	7.89	.14	9.08	15.40	1.72	.16	.06	.78	.2	.32	100.15	1.2	
2-3,64-67, 6			155.16	48.85	.44	19.68	6.87	.11	7.22	14.77	1.67	.16	.06	.17	.4	.54	100.94	1.2	
3-1,100-103, 8A			200.01	47.5	.32	22.92	4.96	.08	6.70	15.14	1.30	.03	.07	.05	.5	.89	100.46	1.7	
3-4,109-112, 5	b		204.61	50.43	1.11	14.73	9.89	.17	7.12	12.57	2.09	.33	.13	.1	.4	.62	99.69	1.2	
4-1,100-103			228.51	49.31	1.07	14.54	9.78	.17	8.35	12.35	1.98	.18	.12	.12	.9	.76	99.63	2.0	
6-1,18-21, 2	c	II	284.70	48.72	1.15	13.93	11.42	.18	7.00	11.96	N.D.	.23		.23	.6	.55		.7	
6-1,77-80, 9C			285.29	49.09	1.13	13.94	10.87	.17	6.90	12.24	2.24	.39	.12	.2	.6	.61	98.50	1.5	
6-2,122-125, 13			287.24	48.05	1.05	13.66	11.12	.17	7.36	11.09	2.62	.33	.13	.09	1.8	1.24	98.71	3.5	
6-3,87-90, 10			288.39	49.36	1.13	14.16	12.00	.18	7.08	11.93	2.26	.48	.12	.36	.5	.82	100.38	2.0	
8-1,14-17, 2	d	IIIa	322.66	48.50	1.05	16.13	9.39	.15	7.08	12.74	2.01	.26	.14	.1	.7	.82	99.07	1.8	
9-1,18-21, 2			332.20	48.46	1.05	16.18	9.50	.15	7.20	12.81	2.09	.25	.14	.09	.6	.61	99.13	1.5	
10-1,62-65, 8			351.64	49.50	1.04	15.41	10.06	.16	7.11	12.68	2.02	.35	.13	.22	.5	.48	99.66	1.2	
10-1,133-136, 16			352.35	45.36	1.01	15.09	9.82	.18	6.73	15.22	2.16	.25	.14	2.34	1.	.55	99.85	4.3	
11-4,105-108, 6B			366.07	50.14	1.02	16.06	8.90	.14	7.39	12.76	2.08	.18	.13	.1	.9	.49	100.29	1.6	
12-1,60-62, 8			IIIb		370.61	49.86	1.04	15.86	9.68	.16	7.04	12.79	1.95	.27	.13	.07	.4	.41	99.66
15-2,83-85, 9	400.84	49.52			1.00	16.21	9.22	.14	6.88	12.95	1.98	.25	.14	.2	.8	.74	100.03	1.8	
16-2,31-33, 4	e	IV	409.82	47.71	.74	14.24	10.25	.14	11.22	11.05	2.03	.12	.08	.19	1.4	.84	100.01	2.7	
18-1,43-45, 5			427.44	47.24	.74	13.82	10.44	.15	12.45	11.18	2.40	.17	.08	.37	.8	.81	100.65	2.2	
21-1,11-14, 1A			455.63	46.04	.57	13.71	10.01	.15	13.71	10.61	1.84	.09	.04	.15	.9	1.0	98.82	1.8	
22-1,4-7, 1A			465.06	43.40	.56	12.84	10.57	.15	14.37	10.94	1.63	.25	.08	1.31	1.2	1.68	98.98	4.19	
22-1,77-80, 8A	f	V	465.79	46.26	.78	15.81	10.44	.14	8.68	12.20	2.36	.11	.07	.49	1.3	.63	99.27	2.4	
22-2,43-45, 5B			466.94	47.87	.83	15.56	10.43	.15	8.47	11.84	2.35	.09	.07	.15	.7	.64	99.15	1.5	
24-1,94-96, 11			484.95	46.68	.86	16.14	10.58	.14	6.90	11.88	2.33	.2	.08	.21	1.4	1.14	98.54	2.6	
24-2,88-90, 10			486.39	47.65	.85	15.69	10.54	.17	8.57	11.66	2.38	.15	.07	.14	1.2	1.22	100.29	1.6	
25-2,77-79, 10			495.78	48.17	.88	15.79	10.69	.17	7.36	11.89	N.D.	.24			.4	.5	1.	100.29	2.4

Tableau V.6a:

Leg 37, site 332, forage 332B, éléments majeurs.

Echantillon Intervalle en cm	Unité Chim.	Unité Lith.	Prof. (m)	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	Total	LoI		
25-3,128-130, 18			497.79	46.42	.74	15.57	10.61	.15	9.92	11.32	2.10	.16	.07	.37	1.1	1.22	99.75	3.		
27-1,42-44, 6	g	VI	512.93	47.95	1.16	15.16	10.92	.17	7.68	12.35	2.53	.26	.13	.13	.7	.7	99.84	1.2		
28-2,3-6, 1			523.55	48.68	1.16	14.50	10.41	.16	6.95	11.94	2.35	.27	.13	.27	.9	.87	98.59	1.9		
29-1,58-61, 5B			532.10	42.32	.57	13.86	9.77	.18	10.58	12.83	1.98	.25	.09	4.34	.6	.75	98.12	6.6		
30-1,105-107, 13			542.06	47.33	1.11	14.56	10.24	.15	6.94	12.13	2.13	.35	.14	2.25	.6	.75	98.61	3.7		
31-1,73-76, 4			551.24	47.35	1.11	14.46	10.79	.18	6.32	11.70	2.24	.35	.15	2.76	.6	.86	98.87	4.		
32-1,27-30, 3B			560.28	49.11	1.10	14.25	10.76	.16	7.03	12.38	2.24	.25	.13	.62	.8	.94	99.77	2.8		
33-1,5-8, 1			569.57	48.06	1.05	15.01	10.08	.17	6.27	12.20	N.D.	.28		3.43	.8	.79	98.79	5.2		
33-2,27-30, 2			571.28	45.20	.59	14.91	9.66	.17	6.60	14.06	1.98	.17	.06	4.07	.7	.86	99.13	5.6		
34-1,45-48, 4			579.47	47.45	1.11	15.01	9.93	.17	7.33	12.34	2.33	.29	.14	1.55	1.40	.60	99.65	3.8		
35-2,91-94, 1L			h	VII	590.92	43.05	.40	9.11	10.47	.15	23.75	7.14	1.90	.14	.04	1.48	.6	.96	99.19	3.2
35-3,67- , 11	592.17	44.21			.54	13.24	10.18	.16	12.39	11.52	1.72	.2	.07	3.44	.6	.68	98.95	4.7		
36-3,46-48, 1F	i	VIII	601.47	45.43	.54	17.83	7.84	.12	6.52	14.40	1.80	.12	.06	1.53	1.3	1.32	98.81	4.6		
36-5,22-24, 3A			604.23	45.35	.56	17.60	7.81	.14	8.34	12.88	1.75	.14	.06	.33	1.5	2.29	98.75	4.2		
37-1,113-115, 15			608.64	45.63	.52	17.81	7.70	.13	7.89	13.28	1.74	.08	.05	.3	1.2	2.23	98.56	3.8		
37-3,23-25, 3	j	IX	610.74	46.68	.62	15.85	9.89	.15	9.72	11.98	2.23	.06	.06	.2	.6	1.96	100.00	2.8		
39-1,2-5, 1			626.53	45.91	.58	13.94	10.42	.16	12.48	10.95	N.D.	.08		.46	.3	1.76		2.6		
40-1,34-36, 3B	k	X	636.35	45.73	.93	17.23	9.96	.15	5.96	11.24	2.16	.49	.13	.41	2.7	2.22	99.31	6.1		
41-1,110-112, 7A			646.61	48.94	.87	16.86	10.51	.16	7.02	12.52	2.07	.15	.09	.08	1.3	1.13	101.70	3.0		
42-1,59-61, 3D			655.60	45.41	.58	14.34	9.59	.16	11.85	10.53	1.91	.07	.07	.23	2.7	1.48	98.92	3.1		
43-1,105-107, 8A			665.56	46.15	.71	18.61	7.87	.13	6.08	11.74	2.20	.46	.10	.11	1.0	3.94	99.10	6.4		
44-1,42-44, 3C			674.43	47.15	.86	16.43	9.46	.16	6.80	12.29	2.21	.21	.11	.13	1.8	2.24	99.85	4.0		
44-6,46-48, 1F			681.97	48.07	.94	14.29	10.11	.15	8.42	12.35	N.D.	.15		.17	1.0	.92		2.5		
45-1,54-56, 3			684.05	41.84	.84	15.79	9.79	.16	7.28	8.55	N.D.	.42		.35	6.2	5.73		13.2		
46-1,58-60, 6D			693.59	50.36	1.24	14.58	11.90	.16	7.36	11.10	1.98	.18		.13	.19	1.8	.97	101.95	3.	
47-2,95-98, 6B			704.97	48.49	1.18	14.23	11.83	.18	7.17	11.75	2.05	.07		.12	.11	1.	.73	98.91	2.1	
48-1,118-120, 9C			XI		713.19	47.44	.97	15.06	9.90	.17	8.22	12.57	2.66	.37	.12	.07	1.2	.91	99.66	1.9

Tableau V.6a: (suite)

Leg 37, site 332, forage 332B, éléments majeurs.

	Unité	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sb	Cs	Ba	La	Eu	Tb	Hf	Ta	Th	U		
Méthode analytique		NAA	XRF	AA	XRF	XRF	XRF	AA	NAA	XRF	NAA	AA	AA	NAA	NAA	XRF	XRF	XRF	NAA									
2-1	3A	27	2220	120	270	700	39870	44	31	89	95	63	35															
2-3	4	40.8	3360	180	400		55950	50	47	134	133	122	52	4.4	120			0.04	0.18	15	0.99	0.33	0.22	0.43	0.11	0.09		
2-3	6	33.2	2640	160	362	850	48610	47	39	105	107	90	42	2.6	109	13.5	25.5	1.8	0.05	0.12	1.46	0.48	0.25	0.70	0.15	0.12	0.07	
3-1	8A	23.7	1920	115	242	620	35180	20	28	81	82	60	29			9.3	15.8	2.6		1.15	0.34	0.18	0.39	0.10	0.09			
3-4	5	42.1	6720	260	85	1320	69940	41	48	58	59	89	75	4.3	144	28.9	68.3	6.7	0.03	0.12	38	5.0	0.99	0.62	1.71	0.49	0.48	
4-1	1	42.3	6540	210	112	1320	69660	38	54	100	106	75	75	3.4		29.1	62.5	8.9	0.01	0.03	32	5.4	0.9	0.56	1.79	0.60	0.58	0.24
6-1	2	41.5	7020	265	86	1390	80990	38	53	64	68	83	95	3.6	151	29.5	72.1	10.1	0.05	0.11	27	6.3	1.15	0.64	2.01	0.64	0.66	
6-1	9C	41.7	6900	240	72		77150	33	47	54	56	60	75	7.1	139	28.6	70.6	10.1	0.03	0.22	22	5.4	0.99	0.59	1.84	0.57	0.63	0.15
6-2	13	40.6	6480	240	42	1320	86290	38	50	37	39	64	76	3.2	154	28.5	58	7.4	0.04	0.24	50	4.9	0.93	0.58	1.73	0.51	0.49	0.16
6-3	10	41.8	6900	240	47	1390	85400	38	47	40	39	60	83	7.4	138	29.9	68	9.6		0.26	25	5.6	0.94	0.61	1.87	0.57	0.57	0.20
8-1	2		6420	230	230	1160	66800	50		106		70	74			25.7	58	8.8										
9-1	2	37.1	6420	220	230	1160	67350	50	43	70	72	70	68	3.9		25.6	64	8.7	0.07	0.12	38	5.1	0.90	0.56	1.74	0.57	0.52	0.15
10-1	8	36.2	6300	220	235	1240	71200	53	41	70	73	65	72	5.5	133	27.0	60	9.4	0.03	0.18	30	5.1	0.91	0.50	1.71	0.57	0.54	
10-1	16	37.5	6300	230	230		71480	50	48	75	76	65	84	4.2	134	27.0	61	9.3	0.13	0.08	53	5.2	0.87	0.51	1.79	0.56	0.54	0.25
11-4	6B	36.6	6180	245	235	1080	63230	50	42	76	77	64	73	3.6	147	25.3	60	8.5	0.02		43	5.1	0.91	0.50	1.38	0.54	0.48	
11-4	6B W <sub>2</sub> C															24.3	53	9.2										
12-1	8	36.4	6300		230	1240	68330		41	69	70			5.4	134	25.8	57	9.0	0.03	0.08	40	5.2	0.91	0.50	1.73	0.56	0.49	0.13
15-2	9		6120	220	230	1080	65600	53		84		68	66			25.1	59	9.0										
16-2	4	35	4560	170	505	1080	73510	61	64	296	324	77	66			23.1	35	5.5	0.06	0.04		3.8	0.66	0.41	1.06	0.34	0.35	0.07
18-1	5	33.9	4500	170	520	1160	74490	60	63	340	393	80	62	3.5		19.8	35	5.8	0.04	0.08	6	3.4	0.62	0.36	1.05	0.32	0.31	0.17
18-1	5 W <sub>2</sub> C															18.7	43	6.3										
21-1	1A		3480	150	480	1160	71480	46	62	363		83	65			16.6	32	2.8										
22-1	1A	31.9	3480	145	520		77150	46	64	430	419	78	60			15.7	28	3.3	0.02	0.05	17	1.9	0.52	0.31	0.66	0.18	0.16	
22-1	8A	34	4800	170	335		74840	40	51	162	174	78	64			21.6	44	4.0	0.03		7	2.6	0.79	0.41	1.15	0.27	0.29	
22-2	5B	34.3	5040	165	382	1160	74070	40	48	146	156	75	70			21.7	43	5.6	0.03	0.03	14	2.76	0.67	0.43	1.16	0.27	0.23	
24-1	11	36.3	5280	175	362	1080	76100	46	53	142	155	95	70	3.7		23.1	51	4.7	0.13	0.07	9	2.9	0.74	0.44	1.27	0.28	0.28	0.23
24-2	10	35.3	5220	160	380	1320	75680	50	48	140	153	77	67			22.9	44	4.6	0.03	0.05		2.78	0.73	0.47	1.08	0.27	0.30	
25-3	18	32.6	4560		487	1160	76240		58	282	312					20.2	36	4.7	0.19	0.13		2.2	0.57	0.39	1.06	0.27	0.22	0.13
27-1	6	39.7	7080	240	182	1320	76520	50	49	84	86	70	76	3.8	123	14.2	64	2.8	0.02	0.11	43	5.5	1.06	0.60	1.77	0.58	0.64	
28-2	1	41.2	7140	260	185	1240	74350	51	45	69	69	72	78	3.8	153	35.9	39	11.5	0.25	0.15	36	6.1	1.0	0.62	1.86	0.64	0.65	
29-1	5B		3660	195	710	1390	73020	62		333		69	57			17.6	67	3.5										
29-1	5B W <sub>2</sub> C															17.1	35	3.8										
30-1	13	40	6900	250	192	1160	74280	50	47.3	75	80	65	78	5.1	74	29.4	63	9.6	0.03	0.07	41	5.7	1.08	0.53	1.99	0.60	0.64	
31-1	4		6960													29.0	72	10.5										
32-1	3B		6780		325	1240	77150			74						27.3	67	9.7										
33-1	1		6660	225	150	1390	74210	43		109		65	73			28.2	74	8.8										
33-2	2	34.1	3720	160	700	1390	71620	41	56	238	245	38	60	2.6		17.6	31	3.5	0.15	0.21	23	2.3	0.59	0.24	0.96	0.20	0.17	
34-1	4	40.8	6900	250	182	1240	72040	50	44	85	85	32	82	5.6	155	29.3	77	9.0	0.09	0.30	30	5.8	0.95	0.56	1.56	0.57	0.54	

Tableau V.6b:

Leg 37, site 332, forage 332B, éléments trace (en ppm).

	Unité	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sb	Cs	Ba	La	Eu	Tb	Hf	Ta	Th	U		
Méthode analytique		NAA	XRF	AA	XRF	XRF	XRF	AA	NAA	XRF	NAA	AA	AA	NAA	NAA	XRF	XRF	XRF	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	
35-2	12		2400	90	900	1160	75540	62		944		59	49			9.8	21	2.2										
35-3	11	33.2	3420	135	600	1240	74770	60	68	458	510	85	59	3.1		15.1	32	3.5	0.07	0.15	4	1.74	0.5	0.33	0.81	0.18	0.16	0.04
36-3	1F	36.9	3360	160	457	930	57210	43	42	125	126	71	47		149	16.5	31	3.5	0.02	0.04		2.0	0.54	0.33	0.64	0.19	0.17	
36-5	3A	34.2	3360	175	425	1080	57000	37	40	115	122	71	43	2.5		15.3	42	2.7	0.03	0.02	15	1.77	0.54	0.22	0.81	0.18	0.12	0.15
37-1	15	34.5	3240	160	447	1000	55950	42	42	115	128	65	44			14.9	38	3.2	0.03			1.89	0.54	0.29	0.77	0.17	0.16	
37-1	15 W <sub>2</sub> C															15.1	25	3.2										
37-3	3		3840	183	700	1160	71130	52		357		55	56			17.5	25	4.1										
39-1	1	33.6	3600	160	750	1240	74770	39	58	289	345	84	56			17.8	35	4.1	0.24	0.03	10	2.01	0.51	0.32	0.99	0.19	0.16	
40-1	3B	40.2	5880	230	250	1160	73580	45	44	75	75	95	65	7.4	146	22.2	62	8.0	0.39	0.21								

Echantillon Intervalle en cm	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	Total	LoI	
1-3,46-48, 5B	48.18	.98	14.43	9.27	.14	9.75	12.25	1.85	.10	.13	.13	1.26	1.08	99.55	2.28	
3-1,62-64, 7A	47.41	.80	16.65	9.32	.14	7.64	12.84	2.15	.06	.09	.14	1.3	.60	99.14	2.0	
6-1,16-18, 2	47.18	1.27	14.43	11.03	.16	7.90	11.52	2.13	.18	.18	.17	1.27	1.09	98.51	2.4	
6-2,53-55, 6	47.53	.79	16.06	8.88	.16	8.74	13.62	1.67	.14	.09	.24	.8	.88	99.60	1.8	
7-2,66-68, 10	47.76	1.22	15.12	11.12	.18	7.09	12.42	2.16	.23	.16	.23	.5	.79	98.98	2.27	
8-1,91-93, 12	48.80	1.28	14.98	11.41	.19	7.39	12.17	2.25	.3	.17		1.08	.35	100.37		
8-2,92-94, 12	46.87	1.18	15.04	11.39	.18	7.71	12.15	2.15	.15	.14	.10		1.24	1.01	99.31	2.78
8-3,111-113, 12	46.72	.65	15.39	7.79	.16	7.60	14.26	2.09	.57	.09		1.66	3.37	100.35		
8-5,118-120, 12	45.01	.68	15.04	8.27	.13	8.18	15.62	1.95	.21	.09	2.70	1.15	.99	100.02	5.05	
9-3,57-59, 6	47.38	1.00	15.21	10.19	.18	8.09	12.48	2.16	.14		.12	1.47	.92	99.34	2.7	
9-4,23-25, 3	47.29	.54	16.72	7.52	.13	8.16	14.02	2.17	.05		.42	1.47	1.01	99.50	3.87	
10-1,31-34, 4B	48.38	1.17	14.67	10.46	.14	7.87	10.77	2.23	.14		.26	1.46	1.13	98.68	2.97	
10-1,124-127, 12	47.88	1.09	15.88	9.66	.13	7.67	12.04	2.15	.20		.14	1.67	1.06	99.57	3.06	
10-2,106-109, 11	49.54	1.08	15.86	9.59	.13	7.25	12.24	2.05	.23	.13		1.41	.68	100.19		
11-2,30-32, 3A	47.97	1.13	14.65	10.4	.16	7.78	12.10	2.08	.11	.13	.16	1.55	.98	99.24	2.7	

Tableau V.7a:

Leg 37, site 333, forage 333A, éléments majeurs.

		Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
Méthode analytique		XRF	AA	XRF	XRF	XRF	AA	XRF	AA	AA
1-3	5B 46-48	6000	220	466	1080	66440	46	180	75	62
3-1	7A 62-64	4920	255	175	1080	66500	34	63	66	64
6-1	2 16-18	7800	220	217	1240	79170	37	76	45	86
6-2	6 53-55	4800	220	275	1240	63225	42	104		60
7-2	10 66-68	7440	255	205	1390	78960	51	81	71	83
8-1	12 91-93	7790	260	217	1470	80800	51	81	70	78
8-2	12 92-94	7260		220	1390	81550	44	70	50	84
8-3	12 111-113	4090	170	320	1240	57250	44	104	32	52
8-5	12 118-120	4260	200	395	1000	60780	47	124	53	62
9-3	6 57-59	6180	255	142	1390	73090	54	81	130	72
9-4	3	3360	170	520	1000	54200	37	129	86	45
10-1	4B 31-34	7200	255	175	1080	75325	37	62	59	71
10-1	12 124-127	6720	270	322	1000	69590	41	116	71	77
10-2	11 106-109	6600	255	337	1000	68410	44	120	65	70
11-2	3A 30-32	6960	265	292	1240	75045	40	89	55	77

Tableau V.7b:

Leg 37, site 333, forage 333A, éléments trace (en ppm).

Echantillon Intervalle en cm	Unité Chim.	Unité Lith.	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	Total	LoI
15-2,30-32, 4			49.49	.85	15.54	10.25	.16	7.52	12.52	1.89	.31		.24	.2	.57	99.54	2.16
16-1,22-25, 2			50.37	.88	15.67	10.19	.16	7.44	12.49	1.93	.37	.11		.56	.28	100.45	
16-2,109-112, 12A	a		49.90	.86	15.43	9.64	.16	7.64	12.47	2.03	.25	.10		.92	.47	99.87	
16-3,16-19, 2A			49.05	.84	15.46	10.22	.15	8.00	12.27	2.13	.19	.08	.04	.8	.67	99.90	1:57
		I															
16-4,7-10, 1			48.94	.73	14.63	9.98	.16	8.50	13.28	1.68	.17	.07	.22	.5	.42	99.28	1.07
16-4,110-113, 7D			49.91	.73	14.88	10.12	.16	8.28	13.13	1.80	.23	.08		.58	.20	100.10	
17-3,3-6, 1	b		49.75	.74	14.67	10.01	.17	8.51	12.93	1.72	.18	.08		.43	.07	99.26	
20-2,16-18, 1A			49.08	.74	14.61	9.85	.16	8.99	13.00	1.88	.1	.07	.07	.6	.58	99.73	1.2
		II															
21-1,47-49, 5			49.52	.11	18.00	5.66	.11	10.14	15.01	N.D.	.01		.03	.2	.33		
22-2,61-63, 5			40.99	.05	4.13	10.02	.14	34.58	2.14	.10	.02	.01	.11	.5	6.44	99.23	6.7
23-1,127-129, 13			49.16	.15	16.09	7.99	.16	10.33	13.90	1.27	.02	.01	.07	.2	.42	99.77	.5
24-3,112-114, 10	c		49.50	.09	12.20	5.42	.12	17.52	12.37	.49	.01	.03	.06	.2	1.34	99.35	1.7
24-4,95-97, 10			45.50	.07	11.30	6.33	.11	19.73	11.80	.29	.03	.02	.11	.3	3.81	99.4	3.9
26-1,20-22, 3			39.24	.05	4.72	8.99	.12	34.27	3.12	.13	.00	.01	.31	.6	7.2	98.76	8.1

Tableau V.8a:

Leg 37, site 334, forage 334, éléments majeurs.

Méthode analytique	Unité	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Y	Zr	Nb	Sb	Cs	Ba	Eu	Tb	Hf	Ta	Th		
		NAA	XRF	AA	XRF	XRF	XRF	AA	NAA	XRF	NAA	AA	AA	NAA	XRF	XRF	XRF	NAA							
15-2 4			5160	235	275	1240	73435	41		118	75	71		26.9	53	8.2									
16-1 2	a	35.7	5280	255	262	1240	71930	44	42	110	109	74	78	5.9	27.3	44	7.8	0.03	0.10	28	0.71	0.52	1.33	0.46	0.53
16-2 12A		35.7	5160	245	265	1240	68000	44	46	124	153	71	71	5.2	27.5	52	8.2	0.03	0.04	31	0.74	0.50	1.31	0.46	0.52
16-3 2A			5100	260	270	1160	72555	43		113	67	75		26.2	42	8.7									
16-4 1			4440	245	200	1240	70600	47		142	87	72		22.2	43	6.2									
16-4 7D	b		4380	245	200	1240	71000	41		86	86	67		22.5	42	6.0									
17-3 1			4440	220	192	1320	70400	47		78	90	66		23.5	35	6.1									
20-2 1A		40.6	4500	245	180	1240	69690	46	49	89	91	87	76	22.1	41	8.1	0.02	0.03	44	0.64	0.46	1.17	0.37	0.49	
21-1 5			660	135	700	852	39770	38		202	83	34		27.2	5	1.3									
22-2 5			300	35	4474	1085	75352	80		1340	46	36		0	8	0.3									
23-1 13			900	160	415	1240	56270	40		158	40	47		5	11	0.4									
24-3 10	c		540	110	1800	930	38515	38		475	79	26		2.4	3	0.6									
24-4 10			420	80	1900	852	46203	49		755	102	28		1.9	9	1.7									
26-1 3			300	35	6170	930	68360	58		1856	16	32		0	5	1.0									

Tableau V.8b:

Leg 37, site 334, forage 334, éléments trace (en ppm).

Echantillon Intervalle en cm	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	Total	LoI
5-3,55-57, 2	48.20	1.14	14.70	10.73	.16	8.33	11.41	2.35	.36	.10	.13	1.0	.89	99.50	1.64
7-2,10-12, 2C	47.07	1.16	15.43	9.79	.14	7.72	11.83	2.46	.23	.12	.42	1.6	1.52	99.49	3.54
9-1,26-28, 2	46.23	1.17	15.88	10.52	.17	7.43	12.19	2.40	.24	.10	.24	1.95	1.3	99.82	3.50
11-1,13-15, 1	45.08	.98	14.78	9.45	.16	7.06	14.72	2.35	.37	.11	3.33	1.15	1.4	100.94	6.0
13-3,24-26, 1B	46.07	1.09	15.74	10.25	.16	6.35	13.88	2.50	.33	.11	1.63	1.4	2.18	101.69	4.56
16-1,22-24, 3	48.66	1.11	15.57	10.35	.17	8.81	12.35	2.31	.3	.12	.24	1.12	.74	101.85	2.3

Tableau V.9a:

Leg 37, site 335, forage 335, éléments majeurs.

Méthode analytique	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Y	Zr	Nb	Sb	Cs	Ba	Eu	Tb	Hf	Ta	Th		
	NAA	XRF	AA	XRF	XRF	XRF	AA	NAA	XRF	NAA	AA	AA	NAA	XRF	XRF	XRF	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	
5-3 3	37.2	6960	255	342	1240	76540	42	44	129	146	58	75	5.1	34.2	56	3.7	0.01	0.12	18	1.01	0.70	1.73	0.19	0.24
7-2 2C	36.4	7200	255	345	1085	70940	47	47	152	163	63	77	5.9	33.1	64	4.6	0.05	0.21		0.99	0.71	1.79	0.19	0.22
9-1 2	37.3	7260	275	357	1395	76190	40	49	147	180	62	78	1.5	34.9	57	4.5	0.16	0.03		1.03	0.71	1.82	0.19	0.23
11-1 1	35.1	5240	220	305	1317	70180	36	42	143	147	54	57	9.3	31.4	56	3.4	0.23	0.41	17	0.94	0.63	1.68	0.17	0.18
13-3 1B	37.2	5960	275	335	1317	75630	48	43	142	142	62	70	5.1	35.5	60	4.9	0.18	0.37	31	1.01	0.67	1.77	0.18	0.21
16-1 3	37.4	6780	275	392	1317	73885	44	47	199	181	59	76	2.9	32.5	60	3.9	0.02	0.28	27	0.98	0.66	1.65	0.17	0.20

Tableau V.9b:

Leg 37, site 335, forage 335, éléments trace (en ppm).

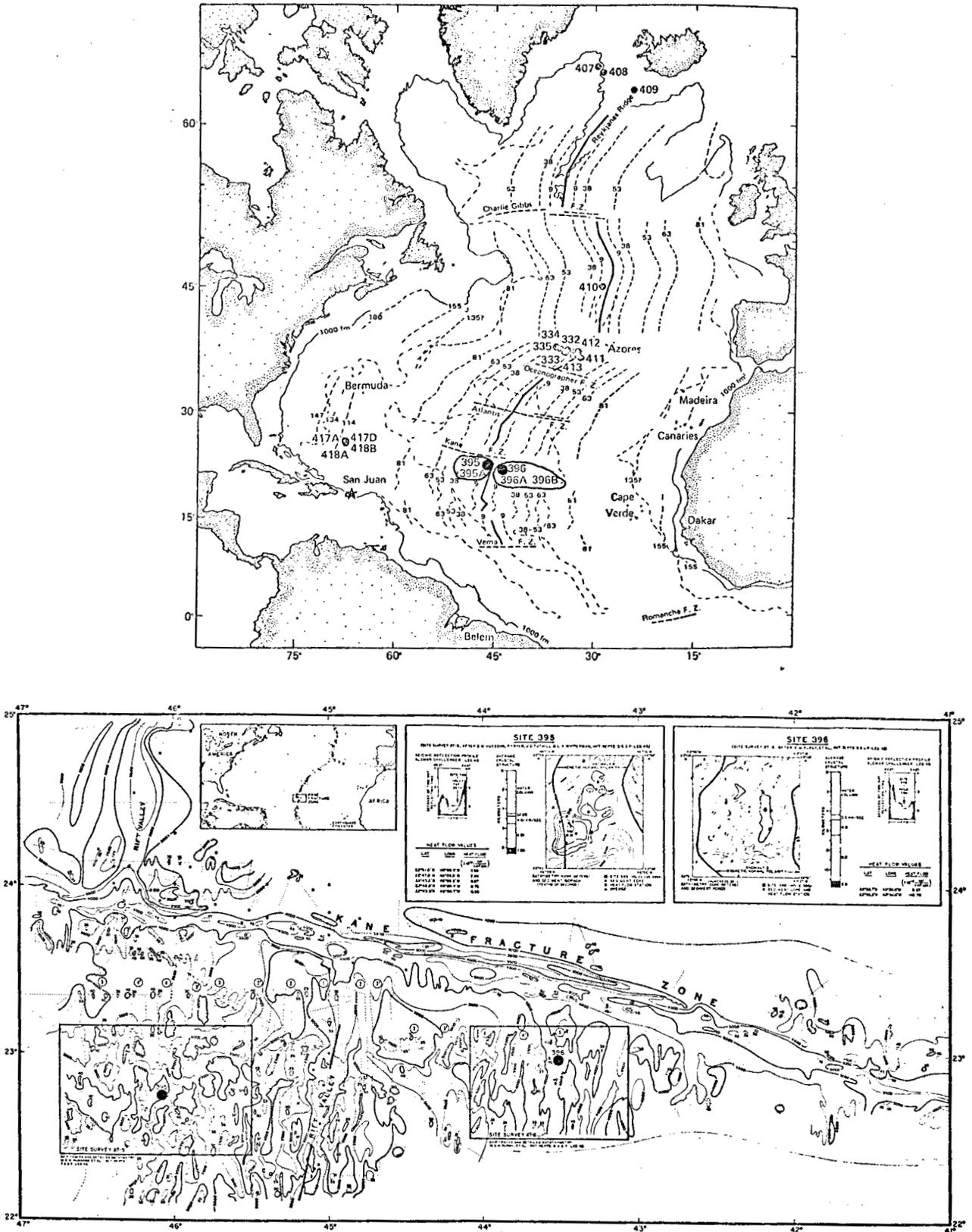


Figure V.7: Sites de forage du leg 45 et 46 de D.S.D.P.

## D.S.D.P. : I.P.O.D. leg 45 (et 46)

-----

Les données préliminaires (géophysiques, géochimiques) obtenues au voisinage de 23°N dans l'Atlantique permettaient de considérer cette partie de la dorsale et de la croûte océanique comme représentative structurellement et géochimiquement d'un système d'ouverture lente, non influencé par la contribution d'un "panache" tel qu'il peut être évoqué pour l'Islande ou les Açores (Morgan 1971, 1972 ; Hart et Schilling, 1973). Les legs 45 et 46 constituent un essai de forer aussi profond que possible dans ce type de croûte océanique ; ils font également partie d'un programme plus important à plus long terme dont le but est d'étudier les variations des propriétés de la croûte océanique et son évolution en fonction du temps. Ce programme n'est aujourd'hui qu'en partie réalisé par les forages 417 - 418 des legs 51, 52, 53 à 110 millions d'années.

Les sites forés pendant ce leg (et le leg 46) sont situés de part et d'autre de la dorsale à la latitude de 22° 40'. Le site 395, à l'Ouest, correspond à l'anomalie magnétique 4 ; le site 396, à l'Est, correspond à l'anomalie magnétique 5 (8.7 - 10 millions d'années). Les positions de ces sites sont indiquées figure V.7. La figure donne une indication sur les différentes unités basaltiques rencontrées.

Les échantillons correspondant à ces deux sites sont très semblables du point de vue rapports isotopiques et distribution d'éléments à faibles coefficients de partage ; ils correspondent à des basaltes "typiquement appauvris".

Les données préliminaires mettant en évidence la différence entre les échantillons des sites 395 et 396 et ceux de la zone FAMOUS, expliquée en terme de matériau source, sont publiées par Bougault et al. (1979).

Echantillon Intervalle en cm	Profondeur	Unité	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	LoI
10, CC ( 1 )	93		43.6	1.26	9.95	.93	0.13	43.7	.03	0.00	0.02	0.03	0.01	98.73	-13.8
10, CC ( 2 )	93		45.7	24.24	3.81		0.07	13.9	12.61	1.15	0.08	0.04	0.02	101.62	- 4.2
10, CC ( 3 )	93		44.8	6.27	10.66	4.35	0.10	35.3	1.85	0.00	0.02	0.09	0.02	99.11	-11.6
11-1, 105-107	101	A2*	48.9	15.93	12.83	6.96	0.20	6.8	11.01	2.88	0.22	1.70	0.18	100.65	- 0.9
11-2, 62-64	102		49.3	14.88	11.95		0.18	8.5	10.49	2.83	0.09	1.61	0.15	99.98	- 1.1
12-2, 109-111	112		49.8	15.11	11.90	8.10	0.18	8.9	10.50	2.85	0.09	1.61	0.13	101.07	- 1.3
14-1, 112-114	131		47.01	16.79	13.76		0.20	6.64	10.93	2.90	0.28	1.83	0.22	100.36	- 8.7
14-1, 131-132	131	A2*	49.7	14.94	11.97	7.53	0.17	8.3	10.56	2.88	0.13	1.63	0.15	100.43	- 1.2
15-1, 71-73	139		49.81	15.11	11.76		0.17	7.47	10.92	2.85	0.25	1.61	0.14	100.09	- 9.5
15-1, 112-115	139		49.1	15.01	12.05		0.17	8.6	10.53	2.88	0.10	1.62	0.15	100.21	- 1.5
15-2, 130-133	140		49.0	14.75	12.22		0.18	8.5	10.54	2.85	0.13	1.62	0.15	99.94	- 0.8
17-1, 56-59	159		50.2	17.71	6.52	4.62	0.11	12.2	9.32	3.53	0.20	0.39	0.02	100.20	- 4.9
18-1, 37-41	166	P1*	49.4	17.32	8.62	5.67	0.14	8.5	12.58	2.38	0.07	1.01	0.10	100.12	- 1.4
18-1, 61-70	167		43.1	.91	10.25	4.55	0.11	44.3	.89	0.03	0.00	0.03	0.02	99.64	- 7.6
18-2, 33-38	168	P1*	49.4	18.21	8.37		0.14	7.9	12.85	2.33	0.13	1.02	0.12	100.47	- 0.6
18-2, 85-95	169		43.4	1.37	9.36	3.10	0.10	42.0	2.09	0.00	0.00	0.04	0.00	98.36	- 9.1
19-1, 18-20	177	A2*	49.8	15.08	11.05	7.41	0.19	8.5	11.25	2.75	0.31	1.65	0.16	100.84	- 1.0
20-1, 32-36	185	P2*	49.6	18.77	9.52	4.47	0.14	6.1	12.05	2.79	0.30	1.28	0.15	100.68	- 1.5

Tableau V.10a: 22°N

Leg 45, site 395, forage 395, éléments majeurs.

Elément	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Zr	Sb	Cs	La	Eu	Tb	Hf	Ta	Th				
Méthode d'analyse	NAA	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	NAA	XRF	NAA	AA	AA	NAA	XRF	XRF	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA			
Echantillon Intervalle en cm	Unité																								
10, CC 1	8.25	180	49	2805	1007	69650	111	99.6	2160	1716	12	45		6	3	<27	0.189	<0.027	<0.84	<0.057	<0.014	<0.14	<0.008	0.05	
10, CC 2	1.92	240	3.6	323	542	26670	39	41.6	554	563	50	17		99	8	<14		<0.015	0.11	0.15	0.008	<0.067	<0.004	0.015	
10, CC 3		540	34	1071	774	74620	104		1128		91	39		4	4										
11-1, 105-107	A2*	38.4	10200	301	279	1548	80810	48	49.3	161	160	69	92	3.3	127	121	112	0.50	0.099	3.25	1.5	0.87	2.84	0.200	0.137
11-2, 62-64		36.6	9660	263.7	271	1394	83650	48	40.4	173	190	68	81	<1.4	119	112	126	0.020	0.024	3.2	1.33	0.82	2.71	0.183	0.132
12-2, 109-111		37.3	9660	266	269	1394	83300	47	49.6	172	189	68	85	<0.9	120	119	120	0.016	0.037	2.12	1.42	0.83	2.73	0.194	0.137
14-1, 112-114		40.8	10980	323	274	1548	96320	49	48.8	183	65	101													
14-1, 131-132	A2*	37.3	9780	269	269	1316	83790	49	49.9	177	186	70	87	4.1	120	114	137	0.98	0.027	3.6	1.49	0.93	3.18	0.207	0.141
15-1, 71-73		38	9660	274	279	1316	83720	51	49.9	181	64	84		2.4	120	114	136	0.017	0.08	3.1	1.36	0.84	2.86	0.193	0.134
15-2, 130-133		37.9	9720	266	265	1316	85540	48	50.4	182	186	68	89	<1.1	118	116	108	0.018	0.05	4.1	1.40	0.83	2.83	0.192	0.138
16-2, 104-105		36.9	9780	270	267	1394	85820	49	48.9	176	183	69	87	1.9	118	116	112	0.015	0.020	3.4	1.45	0.85	2.88	0.187	0.130
17-1, 50-69		35.2	2340	153	165	852	45640	40	43	155	170	0	19	<1.8	118	120	108	0.033	0.036	3.3	1.40	0.83	2.83	0.190	0.130
18-1, 37-41	P1*	31.3	6060	217	361	1084	60340	38	41.3	139	152	68	53		324	16	<27	0.017	0.34	0.44	0.41	0.193	0.19	<0.057	<0.019
18-1, 61-70		6.58	180	29	2677	852	71750	127	123	2370	2543	11	44	2.1	112	67	63		0.038	2.04	0.95	0.52	1.65	0.163	0.079
18-2, 33-38	P1*	30	6120	208	341	1084	58590	37	37.9	130	137	60	57	<1.8	6	4	<25	0.018	<0.02	0.12	<0.05	0.011	<0.13	<0.007	<0.027
18-2, 85-95			240	52	4788	774	65520	116		2110		33	42	2.3	114	67	68	0.033	0.066	1.9	0.97	0.54	1.66	0.109	0.083
19-1, 18-20	A2*	38	9900	200	293	1472	77350	41	44	141	137	61	79		10										
20-1, 32-36	P2*	30.6	7680	219	222	1084	66640	34	35	186	90	55	58	<1.5	130	127	131	0.026	0.040	3.8	1.42	0.84	3.00	0.201	0.154
20-1, 32-36														8.1	162	94	98	0.101	0.40	2.77	1.18	0.64	2.21	0.149	0.113

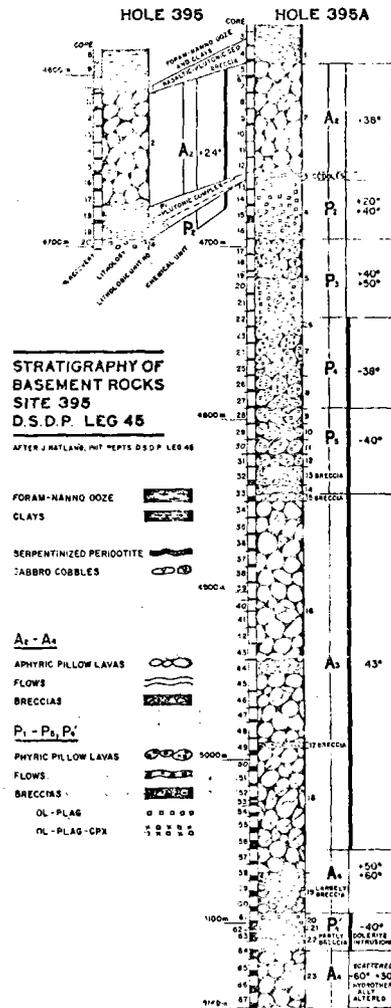
Tableau V.10b: 22°N

Leg 45, site 395, forage 395, éléments trace (en ppm).

Tableau V.10b: 22°N (suite)

Echantillon Intervalle en cm	Profondeur	Unité	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	FeO	MnO	NiO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	LoI
4-1,91-113	105		51.6	18.86	7.11		0.13	5.5	12.42	4.03	0.10	0.81	0.17	100.73	-1.1
5-1,100-134	115		49.4	14.87	12.20	8.07	0.18	8.8	10.53	2.9	0.10	1.62	0.17	100.77	-0.9
6-1,130-134	116		49.6	15.19	12.03		0.18	8.5	10.60	2.85	0.16	1.64	0.19	100.74	-1.9
7-1,76-82	124		49.4	14.92	12.27		0.18	8.4	10.61	2.83	0.17	1.63	0.17	100.58	-1.0
8-1,50-52	134	A2	49.1	14.89	12.49		0.20	8.4	10.49	2.85	0.13	1.64	0.16	100.35	-0.1
9-2,18-21	143		49.4	15.14	12.20	8.38	0.18	8.5	10.65	2.83	0.11	1.64	0.16	100.81	-0.7
11-1,117-129	163		49.8	15.06	12.65		0.19	8.6	10.74	2.79	0.16	1.65	0.18	100.82	-1.3
13-1,106-110	182		49.9	18.64	8.37		0.14	6.5	12.62	2.75	0.15	1.39	0.16	100.48	-2.1
14-1,92-99	188		49.2	17.81	9.43	6.34	0.14	7.1	11.97	2.73	0.11	1.36	0.14	99.99	-1.6
14-2,98-112	190		49.5	18.28	8.94		0.13	6.9	12.10	2.88	0.08	1.33	0.15	100.29	-1.8
14-2,98-112	190		49.0	17.93	9.24		0.15	6.1	12.11	2.88	0.20	1.36	0.14	99.11	-2.0
15-1,93-102	195	P2	49.7	18.25	9.40		0.14	7.3	12.10	2.72	0.09	1.34	0.14	101.18	-1.9
15-2,102-108	197		50.2	17.97	9.73	5.78	0.14	6.8	12.01	2.94	0.10	1.39	0.14	101.42	-2.1
15-3,128-142	199		49.9	17.72	9.91		0.15	7.3	12.15	2.82	0.11	1.37	0.14	101.57	-1.2
15-5,0-11	201		49.1	19.17	8.49	7.0	0.13	7.0	12.16	2.72	0.07	1.16	0.14	100.14	-1.4
16-1,69-74	210		50.3	17.74	9.61		0.13	6.7	12.01	2.87	0.18	1.40	0.14	100.81	-2.0
16-1,90-98	210		48.8	17.84	8.94		0.14	7.5	12.67	2.32	0.12	1.05	0.12	99.50	-0.7
16-1,100-104	210		49.5	17.36	8.67		0.14	7.8	12.57	2.42	0.12	1.07	0.12	99.77	-0.5
17-1,115-124	220		49.9	17.84	8.49	4.51		7.2	12.82	2.34	0.12	1.04	0.11	99.75	-2.0
18-1,140-146	229	P3	49.4	17.57	8.58		0.14	7.3	12.68	2.42	0.11	1.05	0.11	99.36	-1.7
20-1,43-45	240		49.6	17.71	9.20		0.15	8.0	12.85	2.42	0.16	1.07	0.11	101.27	-0.4
22-1,87-92	258		49.6	17.8	8.73		0.13	8.0	12.91	2.34	0.10	1.02	0.11	100.74	-1.9
22-2,72-76	260		50.1	16.25	9.32	5.65	0.15	8.4	12.39	2.42	0.08	1.13	0.09	100.33	-1.6
23-1,65-68	269		49.4	17.54	9.24		0.15	7.6	12.39	2.62	0.25	1.12	0.11	100.52	-0.9
23-1,117-122	270		50.1	17.65	8.51		0.14	8.4	12.39	2.54	0.16	1.11	0.11	101.11	-0.7
23-1,145-147	270	P4	49.1	17.33	8.24		0.14	8.5	12.26	2.39	0.11	1.07	0.12	99.26	-0.6
24-1,125-129	278		49.7	17.76	8.69		0.14	7.8	12.50	2.59	0.10	1.12	0.11	100.51	-0.9
26-1,129-133	298		49.6	17.20	8.76		0.14	7.9	12.21	2.42	0.06	1.13	0.11	99.53	-1.7
27-1,127-131	306		49.6	16.90	8.84		0.14	8.3	12.11	2.57	0.06	1.13	0.10	99.75	-1.6
28-1,116-122	317		49.6	18.61	8.56		0.15	6.6	12.27	2.74	0.15	1.19	0.12	99.59	-1.4
29-1,119-122	327		49.1	18.13	8.71	5.11	0.14	7.2	12.26	2.62	0.21	1.25	0.14	99.76	-1.2
30-1,82-87	335	P5	49.3	17.69	8.8		0.13	8.3	11.92	2.62	0.09	1.15	0.10	100.10	-1.7
31-1,63-67	344		49.7	18.59	8.67	4.06	0.13	6.8	12.33	2.77	0.17	1.17	0.12	100.45	-2.5

Tableau V.11a: 22°N  
Leg 45, site 395; forage 395A, éléments majeurs.



Echantillon Intervalle en cm	Profondeur	Unité	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	LoI
31-1,70-76	344		49.1	18.42	8.69		0.14	7.0	12.31	2.72	0.17	1.14	0.11	99.80	-2.4
32-1,54-62	352		49.0	18.25	8.09		0.15	5.9	15.64	2.62	0.36	1.09	0.12	101.22	-7.7
32-1,54-62	352	P5	49.6	18.79	8.73		0.13	5.5	13.90	2.77	0.15	1.19	0.11	100.87	-3.1
32-2,56-63	353		49.2	18.94	8.3		0.15	7.1	12.38	2.69	0.12	1.09	0.10	100.05	-1.9
33-2,9-13	362		50.0	18.44	8.89		0.14	7.3	12.53	2.74	0.17	1.13	0.09	101.43	-2.1
33-2,127-129	364		49.7	15.29	11.07		0.18	7.7	11.33	2.72	0.24	1.70	0.17	100.10	-1.7
35-1,53-54	381		49.8	15.14	11.13	7.33	0.18	7.7	11.29	2.74	0.18	1.71	0.17	100.04	-1.1
37-1,136-141	401		49.9	15.06	10.90		0.17	7.5	11.24	2.72	0.29	1.70	0.16	99.54	-1.9
39-1,102-107	420		49.9	15.33	10.98		0.18	7.6	11.39	2.72	0.28	1.72	0.17	100.27	-1.9
41-1,142-144	438		49.7	15.07	11.17		0.19	7.5	11.25	2.65	0.27	1.74	0.18	99.72	-1.3
42-1,86-89	446		49.7	15.19	11.42		0.19	7.4	11.23	2.69	0.16	1.75	0.17	99.90	-0.8
45-1,124-127	475		49.8	15.09	11.45	7.41	0.19	7.3	11.27	2.62	0.18	1.76	0.17	99.83	-1.1
47-1,63-67	492	A3	49.8	15.81	11.05		0.18	7.2	11.52	2.65	0.21	1.67	0.16	100.25	-1.2
48-2,135-140	504		49.4	15.09	11.16		0.19	7.9	11.23	2.77	0.25	1.71	0.17	99.87	-1.5
49-2,13-17	512		49.6	15.08	11.14		0.18	8.1	11.32	2.72	0.17	1.72	0.18	100.21	-1.2
51-2,41-44	530		49.8	15.08	11.34		0.19	7.5	11.33	2.59	0.23	1.72	0.17	99.95	-1.3
52-1,48-53	539		49.8	15.03	11.61		0.19	7.3	11.47	2.72	0.18	1.74	0.20	100.24	-1.0
53-1,7-11	542		49.6	15.11	11.28		0.18	7.9	11.22	2.69	0.18	1.72	0.17	100.05	-1.3
55-1,49-54	558		49.3	14.88	11.13	6.21	0.17	8.0	11.18	2.72	0.17	1.73	0.17	99.32	-1.6
56-2,75-81	568		49.9	14.88	11.13		0.18	7.8	11.18	2.72	0.17	1.74	0.16	99.76	-1.9
57-1,125-131	579		49.2	15.14	11.20		0.18	8.1	11.09	2.62	0.22	1.59	0.15	99.49	-2.3
58-2,115-122	589	A4	50.5	14.47	10.86		0.18	8.2	10.50	2.65	0.10	1.58	0.12	99.16	-0.5
59-2,65-69	598		49.0	15.24	11.25	6.26	0.18	8.1	11.18	2.65	0.30	1.59	0.15	99.64	
60-3,137-143	608		48.8	15.15	11.39		0.20	8.4	11.12	2.57	0.17	1.59	0.14	99.53	-1.9
61-2,37-45	617	P4'	49.5	16.87	8.97		0.14	8.3	11.93	2.44	0.07	1.14	0.10	99.55	-1.8
62-1,40-42	521	A4	48.6	15.06	11.15	6.11	0.18	8.5	11.09	2.92	0.22	1.59	0.15	99.46	-1.9
62-1,80-87	521		49.6	16.30	9.05	4.93	0.15	8.1	11.98	2.44	0.12	1.18	0.11	99.03	-1.8
63-1,108-116	524	P4'	49.5	17.44	8.59		0.15	8.5	12.16	2.42	0.07	1.08	0.09	100.00	-1.8
64-2,116-122	535		49.3	16.91	8.85		0.14	8.5	12.06	2.44	0.11	1.10	0.09	99.50	-2.0
64-3,48-53	536		49.2	15.27	11.60	4.96	0.20	8.6	10.87	2.49	0.25	1.63	0.16	100.27	-4.9
65-1,81-86	546	A4	48.7	15.12	11.45		0.20	8.2	11.23	2.72	0.23	1.63	0.15	99.63	-2.1
66-2,66-71	556		49.1	15.24	11.65	5.95	0.20	8.3	11.17	2.69	0.20	1.64	0.15	100.34	-2.6
67-2,54-59	567	A4	49.9	15.10	10.56	5.08	0.17	7.3	11.40	2.72	0.29	1.69	0.15	99.28	-2.6

Tableau V.11a: 22°N (suite)

Méth. Anal.	Unité	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni		Cu	Zn	Rb		Sr	Y	Zr		Nb	Sb	Cs	La	Eu	Tb	Hf	Ta	Th	
		NAA	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	NAA	XRF	NAA	AA	AA	XRF	NAA	XRF	XRF	XRF	NAA	XRF	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA
4-1 91-113		33.7	4860	233	247	805	49770	29	30.7	124	128	73	50	3.4	2.1	178	31	36	59	2.3	.030	.215	2.3	1.61	.75	1.17	.034	.023
5-1 100-103		37.0	9720	270	272	1109	85400	50	50.5	173	197	77	81	2.4	<1.8	121	39	113	123	3.5	.020	.038	3.1	1.33	.82	2.85	.189	.149
6-1 113-134		34.2	9840	271	274	1122	84210	50	45.6	177	168	73	84	1.3	1.9	122	38	107	105	4.5	.012	.04	3.3	1.29	.71	2.52	.174	.129
7-1 76-82		36.9	9780	271	273	1141	85890	48	49.	186	178	70	84	2.8	2.3	122	41	111	105	4.6	.10	3.3	1.4	.82	2.72	.197	.136	
8-1 50-52	A2	37.1	9840	265	264	1248	87430	49	48.8	178	184	72	87	1.1	2.7	117	39	111	104	4.3	.043	.018	3.2	1.45	.83	2.85	.196	.131
9-2 18-21		37.1	9840	271	269	1115	85400	50	48.7	193	185	72	83	1.7	3.2	120	39	112	115	3.5	.102	.021	3.2	1.46	.85	2.87	.190	.124
11-1 117-129		37.5	9900	270	268	1223	88550	50	49.7	176	184	73	86	1.7	2.2	124	41	108	143	4.8	.012	.036	3.4	1.42	.88	2.91	.187	.110
13-1 106-110		33.1	8340	241	232	900	58590	40	44.0	134	128	62	69	2.1	2.9	166	32	98	109	3.7	.12	2.9	1.29	.70	2.47	.171	.107	
14-1 92-99		32.9	8160	234	236	881	66010	39	38.0	88	104	60	63	2.1	<1.3	160	32	97	109	3.4	.017	.048	3.0	1.22	.68	2.39	.163	.117
14-2 98-112		32.8	7980	232	228	843	62580	36	39.5	89	105	59	63	1.6	3.7	162	31	95	125	3.3	.042	.175	2.9	1.24	.71	2.48	.162	.131
14-2 98-112 altéré	P2	32.2	8160	234	236	957	64680	38	38.3	110	99	61	65	1.7	<	171	31	99	106	3.9	.008	.02	2.90	1.26	.66	8.29	.16	.117
15-1 93-102		32.1	8040	229	234	868	65800	37	38.4	98	99	61	63	0.6	1.7	160	32	100	95	3.3	.055	3.04	1.21	.69	2.26	.160	.104	
15-2 102-108		32.5	8340	236	230	856	68110	36	37.3	93	94	59	61	0.9	<1.8	155	32	97	88	1.9	.012	.030	3.0	1.21	.68	2.29	.155	.129
15-3 128-142		32.3	8220	239	228	951	63370	37	39.1	91	106	62	65		<1.8	160		97	102		.012	.057	3.1	1.27	.67	2.38	.157	.136
15-5 0-11		28.1	6960	202	252	786	59430	37	35.9	95	104	59	51	(.05)	<1.5	158	26	84	92	3.2	.010	.025	2.4	1.06	.58	2.04	.138	.107
16-1 69-74			8400	240	226		67270	37		104		63	63	5.5		202	32	93		3.8								
16-1 90-98		30.9	6300	220	342	912	62580	38	39.9	134	136	63	58	1.0	2.6	115	26	66	77	3.0	.186	.0100	2.2	0.93	.54	1.74	.114	.083
16-1 100-104		32.4	6420	221	362	919	60690	39	42.7	144	156	70	59	2.1	2.2	115	28	66	69	2.6	.048	.068	2.2	1.01	.57	1.76	.111	.084
17-1 115-124		32.	6240	220	348		59430	38	40.5	144	146	63	53	3.1	2.	122	25	67	82	2.8	.020	.13	3.2	1.01	.56	1.80	.113	.103
18-1 140-146	P3	30.9	6300	224	344	862	60060	40	39.7	136	133	68	63	1.1	2.5	118	25	64	72	2.9	.071	.128	2.0	0.93	.54	1.70	.113	.074
20-1 43-45		32.4	6420	223	358	970	64400	39	41.4	141	144	63	63	1.1	2.6	117	28	69	74	2.9	.055	.043	2.02	1.00	.56	1.75	.115	.091
22-1 87-92		30.4	6120	223	354	849	61110	39	39.5	152	149	68	58	(.03)	2.1	115		70	64		.132	1.81	.92	.52	1.63	.103	.067	
22-2 72-76		33.4	6780	237	368	938	65240	40	42.1	137	145	73	64	(.03)	1.8	136	26	71	74	3.2	.013	.062	2.1	.99	.56	1.81	.116	.100
23-1 65-68		32.1	6720	228	367	976	64680	38	39.2	124	129	72	64	2.0	6.9	138	26	80	80	2.5	.140	2.90	2.22	1.02	.57	1.94	.109	.081
23-1 117-122		31.3	6660	218	375	906	59570	40	40.3	147	151	67	66	7.5	2.2	138	28	75	90	3.2	.023	.083	2.3	1.05	.55	1.85	.106	.105
23-1 145-147	P4	30.9	6420	263	279	868	57680	40	41.8	149	169	66	68	1.2	<1.3	127	27	73	79	3.2	.019	.035	2.1	1.01	.55	1.83	.105	.076
24-1 125-129		32.	6720	225	229	919	60830	37	41.2	136	146	67	61	0.8	1.3	135	28	72	75	1.3	.040	2.4	.99	.56	1.80	.111	.068	
26-1 129-133		32.1	6780	224	315	874	61320	41	39.3	127	130	67	60	0.8	1.8	134	27	70	86	3.5	.013	.028	2.21	1.03	.58	1.95	.107	.075
27-1 127-131		33.	6780	224	314	862	61880	40	43.1	129	150	71	72	0.8		133	28	64	92	3.2	.188	.035	2.32	1.06	.58	2.00	.114	.079
28-1 116-122		28.9	7140	206	284	957	59920	38	38.7	148	144	57	69	(0.6)	2.1	168	28	81	95	2.8	.031	.167	2.6	1.07	.57	2.01	.126	.0111
29-1 119-122		31.3	7500	215	295	906	60970	38	38.1	127	140	57	65	4.4	4.3	158	31	80	84	2.4	.047	.168	2.7	1.14	.64	2.15	.137	.101
30-1 82-87	P5	30.8	6900	202	293	843	61600	38	41.4	142	169	63	63	1.1	<1.3	158	27	76	96	2.7	.016	.063	2.5	1.08	.58	1.97	.126	.095
31-1 63-67		29.9	7020	200	208	843	60690	38	38.9	134	140	59	66	0.7	3.6	165	28	82	92	3.9	.079	.243	2.4	1.06	.57	1.98	.124	.112
31-1 70-76		29.9	6840	200	288	919	60830	37	39.3	131	144	59	60	0.6	4.2	172	27	81	88	2.8		.21	2.3	1.08	.56	1.87	.121	.088

Tableau V.11b: 22\*N

Leg 45, site 395, forage 395A, éléments trace (en ppm).

Méth. Anal.	Unité	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co		Ni		Cu	Zn	Rb	Sr	Y	Zr		Nb	Sb	Cs	La	Eu	Tb	Hf	Ta	Th		
		NAA	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	NAA	XRF	NAA	AA	AA	XRF	NAA	XRF	XRF	XRF	NAA	XRF	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	
32-1M 54-62	P5	27.6	6540	232	299	970	56630	35	35.5	165	145	49	48	6.1	9.1	172	24	70	74	3.2	.240	.440	2.11	.95	.51	1.69	.111	.080	
32-1B 54-62		30.9	7140	193	255	836	61110	36	38.3	111	116	59	59	0.7	5.5	177	27	80	84	4.1	.147	.43	2.4	1.07	.58	2.03	.124	.074	
32-2 65-63		29.2	6540	200	260	830	58100	36	36.8	121	134	62	62	1.9	3.3	180	27	76	77	1.7	.018	.141	2.3	1.02	.54	1.88	.116	.080	
33-2 9-13		30.1	6780	218	304	906	62230	37	38.9	135	135	62	61	1.0	3.5	162	30	69	77	2.9	.033	.221	2.2	1.02	.57	1.86	.115	.087	
33-2 127-129	A3	38.2	10200	303	258	1154	77490	43	43.2	114	118	59	79	1.0	2.9	132	30	118	124	2.9		.018	4.3	1.50	.85	3.02	.219	.153	
35-1 53-54		39.4	10260	311	260	1154	77910	43	43.5	113	123	61	79			129		127	122		.040	.030	4.0	1.55	.91	3.18	.232	.142	
37-1 136-141		38.3	10200	308	260	1109	76300	45	44.3	121	122	56	76	3.5	4.7	135	39	117	142	4.2		.28	4.4	1.50	.85	3.10	.224	.157	
39-1 102-107		40.7	10320	304	251	1122	76860	41	43.3	128	128	57	84	4.4	3.1	129	42	122	137	2.6	.055	.175	4.0	1.51	.85	3.14	.216	.146	
41-1 142-144		39.1	10440	303	249	1179	78190	43	44.7	121	119	57	81	4.0	4.4	130	44	128	129	5.1		.21	4.0	1.55	.93	3.19	.236	.175	
42-1 86-89		38.8	10600	302	243	1198	79940	44	43.2	115	114	61	81	1.2	<1.5	132	43	131	148	4.1	.050	<.02	4.0	1.52	.92	3.28	.230	.21	
145-1 124-127		38.9	10660	308	243	1217	78890	44	43.7	111	116	54	92	.6	2.8	131	42	131	123	4.8		<.02	4.2	1.55	.90	3.20	.236	.158	
47-1 63-67		38.4	10020	302	258	1147	80640	42	42.2	119	117	56	80	1.0	<1.5	134	40	118	123	4.5	.072	<.02	4.0	1.43	.87	3.02	.220	.152	
48-1 135-140		38.3	10260	302	250	1191	78610	42	44	120	120	57	90	1.1	3.6	131	42	124	122	3.7		.081	4.1	1.48	.87	3.04	.227	.163	
49-2 13-17		39.5	10320	305	257	1153	79240	45	44.5	118	115	61	86	.4	2.3	128	41	128	135	3.8	.036	<.024	4.1	1.60	.90	3.33	.231	.161	
51-2 41-44		37.9	10320	302	251	1191	79310	41	42.8	119	116	60	90	.3	<1.5	130	41	128	137	4.1	.039	.023	3.9	1.49	.89	3.19	.225	.164	
52-1 48-53		38.3	10440	305	251	1204	81270	42	42.6	118	115	61	116	.2	2.2	134	42	123	144	5.0	.038	.029	4.0	1.52	.90	3.2	.224	.152	
53-1 7-11		38.2	10320	309	241	1172	78960	40	42.6	119	118	56	92	1.1	2.5	131	42	128	136	4.3	.036	.015	3.9	1.53	.88	3.16	.229	.174	
54-1 48-51		38.3	10320	314	245	1160	77770	41	43.4	111	114	57	85		<1.5	124	42	132	131		.032	.013	4.0	1.51	.90	3.22	.227	.186	
55-1 49-54		38.9	10380	312	249	1103	77910	44	44.3	116	118	57	92	.9	5.4	131	41	126	124	3.8		.20	4.1	1.55	.91	3.19	.241	.164	
56-2 75-81			10340	311	246		77910	43		102		57	103			131		129											
57-1 125-131		A4	37.4	9540	288	302		78400	47	48.2	163	177	63	83	2.8	4.7	134	38	105	116	4.2	.28	.168	3.6	1.42	.82	2.85	.190	.141
58-2 115-122				9480	273	294		76010	45		169		62	79	.4		119	34	110		4.9								
59-2 65-69	36.6		9540	279	298		78750	46	47.5	177	182	69	83	6.4	4.6	127	38	111	110	5.6	.022	.11	3.4	1.43	.80	2.79	.194	.159	
60-3 137-143	36.9		9540	285	206		79730	48	46.9	174	171	68	81	2.7	3.1	130	38	119	118	4.4	.0148	.089	3.4	1.38	.81	2.78	.194	.131	
61-2 37-45	P4'	32.4	6840	238	219		62790	39	40.8	133	137	69	65	.2	<1.2	129	26	86	77	2.6		.02	2.2	1.08	.58	1.87	.111	.080	
62-1 40-42	A4	36.5	9540	282	316		78050	48	48.7	179	183	69	90	5.7	3.6	128	38	117	117	5.3	.019	.144	3.5	1.37	.80	2.87	.195	.144	
62-1 80-87	P4'	33.2	7080	251	308		63340	38	41	116	133	68	64	4.4	3.	129	27	74	82	3.9	.021	.126	2.35	1.09	.61	1.99	.111	.082	
63-1 108-116		29.7	6480	211	362		60130	38	37.6	129	140	61	69	.1	<.8	132	26	68	64			.026	2.02	.94	.52	1.66	.100	.069	
64-2 116-122		31.6	6600	217	330		61950	39	41	144	149	61	63	2.6	2.6	139	26	66	74	3.9	.022	.148	2.1	1.02	.56	1.81	.103	.064	
64-3 48-53	A4'	36.4	9780	267	294		81200	47	47.4	180	181	57	82	8.9	6.7	126	38	108	129	5.2	.079	.171	3.7	1.37	.82	2.85	.198	.146	
65-1 81-86		36.9	9780	277	298		80150	47	48.0	170	177	62	86	5.3	5.4	130	40	114	111	4.3	.039	.174	3.6	1.42	.82	3.07	.197	.158	
66-2 66-71		37.1	9840	275	295		81550	45	46.9	158	171	62	87	4.7	4.6	131	39	106	110	5.5	.047	.172	3.5	1.40	.83	2.88	.200	.138	
67-2 54-59	A5	37.8	10140	297	263		73920	44	43.8	129	131	54	83	5.0	3.1	132	40	124	112	4.9	.019	.144	4.0	1.46	.87	3.07	.225	.142	

Tableau V.11b: 22\*N (suite)  
Leg 45, site 395, forage 395A, éléments trace (en ppm). (suite).

Unité Echantillon Intervalle en cm Forage Nb. Echantillons	A2* 11-1 395 1	A2* 395 6	A2 395A 6	A3 395A 16	A4 61 395A 4	A4 61 395A 4	A4 67-2 54-59 395A 1	P1* 395 2	P2* 395 1	P2 395A 8	P3 395A 6	P4 395A 6	P4' 395A 4	P5 395A 6
SiO <sub>2</sub>	48.9	49.37 0.32	49.45 0.23	49.73 0.14	49.37 0.77	48.90 0.29	49.90	49.40	49.60	49.71 0.46	49.47 0.37	49.82 0.26	49.47 0.13	49.54 0.35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.93	14.93 0.12	15.01 0.14	15.14 0.22	15.00 0.36	15.17 0.10	15.10	17.77 0.63	18.77	18.04 0.32	17.69 0.19	17.15 0.61	16.90 0.47	18.29 0.39
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	12.83	12.06 0.15	12.31 0.23	11.20 0.19	11.17 0.23	11.46 0.23	10.56	8.49 0.18	9.52	9.33 0.49	8.77 0.26	8.82 0.30	8.87 0.20	8.73 0.13
MnO	0.20	0.18 0.01	0.18 0.01	0.18 0.01	0.18 0.01	0.20 0.01	0.17	0.14 0.01	0.13	0.14 0.01	0.14 0.01	0.14 0.01	0.14 0.01	0.14 0.01
MgO	6.8	8.58 0.20	8.53 0.15	7.61 0.25	8.20 0.14	8.40 0.18	7.30	8.20 0.42	6.10	6.84 0.41	7.63 0.35	7.78 0.83	8.35 0.19	7.24 0.66
CaO	11.01	10.53 0.03	10.60 0.09	11.29 0.11	10.97 0.32	11.09 0.16	11.40	12.71 0.19	12.05	12.13 0.21	12.75 0.13	12.25 0.19	12.03 0.10	12.26 0.22
Na <sub>2</sub> O	2.68	2.66 0.02	2.64 0.04	2.46 0.06	2.40 0.04	2.5	2.5	2.15	2.59	2.59 0.08	2.16 0.05	2.29 0.09	2.22 0.01	2.48 0.06
K <sub>2</sub> O	0.22	0.11 0.02	0.14 0.03	0.21 0.05	0.20 0.08	0.23 0.02	0.29	0.10 0.04	0.30	0.13 0.04	0.12 0.02	0.14 0.05	0.09 0.03	0.16 0.04
TiO <sub>2</sub>	1.70	1.62 0.01	1.64 0.01	1.72 0.02	1.59 0.01	1.62 0.02	1.69	1.01 0.01	1.28	1.37 0.03	1.05 0.02	1.12 0.01	1.13 0.04	1.18 0.05
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.18	0.15 0.01	0.17 0.01	0.17 0.01	0.14 0.01	0.15 0.01	0.15	0.11	0.13	0.14 0.01	0.11 0.01	0.11 0.01	0.10 0.01	0.11 0.02
Total	100.45	100.01	100.67	99.71	99.22	99.72	99.06	100.08	100.47	100.42	99.89	99.62	99.30	100.13
LoI		-0.93	-0.98	-1.34	-1.9	-2.87	-2.60	-1.0	-1.5	-1.84	-1.2	-1.3	-1.85	-1.88

Tableau V.12: 22°N

Leg 45, site 395, éléments majeurs, valeurs moyennes pour chaque unité.

Unité Nombre d'échantillons	A2* 395 11-1 1	A2* 395 6	A2 395A 6	A3 395A 15	A4 395A 4	A4' 395A 4	A4 395A 67-2 1	P2 395A 8	P2* 395 1	P1* 395 2	P3* 395A 6	P4 395A 6	P4' 4	P5 6
Sc NAA	38.4	37.8 1.4	36.3 1.2	38.7 0.7	36.8 0.4	36.8 0.4	37.8	32.6 0.4	30.6	30.6	31.5 0.9	32.1 0.9	31.7 1.5	30.12 8
Ti XRF	10200	9710 59	9820 62	10337 152	9528 26	9800 34	10140	8177 137	7680	6090	6300 114	6694 129	6750 216	7045 245
V XRF	301	268 3.7	270 2.3	306 3.6	281 5.8	273 5	297	235 4	219	212	221 1.7	226 6.3	229 18	206 8
Cr XRF	279	271 5	270 4	251 6	303 8	296 2	263	232 4	222	350	351 8		295 8	295 8
Co XRF	48	48.6 1	49.5 0.8	42.7 1.5	46.8 1.3	46.3 1.1	44	37.6 1.5	34	37.5	38.8 0.7	39.4 1.4	38.5 0.6	37 1.1
Co NAA	49	49.7 0.5	49.6 0.5	43.4 0.7	47.3 0.6	47.3 0.6	44	38.1 0.7	35	39.5	40.5 1.4	40.8 1.6	40.2 1.5	38.2 1.0
Ni XRF	161	176 3.9	178 4.8	117 4.4	172 6.5	169 11	129	94.8 8	86	135	140 4.6		7.6 7.6	7.6 7.6
Ni NAA	160	185 3.3	182 9.5	118 3.8	176 5.5	176 5	131	101 4.6	90	145	143.6 8.2		145.3 11	145.3 11
Cu AA	69	67.8 2	72.8 2.3	57.8 2.1	65.5 3.5	60.3 2.9	54	60.6 1.3	55	64	65.8 3.2	69 2.9	64.7 4.3	59.5 2.5
Zn AA	92	85.5 2.8	84.2 2.1	84.6 5.6	81.5 1.9	84.5 2.4	83	64.3 2.5	58	55	59 3.7	63.8 3.3	65 2.6	64 3.3
Sc XRF	127	119 1	121 2.4	131.2 2	127.5 6.5	129 2.4	132	162 5	162	113	117 2.8	135.6 2.1	132.2 4.7	163.8 5.6
Y XRF			39.5 1	41.5 1.3	37.1 1.9	38.5 1.0	39.9	31.9 0.5			26.4 1.5	27.2 1.1	26.1 0.4	28.1 1.5
Zr XRF	121	116 3.3	110 2.3	125.6 4.8	111.2 5.6	109 4.1	124	97.6 1.6	94	67	67 2.2	72.1 4.9	73.5 9	78.2 5
Zr NAA	112	118 11	115 15	131.8 8.7	114.7 4.2	116 10	112	104.8 12	98	65	73 6.2	82.3 7.1	74.2 7.6	88.6 7.2
Nb XRF			4.2 0.6	4.3 0.5	5.0 1.1	5.1 0.5	4.9	3.5 0.3			2.85 0.2	3.1 0.7	3.5 0.3	2.8 0.3
La NAA	3.25	3.39 0.3	3.25 0.1	4.1 0.1	3.5 0.1	3.6 0.1	4.0	3.0 0.1	2.8	2.0	2.1 0.1	2.2 0.1	2.2 0.1	2.45 0.2
Eu NAA	1.5	1.39 0.04	1.39 0.07	1.52 0.04	1.41 0.03	1.4 0.03	1.46	1.24 0.03	1.18	0.96	0.97 0.04	1.02 0.03	1.03 0.07	1.07 0.04
Tb NAA	0.87	0.83 0.01	0.82 0.06	0.89 0.03	0.81 0.01	0.82 0.01	0.87	0.68 0.02	0.64	0.53	0.55 0.01	0.56 0.01	0.57 0.01	0.58 0.03
Hf NAA	2.84	2.82 0.06	2.79 0.15	3.16 0.09	2.8 0.04	2.93 0.12	3.07	2.37 0.09	2.21	2.21	1.65 0.06	1.73 0.08	1.88 0.08	1.83 0.14
Ta NAA	0.2	0.190 0.004	0.189 0.008	0.228 0.007	0.193 0.002	0.198 0.002	0.225	0.161 0.005	0.149	0.106	0.112 0.004	0.110 0.004	0.106 0.006	0.125 0.007
Th NAA	0.137	0.134 0.004	0.130 0.013	0.164 0.017	0.144 0.014	0.147 0.010	0.142	0.120 0.012	0.113	0.081	0.084 0.013	0.083 0.014	0.074 0.009	0.096 0.013

Tableau V.12b: 22°N

Leg 45, site 395, valeurs moyennes pour chaque unité basaltique.

Echantillon Intervalle en cm	Profondeur	Unité	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	LoI
14-6,20-45	125	Pa	49.3	16.25	9.96	5.36	0.16	7	11.57	2.62	0.31	1.50	0.15	98.82	-2.0
15-4,48-53	135	Pb	49.5	16.75	9.17	4.36	0.15	8.5	11.88	2.59	0.21	1.24	0.12	100.11	-3.1
16-3,137-142	144		49.8	16.73	9.24	4.45	0.15	8.1	11.95	2.57	0.24	1.27	0.12	100.17	-2.4
18-1,130-136	160		49.7	16.93	9.68		0.17	7.9	12.09	2.62	0.29	1.27	0.13	100.78	-2.6
19-2,138-141	173		49.7	16.70	9.23		0.17	7.7	11.98	2.73	0.21	1.29	0.13	99.84	-3.0
22-4,144-150	201	Pc	49.8	16.93	9.47	4.64	0.15	7.6	12.11	2.69	0.25	1.29	0.11	100.30	-2.3
23-1,143-147	209		49.2	16.68	9.29		0.15	7.3	11.96	2.72	0.21	1.29	0.11	98.91	-2.5
24-3,73-78	219		49.1	16.58	9.68	5.23	0.16	7.9	12.07	2.65	0.23	1.29	0.12	99.78	-2.0
25-1,96-100	221		49.7	16.71	9.49		0.15	7.4	11.99	2.65	0.13	1.29	0.11	99.62	-2.2

Tableau V.13a: 22°N

Leg. 45, site 396, forage 396, éléments majeurs.

Méthode	Unité	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sb	Cs	La	Eu	Tb	Hf	Ta	Th						
Analytique		NAA	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	NAA	AA	AA	XRF	NAA	XRF	XRF	XRF	NAA	XRF	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA						
14-6 20-25	a	36.8	9000	312	288		69720	40	40.7	111	114	58	73	6.8	4.7	148	35	109	118	4	.021	.260	3.5	1.38	.79	2.64	.207	.161		
15-4 48-53	b		7440	256	415		64190	41		171		65	66	6.0		155	30		86		4.4									
16-3 137-142			34.8	7620	268	397		64680	40	40.8	143	142	64	67	5.7	4.4	155	28	90	90	2.7	.020	.250	3.0	1.14	.64	2.14	.167	1.22	
18-1 130-136				7620	262	371		67760	40		142		67	66	9.0		146	29		87		4.9								
19-2 138-141			35.4	7740	269	391		64610	39	41.4	142	144	67	65	5.2	3.9	168	30		86	83	4.5	.025	.255	2.9	1.23	.66	2.24	.173	1.32
21-1 87-89			7140	261	431		62650	41		189		67	65			150														
22-4 144-150	c	34.5	7740	254	284		66290	40	41.5	123	121	65	70	7.4	5.1	135	33		86	103	3.5	.014	.289	2.65	1.23	.67	2.16	.153	.116	
23-1 143-147			34.2	7740	255	298		65030	41	42.4	128	125	65	72	7.5	4.2	133	31	93	89	3.6	.011	.228	2.7	1.19	.67	2.16	.152	.096	
24-3 73-78			35.1	7740	254	293		67760	41	42.8	124		66	73	7.1	4.3	128	30		86	90	2.9	.025	.234	2.7	1.26	.68	2.31	.156	.116
25-1 96-100			34.9	7740	259	288		66430	40	40.9	109	116	64	71	1.5	3.0	130	30		81	107	2.6	.016	.056	2.7	1.20	.68	2.18	.153	.126

Tableau V.13b: 22°N

Leg 45, site 396, forage 396, éléments trace (en ppm).

Nb. Echantillons	Unité	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	LoI
1	Pa	49.3	16.25	9.96	5.36	0.16	7.0	11.57	2.40	0.31	1.50	0.15	98.60	-2.0
4	Pb	49.68 0.13	16.78 0.10	9.33 0.24		0.16	8.17 0.31	11.98 0.09	2.41 0.07	0.24 0.04	1.27 0.02	0.12 0.01	100.14	-2.8 0.3
4	Pc	49.45 0.35	16.73 0.15	9.48 0.16		0.16	7.55 0.26	12.03 0.07	2.46 0.03	0.21 0.05	1.29	0.11 0.01	99.47	2.25 0.21

Tableau V.14a: 22°N

Leg. 45, site 396, éléments majeurs, valeurs moyennes pour chaque unité.

Nombre d'échantillons	Unité	Sc NAA	Ti XRF	V XRF	Cr XRF	Co XRF	Ni NAA	Cu AA	Zn AA	Sr XRF	Y XRF	Zr XRF	Nb NAA	La XRF	Eu NAA	Tb NAA	Hf NAA	Ta NAA	Th NAA			
1	Pa	36.8	9000	312	288	40	40.7	111	114	58	73	148	34.6	109	118	4	3.5	1.36	0.79	2.64	0.21	0.16
4	Pb	35	7600	264	393	40	41	142	143	66	66	156	29.4	87	87	4.6	2.9	1.2	0.65	2.2	0.17	0.13
4	Pc	34.7	7740	255	290	40.5	42	121	124	65	72	131	30.9	86	97	3.2	2.7	1.22	0.68	2.2	0.156	0.114

Tableau V.14b: 22°N

Leg 45, site 396, éléments trace, valeurs moyennes pour chaque unité.

Echantillon Intervalle en cm	Unité Chim.	Unité Lith.	Profondeur approx.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Total	LoI	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	CO <sub>2</sub>	Mg/ (Mg+Fe)	
4-1,103-105			151.5	49.91	15.51	10.20	7.88	11.87	2.57	0.28	1.43	0.15	0.18	99.98	-1.67	.93	.14	0.60	
5-1,86-88			157.9	49.69	15.65	10.01	8.05	11.30	2.55	0.18	1.37	0.14	0.18	99.12	-0.93	.75	.13	0.61	
5-2,51-53			159.0	49.66	15.28	10.21	7.96	12.03	2.57	0.29	1.40	0.12	0.17	99.69	-1.79	0.77	0.37	0.61	
6-1,55-57			167.0	50.053	16.14	9.58	7.66	12.24	2.66	0.25	1.44	0.14	0.17	100.31	-2.64	.94	.22	0.61	
7-1,53-55			174.5	49.42	15.63	10.47	8.03	11.82	2.56	0.19	1.42	0.14	0.19	99.87	-1.27	0.81	0.23	0.60	
7-1,132-134			175.4	49.42	15.30	10.42	8.02	11.70	2.68	0.25	1.42	0.14	0.18	99.53	-2.01	0.97	0.13	0.60	
1																			
8-1,62-64			184.1	49.96	15.38	10.61	7.93	11.50	2.58	0.31	1.51	0.16	0.19	100.13	-2.08	1.24	0.16	0.60	
8-2,60-62			185.6	50.13	15.30	10.29	7.17	11.80	2.76	0.27	1.55	0.14	0.19	99.60	-3.57	1.21	0.40	0.58	
10-1,51-53			203.0	49.85	15.41	10.90	7.70	1.79	2.68	0.17	1.54	0.15	0.20	100.34	-1.43	0.83	0.19	0.58	
11-1,56-58			212.5	49.82	15.28	10.71	7.77	11.79	2.63	0.20	1.54	0.14	0.20	100.08	-1.39	0.83	0.17	0.59	
11-2,5-7			213.55	50.21	15.39	10.61	7.87	11.74	2.49	0.25	1.54	0.14	0.18	100.41	-2.23	0.95	0.32	0.60	
12-1,127-129			215.8	50.00	15.07	10.49	7.76	11.50	2.78	0.29	1.51	0.14	0.18	99.72	-2.96	1.30	0.18	0.59	
13-1,45-47			216.4	49.86	15.28	10.65	8.16	11.60	2.64	0.25	1.53	0.16	0.18	100.31	-2.06	0.86	0.18	0.60	
13-2,49-51			218.0	50.30	15.10	10.26	7.50	11.50	2.66	0.26	1.51	0.14	0.17	99.40	-2.74	1.35	0.31	0.59	
13-2,89-91			218.4	50.14	15.41	10.29	7.64	11.68	2.67	0.28	1.51	0.16	0.17	99.95	-3.16	1.23	0.22	0.60	
2																			
13-3,4-6			219.0	50.11	15.53	10.57	7.42	11.32	2.88	0.27	1.67	0.15	0.17	100.09	-2.99	1.36	0.15	0.59	
14-2,17-19			235.85	49.70	15.30	10.81	7.60	11.10	2.83	0.29	1.64	0.16	0.17	99.70	-2.54	1.08	0.14	0.58	
15-1,85-87			235.85	49.96	15.14	11.01	7.49	11.17	2.91	0.29	1.65	0.16	0.17	99.95	-2.88	1.25	0.34	0.57	
15-2,129-131			237.8	49.90	14.98	11.20	7.93	11.01	2.68	0.14	1.63	0.17	0.17	99.81	-1.70	0.90	0.13	0.58	
15-3,16-19			238.1	50.36	15.24	11.04	7.68	11.05	2.72	0.15	1.63	0.16	0.17	100.20	-2.52	0.89	0.27	0.58	
15-4,76-79			240.2	49.84	15.01	11.15	8.05	11.00	2.71	0.15	1.63	0.15	0.18	99.87	-1.86	0.92	0.26	0.59	
15-5,70-73			241.7	49.73	15.11	11.23	8.06	11.17	2.80	0.32	1.61	0.16	0.18	100.37	-2.41	1.01	0.35	0.59	
3																			
16-1,83-85			245.3	49.39	16.08	9.21	7.86	12.16	2.46	0.23	1.20	0.12	0.16	99.67	-1.79	1.10	0.28	0.63	
16-2,40-42			246.4	49.60	16.69	9.45	8.33	12.09	2.41	0.20	1.20	0.11	0.17	100.25	-2.08	1.07	0.15	0.64	
16-4,20-22			249.20	49.5	16.93	9.98	7.20	12.72	2.54	0.23	1.33	0.13	0.18	100.75	-1.85	0.70	0.26	0.59	
16-5,96-98			25.14	49.80	17.05	9.19	7.80	12.36	2.59	0.22	1.21	0.11		100.33	-2.26	1.05	0.53	0.63	
17-1,132-134			268.8	49.75	16.85	9.52	7.78	12.38	2.45	0.22	1.21	0.11	0.17	100.44	-2.49	0.93	0.58	0.62	
18-1,117-119			274.18	49.94	17.04	9.36	7.69	12.35	2.24	0.20	1.21	0.12	0.17	100.31	-2.08	1.03	0.20	0.62	
19-1,4-6			277.5	47.91	19.10	10.46	4.31	13.25	2.92	0.22	1.33	0.18	0.19	99.87	-3.10	1.25	0.25	0.45	
4																			
20-1,53-55			287.0	49.92	17.64	8.81	7.39	12.79	2.48	0.21	1.04	0.11	0.16	100.55	-2.41	0.88	0.23	0.62	
20-3,33-35			289.8	49.28	17.30	8.69	7.53	12.66	2.50	0.21	1.10	0.10	0.16	99.53	-3.14	0.91	0.24	0.63	
20-5,16-18			291.2	49.88	17.65	9.06	7.44	12.70	2.49	0.21	1.16	0.11	0.16	100.86	-3.01	1.08	0.24	0.62	
21-2,24-26			297.7	49.67	17.73	8.59	8.43	12.60	2.33	0.18	1.101	0.11	0.15	100.80	-2.95	0.95	0.16	0.66	
22-1,93-95			306.4	49.39	17.96	8.49	8.41	12.54	2.36	0.18	0.99	0.09	0.16	100.48	-2.84	1.30	0.17	0.66	
5																			
23-1,87-89			315.9	49.08	16.01	10.58	7.37	11.74	2.63	0.35	1.58	0.17	0.18	99.69	-1.50	0.76	0.17	0.58	
24-1,94-96			325.5	48.83	16.06	10.45	7.92	11.63	2.64	0.28	1.54	0.16	0.18	99.69	-1.81	0.77	0.09	0.60	
6																			
26-1,7-10			343.6	49.42	15.86	10.33	8.16	11.26	2.74	0.21	1.49	0.15	0.19	99.81	-0.40	0.53	0.26	0.61	
30-1,60.0			377.6	48.96	15.83	10.86	7.53	11.58	2.58	0.25	1.49	0.16	0.19	99.43	-0.80	0.46	0.22	0.58	
30-1,60.0			377.6	49.15	15.51	10.27	8.07	11.19	2.73	0.18	1.50	0.15	0.19	98.94	+0.16	0.76	0.62	0.61	
7																			
32-1,45-47			386.95	49.17	15.88	10.13	7.48	11.66	2.64	0.34	1.45	0.16	0.18	99.09	-0.95	0.67	0.30	0.59	
7																			
32-1,69-71			387.20	49.60	17.97	8.23	7.20	12.14	2.66	0.24	1.22	0.12	0.14	99.52	-2.88	1.38	0.54	0.63	

Tableau V.15a: 22°N

Leg 46, site 396, forage 396B, éléments majeurs.

Eléments	Unité	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni		Cu	Zn	Sr	Zr	Eu	Tb	Hf	Ta	Th			
		XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	AA	NAA	XRF	NAA	AA	AA	XRF	XRF	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	
Méthode analytique		XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	AA	NAA	XRF	NAA	AA	AA	XRF	XRF	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	
4-1,103-105( 9)	A1	8600	238	275	1394	71400	41	45	46	146	146	66	80	126	97	104	1.25	0.75	2.50	0.176	0.125
5-1,86-88( 9)		8200	266	306	1394	70070	40	45	41	124	128	57	77	118	89	110	1.21	0.74	2.44	0.169	0.140
5-2,51-53( 6A)		8400	282	313	1316	71470	42	41	43	140	141	67	80	120	95	97	1.29	0.73	2.52	0.176	0.120
6-1,55-57( 7)		8600	250	278	1316	67060	39	41	45	138	142	67	80	146	90	110	1.26	0.73	2.52	0.176	0.105
7-1,53-55( 7)		8520	272	297	1471	73290	41	41	43	133	134	66	80	122	99	92	1.25	0.72	2.49	0.175	0.136
7-1,132-134( 11)		8520	288	319	1394	72940		41	44	133	143	66	80	124	96	106	1.20	0.72	2.28	0.169	0.120
8-1,62-64( 8)		9060	291	313	1471	74270	43	41	43	124	131	62	78	131	92	95	1.34	0.76	2.56	0.185	0.155
8-2,60-62( 6)	9300	303	282	1471	72030	43	41		130		67	80	141	109							
10-8,51-53( 9A)	9420	295	(364)	1549	76300	43	41	43	120	128	68	82	128	111	104	1.34	0.81	2.67	0.194	0.136	
11-1,56-58( 6)	9240	295	279	1549	74970	41	41	43	120	128	63	84	126	103	120	1.42	0.78	2.56	0.185	0.114	
11-2,5-7( 7)	9240	291	277	1394	74270	44	41	44	131	128	64	88	132	103	108	1.36	0.78	2.76	0.187	0.150	
12-1,127-129( 8)	9060	295	281	1394	73430	45	45	44	126	137	64	77	136	99	105	1.28	0.75	2.70	0.182	0.148	
13-1,45-47( 4)	9180	285	275	1394	74550	41	41	42	131	132	65	80	124	100	98	1.35	0.76	2.68	0.182	0.115	
13-2,49-51( 5)	9060	297	278	1316	71820	46	41	44	138	138	61	76	130	99	112	1.25	0.74	2.60	0.179	0.140	
13-2,89-91( 10)	9060	288	278	1316	72030	43	41	46	145	144	63	84	144	94	100	1.35	0.76	2.65	0.182	0.112	
13-3,4-6( 1)	10020	287	255	1316	73990	40	45	48	156	165	63	88	146	126	121	1.48	0.89	3.04	0.207	0.14	
14-2,17-19( 2)	9840	283	269	1316	75670	45	45	45	155	154	65	75	143	129	141	1.43	0.86	2.88	0.19	0.123	
15-1,85-87( 1)	9900	272	260	1316	77060	46	41	45	150	147	63	84	146	119	132	1.43	0.87	2.98	0.192	0.156	
15-2,129-131( 2)	9780	(235)	(237)	1316	78400	38	41	42	119	132	63	80	142	124	121	1.43	0.85	2.90	0.194	0.147	
15-3,16-19( 2B)	9780	287	277	1316	77280	43	41	42	119	133	63	82	140	116	100	1.43	0.84	2.80	0.189	0.155	
15-4,76-79( 4)	9780	283	268	1394	78050	43	41	43	116	138	63	80	142	117	118	1.52	0.85	3.10	0.20	0.160	
15-5,70-73( 9)	9660	282	263	1394	78610	45	41	44	149	152	64	86	156	111	130	1.46	0.85	3.03	0.196	0.160	
16-1,83-85( 10)	7200	238	301	1239	64470	39	37	41	129	138	65	74	127	78	89	1.12	0.64	2.08	0.138	0.104	
16-2,40-42( 4A)	7200	296	317	1316	66150	42	41	43	155	163	69	71	133	77	86	1.05	0.59	2.01	0.135	0.090	
16-4,20-22( 2)	7980	271	316	1394	69860	42	41	42	118	122	69	77	130	83	98	1.20	0.70	2.29	0.157	0.094	
16-5,96-98( 11)	7260	248	301		64330	39	41	42	133	138	66	81	135	81	90	1.09	0.63	2.15	0.139	0.082	
17-1,132-134( 11B)	7260	245	315	1316	66640	44	41	43	144	149	69	71	142	79	92	1.10	0.61	2.14	0.136	0.12	
18-1,117-119( 7D)	7260	244	307	1316	65520	40	37	40	119	125	63	71	131	81	90	1.10	0.62	2.16	0.137	0.11	
19-1,4-6( 1)	7980	282	306	1471	73220	41	49	44	102	106	73	80	143	88	93	1.21	0.68	2.39	0.153	0.12	
20-1,53-55( 4B)	6240	238	311	1239	61670	39	37	40	119	128	65	71	148	74	84	1.01	0.58	1.98	0.133	0.098	
20-3,33-35( 4)	6600	217	350	1239	60830	39	45	41	139	148	70	65	141	66	78	0.97	0.53	1.85	0.118	0.106	
20-5,16-18( 2)	6960	226	342	1239	64320	43	45	41	139	146	73	63	144	73	76	0.97	0.57	1.87	0.122	0.084	
21-2,24-26( 2)	6060	212	342	1160	60130	41	37	41	157	166	71	70	124	68	56	0.98	0.53	1.70	0.116	0.091	
22-1,93-95( 11)	5940	180	342	1239	59430	44	37	41	154	162	70	64	121	63	62	0.89	0.52	1.62	0.113	0.066	
23-1,87-89( 12)	9480	284	305	1394	74064	39	41	40	140	139	65	78	163	106	123	1.40	0.72	2.86	0.322	0.33	
24-1,94-96( 15)	9240	257	282	1394	73150	41	41	41	133	149	65	77	161	109	113	1.88	0.75	2.55	0.315	0.28	
26-1,7-10( 1)	8940	289	272	1471	72310	42	37	42	139	144	61	78	157	115	136	1.30	0.76	2.55	0.307	0.218	
30-1,60	C	8940	275	298	1471	76020	39	41	40	128	138	(116)	75	156	(80)	133	1.24	0.76	2.54	0.259	0.200
30-1,60		9000			1471	71890		41		137		66	82	150	103						
32-1,45-47( 7)	8700	266	301	1394	70910	41	41	41	122	130	67	72	154	108	121	1.28	0.74	2.50	0.271	0.178	
32-1,69-71( 10)	7320	230	322	1084	57610	39	41	38	155	164	61	64	162	85	95	0.92	0.62	2.07	0.226	0.180	

Tableau V.15b: 22°N

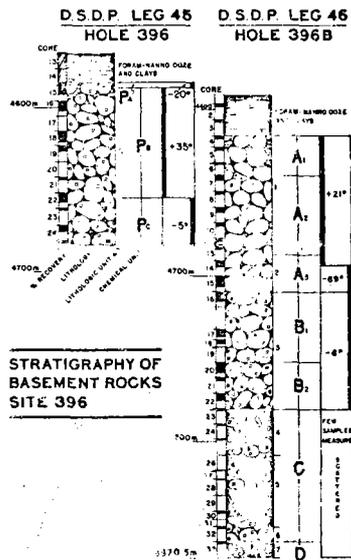
Leg 46, site 396, forage 396B, éléments trace (en ppm).

Nb. Echantillons	Unité	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	LoI
6	A1	49.69 0.25	15.59 0.31	10.15 0.32	0.18 0.01	7.93 0.15	11.83 0.32	2.56 0.04	0.24 0.05	1.41 0.03	0.14 0.01	99.72	-1.72
9	A2	50.03 0.17	15.29 0.13	10.53 0.22	0.18 0.01	7.72 0.28	11.63 0.14	2.58 0.08	0.25 0.04	1.53 0.02	0.15 0.01	99.89	-2.40
7	A3	49.94 0.23	15.19 0.19	11.00 0.24	0.17 0.00	7.75 0.27	11.12 0.11	2.72 0.08	0.23 0.08	1.64 0.02	0.16 0.01	99.92	-2.41
6	B1	49.67 0.20	16.91 0.13	9.45 0.29	0.17 0.01	7.78 0.36	12.34 0.22	2.40 0.12	0.22 0.01	1.23 0.05	0.12 0.01	100.27	-2.09
5	B2	49.63 0.29	17.66 0.24	8.73 0.22	0.16 0.00	7.84 0.53	12.66 0.10	2.36 0.08	0.20 0.02	1.06 0.07	0.10 0.01	100.40	-2.87
6	C	49.10 0.20	15.86 0.19	10.44 0.26	0.19 0.01	7.76 0.34	11.51 0.23	2.64 0.07	0.27 0.07	1.51 0.05	0.16 0.01	99.44	-0.88

Tableau V.16a: 22°N  
Leg. 46, site 396, forage 396B, éléments majeurs, valeurs moyennes pour chaque unité.

Unité	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Zr	Eu	Tb	Hf	Ta	Th				
	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	AA	NAA	XRF	NAA	AR	AR	XRF	XRF	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA		
A1 $\bar{x}$	8473	266	298	1380	70920	40.6	42.3	43.7	136	139	65	79.4	126	94	103	1.24	0.73	2.47	0.174	0.124
A1 s	153	19	18	58	2168	1.1	2.1	1.7	7.5	6.7	4	1.2	10	4	7.3	0.03	0.01	0.05	0.004	0.01
A2 $\bar{x}$	9160	293	282	1428	73741	43	41	43.5	129	133	64	81	132	101	104	1.35	0.76	2.65	0.182	0.136
A2 s	89	5	12	87	1537	1.6	1.3	1.3	8	5.5	2.2	3.8	6	6	7	0.04	0.02	0.006	0.005	0.016
A3 $\bar{x}$	9822	282	265	1338	77010	43	42	44	118	134	63	82	145	120	123	1.45	0.86	2.96	0.195	0.149
A3 s	113	5	7.7	38	1661	1	0.7	0.8	1.7	3.2	0.8	4.3	5.3	6.3	13	0.03	0.017	0.10	0.006	0.013
B1 $\bar{x}$	7360	257	309	1316	66161	41	39	42	133	139	67	74	133	80	91	1.10	0.63	2.14	0.14	0.100
B1 s	305	22	7.5	54	2025	2	2	1.2	14	15	2.5	4	5	2.2	4	0.05	0.038	0.09	0.008	0.014
B2 $\bar{x}$	6360	214	337	1223	61096	41	40	41	141	150	70	67	135	69	71	0.96	0.52	1.8	0.12	0.089
B2 s	417	21	15	34	1541	2	4	0.4	15	15	3	3.6	12	4.6	11.7	0.04	0.03	0.14	0.008	0.015
C $\bar{x}$	9050	276	291	1432	730566	40	40	41	133	140	65	77	156	108	125	1.30	0.76	2.6	0.295	0.22
C s	272	13	14	42	1806	1.3	1.6	0.8	7	7	2.3	3.3	4.7	4.4	9	0.06	0.02	0.14	0.03	0.04

Tableau V.16b: 22°N  
Leg 46, site 396B, forage 396, éléments trace, valeurs moyenne pour chaque unité.



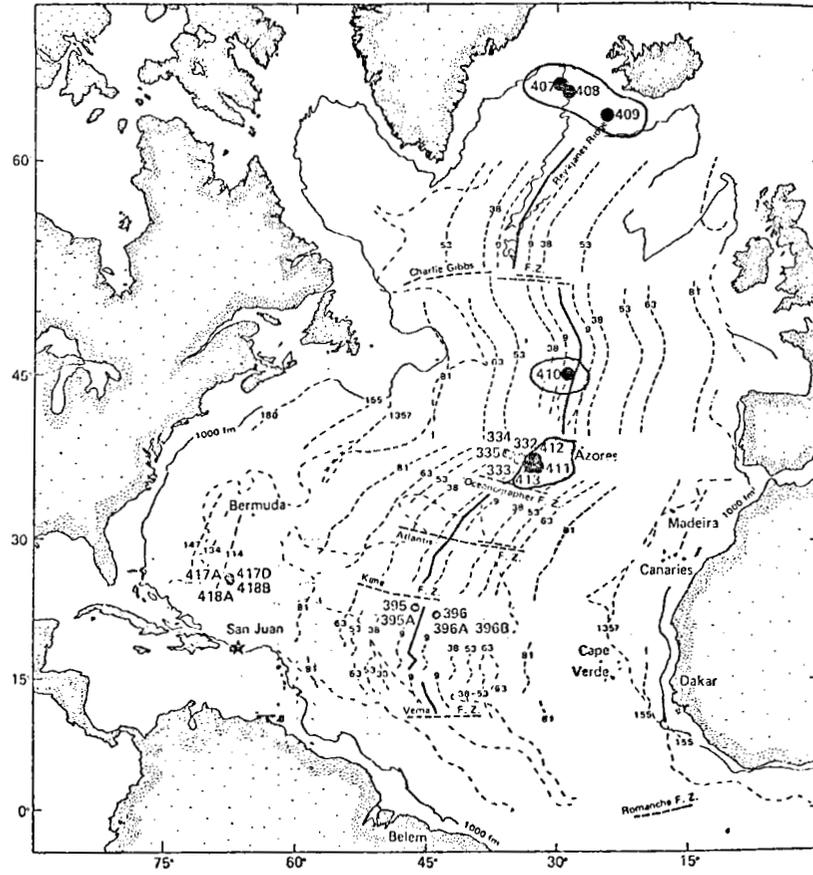


Figure V.8: Sites de forage du leg 49 de D.S.D.P.

D.S.D.P. : I.P.O.D. leg 49  
-----

Le leg 49 du programme de forage international I.P.O.D. a permis d'échantillonner la couche 2 à sept sites différents répartis dans trois zones de l'Atlantique nord : 63° N (Reykjanes Ridge), 45° N (Hudson Geotraverse) et 36° N (FAMOUS) (fig.V.8) . - 63° N (Schilling, 1973a, 1973b, 1975; O'Nions et al., 1976 ; Wood, 1976 ; Sigvaldason et al., 1976 ; Sigvaldason, 1974).

Forage 407 (63° 56.52' N, 30° 34.56' W). Ce forage est situé sur le flanc ouest de Reykjanes Ridge sur l'anomalie magnétique 13 (~ 35-40 millions d'années). La profondeur de forage dans le basalte est de 154,5 m. Quatre unités lithostratigraphiques ont été identifiées, constituées elles-mêmes de plusieurs coulées. Toutes les laves sont aphyriques ou contiennent moins de cinq % de phénocristaux de plagioclase, olivine ou clinopyroxène (abondance relative dans cet ordre). La limite entre les unités 2 et 3 est marquée par un changement de polarité magnétique ; les unités 3 et 4 sont séparées par un horizon sédimentaire d'une épaisseur de 25 m.

Forage 408 (63° 22.66' N, 28° 54.71' W). Ce forage est situé sur un haut topographique sur l'anomalie magnétique 6 (~ 20 millions d'années) ; la profondeur de forage n'est que de 23 m dans la couche basaltique. La plupart des basaltes sont aphyriques ou ne contiennent que de rares phénocristaux d'olivine ou de plagioclase.

Forage 409 (62° 36.98' N, 25° 57.17' W). Ce forage est situé près de la crête de la ride de Reykjanes sur l'anomalie magnétique 2' (limite Matuyama - Gauss : ~ 2.3 millions d'années). 240 m de basalte ont été forés ; les échantillons sont relativement frais. Quatre unités différentes ont été distinguées, constituées de basaltes aphyriques ou subaphyriques. - 45° N "Hudson Geotraverse" (Aumento et al., 1971 ; Muir and Tilley, 1964 ; Aumento, 1968 ; Aumento and Loubat, 1971 ; Hart, 1971 ; Frey et al., 1968 ; Erlank and Kable, 1971 ; White et al., 1976 ; Aumento, 1969).

Forage 410 (45° 30.51' N, 29° 28.56' W). La profondeur de ce forage dans le basalte est de 47.5 m. Deux unités de brèches basaltiques ont été identifiées. L'unité 2 a une composition de mugéarite (MgO : 3 - 5% ; néphéline normative : 2 - 4% ; plagioclase normatif An 45) contenant jusqu'à 10% de phénocristaux de clinopyroxène, olivine et plagioclase. Les pyroxènes se situent au niveau de la frontière diopside-hedenbergite.

Forage 410 A (situé à 120 m au Sud de 410) ; la profondeur dans le basalte est de 49 m. La séquence basaltique forée est constituée d'un ensemble complexe de pillows. Comme pour le forage 410, ces échantillons présentent une affinité alcaline.

- 36° N - "FAMOUS" (Schilling, 1975 ; White and Bryan, 1977 ; White and Schilling, 1978 ; Ballard et al., 1975 ; Leg 37 initial reports of D.S.D.P. 1977 ; ARCYANA, 1977).

Forage 411 (36° 45.97' N, 33° 23.30' W). Ce forage est situé à 10 km (1 million d'années) à l'Ouest de la vallée de la zone FAMOUS suivant une ligne perpendiculaire au rift sur laquelle étaient implantés les forages du leg 37. La profondeur pénétrée dans la couche basaltique est de 45,5 m. Deux unités ont été identifiées : une unité aphyrique (présence de rare phénocristaux d'olivine) et une unité porphyrique à plagioclase associés à des phénocristaux d'olivine et de clinopyroxène.

Forage 412 (36° 33.74' N, 33° 09.96' W). Ce forage est situé à l'Est de la vallée du rift et au Sud de la zone de fracture B de la zone FAMOUS ; (âge : 1,6 millions d'années, profondeur forée dans le basalte : 18 m). Les échantillons sont aphyriques et porphyriques (plagioclase > clinopyroxène et olivine).

Forage 412 A (même position que 412) : la profondeur forée dans la couche basaltique est de 131 m. Les premiers 50 m sont similaires au forage 412. Au-dessous de cette profondeur, les basaltes sont aphyriques ou avec présence de quelques phénocristaux.

Forage 413 (36° 32.6' N, 33° 10.5' W) ; ce forage est situé approximativement à 2 km au Sud du site 412, sur le côté est de l'anomalie magnétique 2' (~3,5 millions d'années). La couche basaltique a été forée sur 39,5 m. Deux unités sont distinguées : la première est vitreuse à microcristalline ; la deuxième contient quelques phénocristaux d'olivine. Parmi l'ensemble des échantillons basaltiques disponibles dans la zone FAMOUS, c'est l'unité 413 - 1 qui présente le plus fort enrichissement en terres rares légères.

Les données originales sont présentées dans Wood et al. (1979).

Echantillon	Intervalle (cm)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>
35.1.4	42-44	49.79	12.97	16.34	.19	5.02	8.96	2.90	.54	3.91	.38	101.00	.19	.49
36.3.1c	60-62	48.98	15.03	12.54	.15	7.45	11.71	2.47	.17	1.59	.14	100.23	.17	.30
38.2.17	168-150	48.20	13.73	13.16	.20	6.61	10.94	2.72	.23	2.96	.29	99.04	.23	1.46
39.1.4	69-51	48.19	13.26	14.43	.22	6.02	10.92	2.48	.38	2.88	.33	99.11	.57	.22
39.2.6	59-61	47.49	13.14	15.16	.21	7.16	10.91	2.44	.25	2.85	.34	99.95	.89	.56
39.3.4	61-43	48.31	12.93	14.75	.20	6.12	10.76	2.74	.30	2.85	.34	99.35	.91	.16
41.1.3	16-20	48.16	12.87	15.51	.21	5.15	10.55	2.24	.78	2.83	.32	98.62	.72	.63
42.1	87-89	48.32	12.89	14.72	.22	6.32	10.74	2.50	.35	2.87	.33	99.26		.55
44.1	17-19	46.50	14.12	14.91	.16	6.40	11.42	2.32	.76	2.15	.33	99.07	1.24	1.84
45.1	69-71	47.91	15.49	11.86	.12	7.45	9.67	2.50	.32	2.26	.28	97.86	1.45	3.18
45.2	40-42	47.88	14.50	12.20	.16	6.98	11.81	2.58	.58	2.19	.33	99.21	1.16	1.77
45.3.11	115-120	48.69	15.23	11.92	.13	8.10	10.60	2.65	.19	2.15	.23	99.89	.19	1.31
45.3	122-124	48.55	15.38	10.86	.12	8.31	10.84	2.48	.19	2.13	.27	99.13	2.03	1.77
45.4	53-55	49.22	14.72	11.72	.13	8.49	9.93	2.50	.27	2.01	.28	99.27	2.05	2.13
46.1.5	63-65	48.26	14.11	12.59	.21	7.21	11.81	2.50	.53	1.93	.27	99.42	1.69	1.87
46.2	59-61	48.89	14.58	11.96	.13	9.17	9.93	2.50	.26	1.96	.27	99.65	2.20	1.95
46.3.4a	66-68	44.52	13.72	13.06	.21	6.11	16.39	2.24	.53	1.84	.35	98.97	1.15	5.95
46.4.4	3-5	45.48	15.15	14.39	.19	5.59	12.91	2.32	.77	2.05	.35	99.20	1.27	3.32
47.1.1c	57-59	48.45	14.63	10.91	.13	8.46	10.34	2.36	.27	2.00	.28	97.83	2.40	1.61
47.2.1b	12-15	47.30	13.96	14.12	.19	6.60	11.27	2.16	.38	1.96	.32	98.26	2.16	1.70
47.2.2	73-75	47.24	13.90	13.31	.22	6.58	11.85	2.46	.62	1.86	.25	98.29	1.26	2.78
47.3.2		48.66	14.55	11.60	.13	7.41	11.15	2.30	.10	1.97	.27	98.14	2.58	1.47
47.4.1f	41-47	48.13	14.06	12.68	.20	6.53	11.74	2.50	.57	1.94	.28	98.43	1.76	1.68

Tableau V.17a: Reykjanes Ridge, (35-40 my.)

Leg 49, site 407, forage 407 : éléments majeurs.

Echantillon	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sb	Cs	Ba					
	J	B	B	B	B	B	B	J	B	J	B	B	B	J	J	J					
35-1,42-44	43.7	23441	530	24	1471	114380	54	48.6	34	31	10.3	7.0	208	57.6	252		30.8	.075		96	
36-3,60-62																					
38-2,148-150																					
39-1,55-59	40.6	17266	403	106	1704	101010	54	52	75	82	6.1	4.4	235	42.4	200	195	22.8	.23	.08	74	
39-2,62-64		17086	406	107	1626	106120	52		71		3.6		232	38.9	186		23.3				
39-3,45-47	41.2	17086	409	106	1548	103250	54	51.2	68	71	4.		232	44	193		23			60	
41-1,16-20	40.3	16966	398	91	1626	108570	55	49.5	66	63	17.2	16.1	221	40	195	182	23	.04	.4	81	
42-1,82-89	39.6	17206	406	93	1704	103040	53	49	71	65	12.9	5.0	228	40.3	205	197	22.9	.04	.06	71	
44-1,17-19		12884	378	254	1239	104370	48		71												
45-1,69-71		13549	405	292	929	83020	55		110												
45-2,40-42		13129	372	275	1239	85400	83		140												
45-3,115-124	45.6	12769	383	313	929	76020	71	71.3	146	147											
45-4,53-55		12050			1007	82040															
46-1,63-65	41.1	11570	325	263	1626	88130	59	56.8	99	102	8.3		181	39.5	137		15.3		.4		
46-2,59-61		11750	378	296	1007	88720	55		121		2.9		174	35.2	125		15.1				
46-3,66-68		11031	349	294	1626	91420	48		110												
46-4,68-72	42.0	12290	405	224	1471	100730	49	46.4	101	95	11.2	10.0	195	42	135	140	16.8	.59	.27	37	
47-1,48-59	43.3	11990	390	294	1667	76370	50	50.9	102	101	4.2		179	41.7	129		14.8			36	
47-2,10-12	40.0	11750	357	261	1471	98840	51	48.4	122	121	6.3	5.7	173	35.9	130		17.7				
47-2,86-88	39.3	11951	362	257	1704	93170	48	45.1	92	88	7.9		169	36.2	123		15.6	.18	.19	47	
47-3,19-21	42.3	11810	365	265	1007	81200	52	51.8	101	106	1.5		178	33.3	118		14.6				
47-4,39-41	40.7	11630	352	258	1548	88760	61	61.5	124	127	7.5	5.6	175	38.6	132		15.2		.44		

Tableau V.17b: Reykjanes Ridge, (35-40 my.)

Leg 49, site 407, forage 407, éléments traces(en ppm).

J : analyse par activation neutronique (J.L.JORON). B : analyse par spectrométrie de fluorescence X (C.O.B.).

Echantillon	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Th	U							
	J	W	W	W	J	W	J	W	W	W	J	W	J	J							
35-1,42-44	17.7	47.2	31.8	8.89	2.9	2.89	10.0	1.35	1.62	.8	4.76	.77	6.1	6.58	1.88	1.67	1.85	.5			
36-3,60-62		14.9	10.0	3.45		1.32			.73	.3	2.65	.43		2.18							
38-2,148-150		44.8	25.5	7.29		2.49			1.21	.6	3.90	.62		4.91			1.28				
39-1,55-59	13.5	41.3	25.2	7.06		2.45			1.02	1.19	.6	3.61	.58	5.0	5.00	1.43	1.24	1.42	.35		
39-2,62-64																					
39-3,45-47	14.8				2.3				1.05				5.1		1.46	1.22			.32		
41-1,16-20	12.6				2.23				.99				4.9		1.38	1.21			.33		
42-1,82-89	12.9	35.6	24.7	6.86	2.18	2.32			.98	1.18	.5	3.49	.57	5.0	4.84	1.40	1.28	1.27	.44		
44-1,17-19																					
45-1,69-71																					
45-2,40-42																					
45-3,115-124	8.4	24.0	17.0	5.20	1.71	1.90			.77	.91	.6	3.22	.52	3.4	3.96	.90	.68	.61	1.52		
45-4,53-55																					
46-1,63-65	9.1				1.65				.84				3.2		.83	.68		1.02			
46-2,59-61																					
46-3,66-68																					
46-4,3-5		22.0	15.7		1.75									3.34							
46-4,68-72	9.2				1.68				.86	.94	.7	3.11	.52	3.6	3.34	.90	.72		.57		
47-1,48-59	9.3	23.1	16.1	5.02	1.82	1.71	5.1	.87	.93	.5	3.21	.55	3.1	3.23	.87	.62	.67		.16		
47-2,10-12	8.9				1.74			.84					3.3		.81	.71					
47-2,86-88	8.6				1.56			.78					3.1		.79	.60				.16	
47-3,19-21	8.4				1.61			.83					3.2		.86	.63				.13	
47-4,39-41	9.2				1.65			.83					3.2		.85	.72				.23	

Tableau V.17b: Reykjanes Ridge, (35-40 my.)

Leg 49, site 407, forage 407, éléments traces(en ppm). (suite).

J : analyse par activation neutronique (J.L.JORON). W : analyse par activation neutronique (D.WOOD).

Echantillon	Intervalle (cm)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>
35.1.8	108-110	48.19	15.35	13.06	.16	5.16	13.71	2.06	.59	1.62	.24	100.14	1.32	2.37
36.1.10	100-103	46.94	14.11	13.47	.26	5.72	13.07	2.36	.74	1.64	.19	98.50		
36.1.10b	100-103	47.42	14.55	12.54	.20	6.42	14.53	2.30	.43	1.59	.18	100.16	3.04	3.68
36.2.1b	12-14	46.05	15.42	13.52	.19	4.88	15.46	2.24	.58	1.62	.25	100.21	2.53	3.81
36.3.4	46-49	48.88	14.66	11.49	.14	7.51	13.28	2.34	.38	1.62	.20	100.50	2.59	2.26
36.4.3c	37-40	45.62	14.12	13.76	.39	5.89	12.23	2.50	.74	1.71	.23	97.19	2.39	1.77
36.5.4a	44-47	48.58	14.71	11.60	.14	8.40	12.57	2.36	.43	1.39	.16	100.34	2.29	2.38
37.1.3	30-35	50.20	15.08	10.75	.14	8.35	11.99	2.36	.24	1.65	.20	100.96	2.32	1.26
37.1.5	50-52	49.00	14.75	11.17	.13	8.50	11.60	2.38	.21	1.53	.18	99.45	2.38	1.44
37.1.13	114-120	49.34	14.80	11.85	.11	8.72	10.62	2.42	.24	1.51	.16	99.77	3.49	1.63
37.2.18	128-133	48.05	14.23	13.92	.16	8.53	9.87	2.50	.27	2.47	.31	100.31	4.49	1.98
37.2.18	128-133	48.20	14.81	13.22	.14	8.32	9.34	2.84	.30	2.26	.26	99.69	.30	2.03
37.3.16	118-122	48.51	15.12	12.24	.15	8.76	10.77	2.20	.17	1.96	.24	100.12	4.20	1.52
38.1.19	119-122	47.48	15.35	12.46	.16	8.59	10.82	2.22	.09	1.82	.22	99.21	3.72	1.63
38.3.19		48.28	14.41	13.40	.25	8.24	11.02	2.30	.14	2.13	.27	100.44	3.49	1.65

Tableau V.18a: Reykjanes Ridge, (20 my.)

Leg 49, site 408, forage 408 : éléments majeurs.

Echantillon	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni		Rb		Sr	Y	Zr	Nb	Sb	Cs	Ba	
	J	B	B	B	B	B	B	J	B	J	B	J	B	B	J	B	J	J	
35-1,108-110		9712	374	314	1239	91420	38		52		11.8	255	28	107				14.3	
36-1,100-103	36.9	9532	332	267	1549	87780	46	46.4	103	102	6.4	227	26.8	105	123	14.3	.22	.3	
36-2,12-14	40.0	9712	370	299	1471	94640	47	45.6	73	69	12.5	207	31.2	99	120	14.0	.72	.31	
36-3,46-49	39.1	9792	323	294	1084	80430	51	49.5	117	115	6.4	221	29.9	113	120	15.1	.05	.29	
36-4,37-40	37.7	10456	347	256	3020	96320	50	48.6	91	97	15.0	204	29.4	110	118	15.0	.19	.53	70
36-5,44-47	39.8	8333	295	344	1084	81200	43	42.7	98	97	8.0	177	24.6	84	92	10.3	.08	.36	
37-1,30-35		9694	335	322	1062	75250	53		150		3.9	190	29.6	102				13.9	
37-1,50-52	42.4	9172	319	320	1007	78190	49	49.1	106	110	2.7	188	26.7	100	130	13.6			36
37-1,114-120	39.3	9052	322	303	851	82950	49	48.3	106	111	2.9	177	27.8	98	110	11.4			36
37-2,128-133		14808	398	368	1239	97440	54		97		2.3	211	41.4	161				21.5	
37-3,114-120	37.3	11750	330	258	1162	85680	53	51.3	129	134	.9	184	32.0	124	123	16.0	.02		
38-1,130-134	33.2	10911	291	306	1239	87220	54	52.0	153	155	1.4	210	30.6	117	132	16.1			
38-3,119-122	39.5	12578	356	249	1907	93800	53	49.5	121	119	1.2	203	34.6	149	156	19.8			47

Tableau V.18b: Reykjanes Ridge, (20 my.)

Leg 49, site 408, forage 408, éléments traces(en ppm).

J : analyse par activation neutronique (J.L.JORON). B : analyse par spectrométrie de fluorescence X (C.O.B.).

Echantillon	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Th	U				
	J	J	W	W	W	J	W	W	W	W	J	W	J	W				
35-1,108-110			21.7	14.4	4.09		1.41	4.5		.64	.4	2.55	.44	2.66			.91	
36-1,100-103			20.9	13.1	4.01	1.24	1.30	4.4	.68	.60		2.39	.40	2.58	2.45	.75	.54	.92
36-2,12-14	8.7					1.39			.71					2.61		.77	.54	
36-3,46-49						1.36			.68					2.68		.78	.52	
36-4,37-40						1.45			.74					2.88		.84	.57	
36-5,44-47						1.10			.60					2.26		.63	.41	
37-1,30-35																		
37-1,50-52	7.6					1.35			.62					2.62		.74	.51	.11
37-1,114-120						1.24			.66					2.5		.69	.49	
37-2,128-133			26.2	18.5	5.88		1.79	4.9		.79	.4	2.93	.50		3.42			.96
37-3,114-120						1.59			.78					3.14		.86	.52	
38-1,130-134	8.8					1.59			.75					2.99		.85	.51	
38-3,119-122			22.2	15.7	4.47	1.76	1.54	4.7	.88	.80	.4	2.62	.42	3.44	2.87	.97	.56	.42

Tableau V.18b: Reykjanes Ridge, (20 my.)

Leg 49, site 408, forage 408, éléments traces(en ppm). (suite).

J : analyse par activation neutronique (J.L.JORON). W : analyse par activation neutronique (D.WOOD).

Echantillon	Intervalle (cm)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>
7.6.5	71-75	49.86	14.59	12.04	.16	7.86	11.89	2.24	.10	1.32	.11	100.17	.15	.45
7.7.1	3-4	51.11	14.87	11.85	.17	7.02	12.16	2.27	.09	1.27	.14	100.95	2.54	.19
8.1.13	104-107	49.85	13.77	12.92	.21	7.09	12.29	2.21	.24	1.57	.11	100.06	.14	.31
9.1.17	131-135	50.60	13.84	12.29	.22	6.60	12.06	2.24	.15	1.45	.13	99.58	.06	.03
9.3.2	17-20	49.91	13.65	13.65	.22	6.79	11.78	2.24	.18	1.50	.14	100.06	.52	.06
9.3.2	6-10	50.97	14.10	12.78	.22	6.88	11.82	2.37	.25	1.51	.13	100.03	.25	.48
9.3.14	133-135	50.06	14.36	12.09	.18	7.91	11.99	2.21	.09	1.27	.10	100.26	.25	.24
10.1.2	10-12	50.40	13.97	12.42	.18	8.34	11.85	2.20	.10	1.30	.13	100.89	1.46	.32
10.1.2	10-12	50.46	14.68	12.32	.17	8.05	11.49	2.39	.13	1.29	.11	101.09	.13	.85
10.2.2	16-20	49.60	14.60	11.87	.19	7.22	12.43	2.27	.14	1.20	.12	99.64	.77	.47
10.2.3	22-24	49.58	11.15	19.78	.29	3.86	8.82	2.63	.39	2.77	.30	99.57	.50	.13
10.3.4c	69-72	49.99	14.57	12.90	.19	7.00	12.33	2.30	.20	1.34	.14	100.96	1.42	.27
10.4.9	91-94	49.90	14.43	11.77	.17	7.93	11.90	2.22	.08	1.23	.13	99.59	.69	.36
10.5.5	41-44	49.94	14.77	11.86	.18	7.76	12.02	2.27	.07	1.32	.13	100.14	.73	.21
10.6.11	130-132	49.39	14.69	11.45	.18	7.99	12.12	2.22	.08	1.23	.11	99.46	.81	.23
10.7.1	4-6	49.99	14.40	11.81	.18	8.30	12.05	2.20	.10	1.26	.11	100.40	.14	.52
10.8.7	62-64	49.60	14.23	12.50	.18	8.15	11.75	2.20	.05	1.42	.12	100.02	1.11	.45
11.1.6	61-63	50.43	14.07	13.46	.18	7.51	11.81	2.10	.58	1.20	.17	101.51	.36	.70
11.2.8	80-82	50.56	14.41	12.10	.17	8.58	11.94	2.18	.07	1.20	.17	101.38	.74	.22
11.3.2f	80-82	49.91	14.09	11.88	.17	8.15	11.89	2.21	.07	1.17	.14	99.78	1.64	.13
11.2.3f	80-82	50.31	14.57	11.96	.17	8.41	11.60	2.30	.12	1.17	.11	100.72	.12	.97
11.4.3a	43-45	50.43	13.95	12.99	.18	8.21	11.42	2.20	.11	1.40	.16	101.05	1.05	.27
12.1.15a	141-143	49.93	15.05	11.64	.19	8.09	12.69	2.13	.22	1.13	.15	101.22	.41	.23
13.1.5	39-41	49.71	15.04	11.58	.19	8.15	12.74	2.19	.17	1.15	.14	101.06	.47	.25
13.1.5	39-41	49.69	14.99	11.82	.18	7.64	12.65	2.22	.30	1.12	.10	100.71	.30	.60
13.3.5	40-42	48.10	14.14	13.39	.21	8.14	11.74	2.30	.09	1.77	.24	100.12	1.06	.64
14.1.6	51-53	48.69	14.39	13.31	.19	8.04	11.76	2.30	.12	1.77	.23	100.80	1.12	.68
15.1.6	131-133	47.43	13.89	12.96	.20	6.62	14.61	2.29	.23	1.76	.22	100.21	.53	2.82
15.1.6	131-133	46.60	13.35	13.70	.21	6.91	14.71	2.20	.22	1.90	.25	100.05	.98	2.79
15.2.5	36-38	47.05	13.78	13.46	.20	7.30	14.04	2.25	.22	1.76	.26	100.32	.62	2.37

Tableau V.19a: Reykjanes Ridge, (2.3 my.)

Leg 49, site 409, forage 409 : éléments majeurs.

Echantillon	Intervalle (cm)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>
15.3.9	105-107	49.23	14.38	13.20	.20	7.37	12.16	2.26	.27	1.71	.24	101.02	1.01	1.15
15.4.5a	64-66	49.46	14.05	13.50	.19	7.23	11.96	2.35	.32	1.82	.23	101.11	.82	.89
15.5.11	88-92	48.57	14.21	13.94	.20	6.95	13.39	2.27	.24	1.78	.25	101.80	.79	1.31
15.6.7	55-59	48.63	14.03	13.68	.21	7.19	12.77	2.32	.30	1.82	.24	101.19	.45	1.45
16.1.	120-123	49.12	14.13	13.28	.19	7.59	11.88	2.50	.30	1.65	.21	100.85	1.01	.81
16.2	15-18	45.99	13.51	12.40	.20	7.51	16.99	2.16	.23	1.62	.26	100.87	.53	4.82
17.1.5a	36-40	47.81	14.04	13.52	.20	8.08	11.51	2.24	.24	1.66	.21	99.51	1.00	.62
18.1.	74-78	46.20	14.01	13.22	.21	6.72	15.90	2.27	.23	1.65	.29	100.70	.50	4.60
18.2.11b	106-109	48.86	14.26	13.12	.19	7.15	12.60	2.35	.24	1.70	.22	100.25	.85	1.99
18.3.	88-91	48.71	14.27	13.74	.20	7.86	11.76	2.28	.30	1.66	.22	101.00	1.91	.97
18.3.13	88-91	47.31	14.22	12.00	.20	7.33	13.90	2.24	.37	1.68	.18	99.43	1.78	2.71
20.1.4	31-36	49.22	14.14	13.33	.20	7.49	11.67	2.30	.13	1.70	.22	100.40	2.18	.60
21.1.11	83-86	48.75	14.10	13.48	.21	7.72	12.09	2.20	.17	1.78	.22	100.72	.66	.34
21.2.10	87-89	48.76	14.17	13.65	.20	7.76	11.63	2.26	.28	1.78	.20	100.69	1.63	.68
22.1.10	90-93	46.51	13.64	13.75	.20	7.62	14.20	2.16	.28	1.70	.25	100.31	1.18	.27
23.1.12	111-114	44.52	13.38	12.52	.19	7.33	18.03	2.14	.19	1.58	.26	100.13	.76	6.34
23.2.5	38-41	47.79	13.64	14.39	.20	7.32	12.10	2.17	.38	1.75	.22	99.96	.97	1.36
24.1.15	143-146	47.87	14.20	13.40	.22	7.02	12.24	2.60	.26	1.69	.23	99.73	.84	1.89
24.2.7	87-90	49.30	14.01	12.93	.19	8.09	11.65	2.30	.18	1.74	.22	100.61	.46	.16
24.2.7	87-90	49.86	14.32	12.75	.18	7.70	11.39	2.44	.23	1.78	.19	100.84	.78	
24.3.7a	80-83	49.12	14.20	12.85	.17	8.20	11.56	2.26	.17	1.71	.20	100.44	.48	.41
24.4.7	89-92	49.11	13.93	13.39	.18	7.77	11.57	2.21	.16	1.73	.20	100.25	.89	.41
24.5.5b	69-72	49.09	14.63	12.94	.17	7.45	11.69	2.30	.21	1.75	.21	100.44	1.48	.60
24.6.4b	102-105	49.42	13.95	12.28	.17	8.32	11.00	2.34	.22	1.70	.17	99.57	4.11	
24.7.5	56-59	47.78	13.72	12.45	.18	8.56	11.40	2.25	.18	1.69	.20	98.41	1.06	.84
25.1.6	82-85	48.48	13.73	14.60	.22	6.69	11.28	2.45	.48	1.76	.22	99.91	.98	.93
25.2.4a	35-38	48.44	14.74	11.49	.17	8.49	12.20	2.22	.21	1.26	.18	99.40	1.14	1.01
25.3.9	79-82	48.69	14.24	12.98	.19	7.12	12.35	2.35	.23	1.64	.23	100.02	1.22	
25.4.11		48.89	14.28	13.61	.20	6.99	12.37	2.30	.25	1.68	.23	100.80	.98	1.58
26.1.3	29-32	48.81	13.69	14.14	.21	7.41	11.81	2.40	.26	1.83	.23	100.79	2.19	1.22
28.1.7	73-76	47.16	14.24	12.76	.19	7.18	15.06	2.50	.25	1.64	.24	101.22	.80	3.59
31.1.3		49.69	14.17	12.99	.19	7.00	11.39	2.27	.42	1.77	.18	100.07	.50	.97
31.1.4b	121-124	47.76	13.74	13.12	.19	7.42	11.69	2.37	.22	1.70	.23	98.44	1.28	1.29
31.2.8	80-83	48.80	13.90	13.83	.19	7.70	11.44	2.26	.37	1.70	.22	100.41	1.60	1.10

Tableau V.19a: Reykjanes Ridge, (2.3 my.)

Leg 49, site 409, forage 409 : éléments majeurs. (suite).

Echantillon	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co		Ni		Rb		Sr	Y	Zr		Nb	Sb	Cs	Ba
	J	B	B	B	B	B	B	J	B	J	B	J	B	J	B	J	B	J	J	J
7-6,71-75	44.2	7913	376	254	1239	84280	49	49.5	86	93	1.4		86	33.8	73	89	4.4			
7-7,3-4		7613	358	244	1316	82960	50		86		1.2		91	30.4	72		5.6			
8-1,116-120	46.6	8213	568	160	1626	90440	57	48.8	59	60	5.7		91	33.3	78	87	5.1		.14	
9-1,127-130	47.1	8693	394	115	1703	86030	56	55.1	83	69	2.5	3.2	98	37.3	90	86	5.5		.09	18
9-3,6-10																				
9-3,17-20	46.4	8992		118	1703	95550		50.8		53	4.7		91	35.5	91	74	7.1		.11	
9-3,119-121	43.5	7613	350	152	1394	84630	50	50.5	83	80	2.3		86	28.8	74	73	4.6			
10-1,10-12	44.6	7793	340	143	1394	86940	51	50.7	79	80	1.9		89	30.9	81	76	4.9			
10-2,16-20	45.0	7194	325	141	1471	83090	50	51.5	84	82	3.7		94	28.7	69	93	4.2	.037	.06	
10-2,22-24	43.4	12662	489	13	2246	138460	61	55.8	28	27	7.9	5.1	98	76.0	193	211	14.5	.09	.12	34
10-3,69-72	45.9	8033	338	157	1471	90300	46	47.6	68	67	4.4	2.5	94	32.2	73	93	5.9	.037	.09	16
10-4,91-94	44.1	7374	322	161	1316	82390	51	49.8	99	83	2.0		87	28.6	71	67	5.4			
10-5,41-44	43.3	7913	345	156	1394	83020	51	49.7	80	76	1.1		90	31.2	74	91	5.7			
10-6,130-132	44.8	7374	341	153	1394	80150	51	52.4	90	92	2.9		88	24.9	67	83	3.8			
10-7,4-6	43.8	7553	339	165	1394	82670	51	49.8	88	82	1.4		86	27.3	83	71	5.1			
10-8,62-64	43.7	8513	360	159	1394	87500	55	53.3	93	94	.7		86	34.6	92	79	6.1			
10-1,61-63	41.9	7050	314	158	1366	92335	48	49.4	85	84	12.9	11.1	83	29.2	63	77	4.6	.01	.18	
11-2,80-82	43.5	7050	314	154	1290	83006	50	50.6	93	90	1.1		90	29.5	75	78	3.8			
11-3,80-82	44.3	7014	328	163	1316	83216	51	52.9	95	99	1.9		86	27.3	70	80	3.8			
11-4,43-45	47.1	8267	347	161	1373	89111	51	51.8	98	79	1.4		88	35.1	94	100	6.0			10
12-1,141-143	43.5	6572	324	270	1449	80257	52	52.9	107	117	4.9		95	26.8	60	78	3.5		.11	
13-1,39-41	50.0	6791	311	265	1449	79844	54	56.9	118	115	3.9		95	29.4	63	83	2.4		.06	
13-3,40-42	41.7	10611	397	288	1259	93730	60	53.5	120	108	3.7		101	41.1	110	75	10.9	.09		
14-1,51-53	43.3	10611	398	312	1471	93170	54	51.6	113	106	3.8		104	38.1	110	121	11.5	.06	.17	
15-1,131-133	42.3	11390	417	245	1626	95900	49	47.9	81	75	4.2		132	43.6	112	118	12.7	.03	.08	
15-1,130-132	43.4	10551	402	287	1548	90720	53	58.0	112	112		2.7			119	119	.02	.05	.25	
15-2,36-38	43.0	10551	404	288	1548	92806	48	44.8	92	92	5.7	2.2	127	39.8	116	112	12.2	.07	.10	28
15-3,105-107	43.0	9974	394	306	1507	89908	52	49.1	100	98	4.0		160	37.8	99	121	9.7	.02	.07	
15-4,64-66	45.4	10692	475	292	1442	92610	53	50.1	93	86	5.8		105	37.8	110	109	10.5	.09		
15-5,88-92		10351	424	266	1502	94164	50		94		4.8		119	41.5	116		12.2			
15-6,55-59	43.9	10747	413	266	1602	94323	50	47.2	91	92	6.4		117	39.7	118	125	12.0	.09		
16-1,120-123		9743	375	302	1449	91565	49		114		5.4		121	38.2	96		11.7			

Tableau V.19b: Reykjanes Ridge, (2.3 my.)

Leg 49, site 409, forage 409, éléments traces(en ppm).

J : analyse par activation neutronique (J.L.JORON). B : analyse par spectrométrie de fluorescence X (C.O.B.).

Echantillon	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Th	U						
	J	J	W	W	W	J	W	W	J	W	W	J	J	J						
7-6,71-75	3.1				1.08		.7				2.1	.27	.27	.16						
7-7,3-4					1.12		.76				2.04	.30	.25							
8-1,116-120					1.25		.78				2.42	.35	.30	.13						
9-1,127-130	3.6					1.20		.79	.6	2.96	.58									
9-3,6-10		10.7	8.5	3.56								2.20								
9-3,17-20	3.6				1.22		.74				2.26	.31	.26							
9-3,119-121	2.1				.96		.55				1.72	.25	.24							
10-1,10-12	3.1	6.9	6.7	2.11	.96	.89	3.	.62	.57	.4	2.54	.41	1.97	1.59	.27	.20	.34			
10-2,16-20	2.9				.99		.69				1.75	.248	.20							
10-2,22-24	8.4				2.35		1.65				5.21	.792	.72	.15						
10-3,69-72	2.83	4			1.00		.65				2.03	.37	.23	.11						
10-4,91-94	2.8				.99		.63				1.86	.27	.21							
10-5,41-44	2.9				.98		.63				1.94	.28	.19							
10-6,130-132					.94		.57				1.81	.247	.18							
10-7,4-6	2.7				1.00		.60				2.46	.275	.31							
10-8,62-64	3.0	11.5	8.8	2.99	1.10	.95	3.3	.68	.57	.4	2.41	.38	2.09	1.74	.31	.26	.08			
11-1,61-63					.95		.61				1.76	.24	.19							
11-2,80-82	3.1				.97		.60				1.8	.254	.17							
11-3,80-82	2.4	5.97	5.9	2.09	.91	.78	2.8	.6	.50	.3	2.14	.33	1.71	1.35	.239	.22	.29			
11-4,43-45	3.2				1.24		.71				2.32	.314	.24							
12-1,141-143					.98		.57				1.7	.136	.15							
13-1,39-41	1.8	5.73	5.8	2.53	1.08	.90	3.1	.57	.57	.4	2.48	.42	1.73	1.49	.142	.1	.17			
13-3,40-42	6.2				1.48		.73				2.83	.62	.53	.14						
14-1,51-53	5.8	14.3	10.8	3.64	1.43	1.24	4.4	.82	.78	.5	3.21	.54	2.83	2.48	.61	.58	.62	.09		
15-1,131-133	6.9				1.46		.86				3.03	.68	.54	.15						
15-1,130-132	6.4				1.37		.94				2.93	.63	.55							
15-2,36-38	6.1				1.33		.86				2.79	.62	.52	.18						
15-3,105-107	5.8				1.29		.85				2.65	.594	.49							
15-4,64-66	5.5				1.29		.80				2.81	.594	.50							
15-5,88-92																				
15-6,55-59					1.41		.88				2.98	.66	.55							
16-1,120-123																				

Tableau V.19b: Reykjanes Ridge, (2.3 my.)

Leg 49, site 409, forage 409, éléments traces(en ppm) (suite).

J : analyse par activation neutronique (J.L.JORON). W : analyse par activation neutronique (D.WOOD).

Echantillon	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni		Rb		Sr	Y	Zr		Nb	Sb	Cs	Ba	
	J	B	B	B	B	B	B	J	B	J	B	B	B	B	J	B	J	J	J	
16-2, 15-18	49.1	9712	377	287	1548	86800	40	41.7	88	79	4.8	3.1	154	38.2	111	105	10.0	.057	.06	
17-1, 35-40	40.8	9172	369	327	1394	85330	50	49.4	128	124	1.9		125	34.9	92	98	9.4			
17-1, 36-40	43.2	9951	377	288	1548	94640	52	51.	116	127						102				
18-1, 74-78	39.8	9892	394	267	1626	92540	44	42.8	100	95			203			105		.11	.15	
18-2, 106-109	42.8							48.2		101						111		.03	.05	
18-2, 110-115	42.8	10191	395	281	1471	91840	50	46.9	100	102	3.3	4.5	156	38.1	101	118	10.1	.03	.07	
18-3, 88-91	43.4	9961	386	281	1548	96180	49	47.1	108	109	5.9	4.1	105	38.1	104	105	9.6	.03	.13	
18-3, 120-122	43.0	10071	388	289	1548	84000	49	49.8	113	115	4.8		155	40.8	95	104	10.8	.04	.07	
20-1, 31-34	44.7	10191	408	327	1548	93310	54	54.4	113	105						132		.058	.06	
21-1, 83-86	43.6	10671	402	268	1626	94360	52	51.7	118	119	2.8		108	40.6	105	132	12.0	.03	25	
21-2, 87-91	42.0	10671	399	273	1548	95550	52	47.9	113	106	5.9		101	41.4	114	114	11.3	.03	.11	
22-1, 90-93	44.8	10191	389	251	1548	96250	52	48.3	102	93	5.6	3.7	128	39.6	104	122	11.3	.05	.16	
23-1, 111-114	38.6	9472	377	247	1471	87640	44	44.2	116	100	6.2		168	37.4	93	106	11.8	.10	.12	
23-2, 38-41	43.3	10491	405	258	1548	100730	49	45.2	84	79	9.3	7.5	104	39.6	103	139	11.3		.25	
24-1, 143-146		10131	376	273	1703	93800	50		109		4.1		110	38.1	112		10.6			
24-2, 87-90	45.3	10431	377	317	1471	90510	49	49.1	106	100	4.4	5.0	103	41.8	116	126	11.5			
24-3, 80-83	41.5	10251	373	313	1316	89950	49	48.4	111	104	2.5		105	36.9	105	106	11.3			
24-4, 89-92	45.2	10371	393	296	1394	93730	50	50.1	109	108	2.4		104	37.6	106	109	10.5			
24-5, 69-72	42.3	10491	378	297	1316	90580	49	49.5	111	108	2.5		108	36.7	93	115	10.6			
24-6, 79-82	41.9	11091	399	246	1316	96670	52	50.4	105	114	1.5		108	41.9	100	103	11.5	.077	.03	
24-7, 56-59	41.5	10131	383	275	1394	87150	50	49.5	115	112	2.5		101	38.0	107	119	10.1			
25-1, 82-85	41.3	10551	344	263	1703	102200	52	48.5	118	109	9.6	7.6	108	43.9	125	123	12.2	.04	.12	
25-2, 35-38	39.7	7553	295	471	1316	80430	49	48.5	142	151	3.2	2.0	103	30.0	80	88	6.2		.07	
25-3, 79-82	41.7	9832	383	276	1471	90860	52	49.3	97	91						109			.06	
25-4, 102-105	43.8	10071	397	267	1548	95270	44	43.6	80	79						90			.11	
26-1, 29-32	43.4	10971	409	245	1626	98980	52	47.5	92	82			109	42.2	115	113	12.3	.03		
28-1, 73-76		9832	381	248	1471	89320	39		95		6.4		138	36.8	101		10.7			
31-1, 29-32	44.8	10611			1471	90930		50.2		100	7.4	6.7	100	36.4	101	121	11.2	.031	.21	
31-1, 121-124	42.0	10191	377	244	1471	91840	56	52.6	113	110	3.9		103	41.3	104	118	10.9		.09	
31-2, 80-83																				
32-1, 135-138	43.1							48.5		99						68		.073	.05	

Tableau V.19b: Reykjanes Ridge, (2.3 my.)

Leg 49, site 409, forage 409, éléments traces(en ppm).

J : analyse par activation neutronique (J.L.JORON). B : analyse par spectrométrie de fluorescence X (C.O.B.).

Echantillon	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Th	U			
	J	J	W	W	W	J	W	W	J	W	W	J	J	W			
16-2, 15-18	5.7				1.54		.74				2.69	.55	.47	.18			
17-1, 35-40					1.22		.7				2.41	.53	.42				
17-1, 36-40	5.5				1.23		.81				2.64	.54	.50	.11			
18-1, 74-78		15.2	11.8	3.77	1.24	1.25	4.4	.82	.85	.7	3.16	.54	.58	.58			
18-2, 106-109	5.7				1.42		.77				2.61	.58	.50	.21			
18-2, 110-115	5.5				1.21		.77				2.74	.58	.52	.12			
18-3, 88-91		15.5	11.7	3.85	1.24	1.38	5.1	.82	.88	.6	3.58	.58	.57	.59			
18-3, 120-122	5.8				1.41		.83				2.77	.50	.55				
20-1, 31-34	6.3				1.40		.93				2.9	.62	.57	.09			
21-1, 83-86	6.4				1.35		.87				2.99	.65	.55	.21			
21-2, 87-91					1.34		.68				2.94	.63	.56				
22-1, 90-93	6.1	17.7	12.4	4.00	1.30	1.37	4.4	.83	.81	.5	3.45	.57	.6	.53			
23-1, 111-114	5.4				1.21		.71				2.40	.54	.46				
23-2, 38-41	6.1	16.4	13.4	3.94	1.36	1.47	5.0	.82	.91	.8	3.96	.61	.61	.55			
24-1, 143-146																	
24-2, 87-90	6.1	18.6	13.9	4.71	1.43	1.59	5.3	.83	.97	.6	3.94	.67	3.1	3.13	.68	.59	.14
24-3, 80-83	5.9				1.22		.76				2.63	.59	.45				
24-4, 89-92					1.33		.89				2.75	.59	.58				
24-5, 69-72	6.0				1.38		.74				2.78	.63	.54	.23			
24-6, 79-82	5.8	11			1.34		.74				2.81	.62	.57	.12			
24-7, 56-59	5.9				1.40		.83				2.78	.61	.56	.14			
25-1, 82-85	6.5				1.48		.91				3.19	.72	.61	.18			
25-2, 35-38	4.1				.99		.61				2.04	.42	.36	.11			
25-3, 79-82	5.8				1.17		.72				2.67	.57	.51				
25-4, 102-105	6.0				1.26		.86				2.83	.57	.48	.15			
26-1, 29-32	6.8				1.34		.86				3.01	.63	.52	.12			
28-1, 73-76																	
31-1, 29-32	6.2				1.48		.88				2.92	.62	.51	.25			
31-1, 121-124	6.0				1.37		.77				2.86	.59	.48	.31			
31-2, 80-83		15.3	12.2	3.77		1.35	4.5	.88	.6	3.58	.59	2.64	.55				
32-1, 135-138	3.8				1.16		.68				2.49	.35	.34	.09			

Tableau V.19b: Reykjanes Ridge, (2.3 my.)

Leg 49, site 409, forage 409, éléments traces(en ppm). (suite).

J : analyse par activation neutronique (J.L.JORON). W : analyse par spectrométrie de fluorescence X (D.WOOD).

Echantillon	Intervalle (cm)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>
37.1.9	88-90	51.46	15.84	9.31	.14	6.95	11.33	3.00	.64	1.41	.23	100.37	.49	1.06
39.4.4	56-58	50.16	17.71	9.00	.17	3.77	10.07	3.98	1.76	1.51	.35	98.48	.51	1.56
41.2.7	55-57	51.15	17.32	6.90	.16	4.81	11.21	3.88	1.84	1.01	.27	98.53	.84	3.31

Tableau V.20a: 45°N

Leg 49, site 410, forage 410 : éléments majeurs.

Echantillon	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sb	Cs	Ba
	J	B	B	B	B	B	B	J	B	J	B	B	J	B	J	J
37-1,88-90		8453	265	189	1084	65590	35	103	10.6	228	25.0	108	28.9			
39-4,55-58	26.7	11694	260	206	1316	63000	32	34.0	108	108	44.3	41.	478	28.9	206	217
39-4,110-114																
39-5,51-55																
41-2,55-60	18.5	6065	158	138	1239	48300	22	23.9	92	84	27.2	24.8	507	24.8	234	221

Tableau V.20b: 45°N

Leg 49, site 410, forage 410, éléments traces(en ppm).

J : analyse par activation neutronique (J.L.JORON). B : analyse par spectrométrie de fluorescence X (C.O.B.).

Echantillon	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Th	U
	J	W	W	W	J	W	J	W	W	J	W	J	W
37-1,88-90		32.6	16.0	3.99		1.35		.70	.4	2.30	.39	4.48	2.47
39-4,55-58	42.2				1.87		.72				4.61	6.39	2.12
39-4,110-114		68.2	26.9	5.40		1.73		.70	.4	2.10	.38		5.82
39-5,51-55		71.6	22.3	4.09		1.35		.71		2.20	.33		6.97
41-2,55-60	50.2				1.67		.57			4.8		5.31	7.83

Tableau V.20b: 45°N

Leg 49, site 410, forage 410, éléments traces(en ppm). (suite).

J : analyse par activation neutronique (J.L.JORON). W : analyse par activation neutronique (D.WOOD).

Echantillon	Intervalle (cm)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>
2.1.9	1-3	47.45	15.37	8.92	.15	7.22	12.26	2.89	.54	1.34	.19	97.95	1.62	
2.4.4	55-60	50.71	15.90	9.14	.17	7.43	11.30	2.86	.64	1.40	.23	99.78	.85	1.20
2.5.12	97-100	50.46	16.16	9.24	.12	8.38	11.36	2.70	.42	1.40	.22	100.46	2.62	1.85
3.1.7	55-57	51.00	16.23	8.86	.10	7.67	11.23	2.90	.38	1.35	.20	99.92	2.29	1.77
3.2.6	45-49	48.03	15.71	9.19	.15	7.56	12.07	2.98	.96	1.49	.29	98.43	1.28	2.40
3.2.14	111-119	49.83	15.91	8.96	.11	8.96	10.63	2.92	.56	1.37	.25	99.50	1.93	2.66
3.3.1a	4-6	49.27	16.49	9.08	.12	8.57	11.12	2.80	.36	1.45	.26	99.52	2.36	2.93
3.3.10b	122-124	48.55	16.49	9.04	.12	8.54	11.05	2.28	.45	1.39	.26	98.17	2.08	2.28
3.4.1	3-5	49.79	16.34	9.10	.13	8.22	11.60	2.76	.84	1.42	.24	100.44	1.34	2.53
3.3.11	120-129	48.30	16.68	9.26	.13	8.45	11.77	2.50	.46	1.47	.27	99.29	2.77	2.89
3.4.18	116-119	49.09	17.65	9.02	.13	7.19	11.71	2.50	.38	1.45	.25	99.37	3.45	1.92
3.5.6	42-44	48.28	16.91	8.45	.14	8.25	11.51	2.82	.36	1.45	.30	98.47	2.95	2.18
4.1.4b	50-52	49.88	16.08	8.98	.12	8.40	10.98	2.80	.42	1.40	.26	99.32	3.87	2.18
4.1.11	104-106	49.33	16.62	9.03	.12	7.59	12.09	2.66	.31	1.50	.21	99.46	3.72	2.50
4.2.2	8-10	48.09	16.01	9.31	.12	8.17	12.23	2.86	.75	1.34	.23	99.11	1.19	3.08
4.2	87-93	49.08	17.05	8.92	.11	7.71	11.63	2.78	.41	1.41	.25	99.35	1.80	2.44
4.3.18	130-132	47.17	16.39	9.03	.13	8.23	13.79	2.66	.45	1.44	.28	99.57	1.50	5.22
5.1.11	57-59	49.66	16.28	9.17	.15	7.49	11.95	2.72	.78	1.45	.28	99.93	1.37	1.75
5.2.14	105-119	49.31	16.03	9.28	.13	7.99	11.21	2.82	.44	1.49	.31	99.01	1.57	1.38
4.4.7a	65-70	49.24	16.44	9.14	.13	8.45	11.26	2.50	.48	1.46	.27	99.37		
5.3.4	44-46	48.61	16.25	9.27	.12	7.96	10.98	2.88	.61	1.40	.33	98.41	3.12	2.59
5.4.12	95-106	48.37	15.71	8.86	.15	7.45	13.60	2.64	.93	1.42	.27	99.40	.44	3.44
6.1.17	118-126	48.47	15.49	10.01	.17	6.70	12.35	3.00	.75	1.78	.31	99.07	.71	1.27
6.2.	122-132	46.84	17.23	9.56	.16	8.16	12.00	2.50	.54	1.46	.33	98.78	.79	1.34
6.3.1	2-8	47.48	16.87	9.13	.14	7.88	12.69	2.50	.57	1.42	.30	98.98	5.94	1.70

Tableau V.21a: 45°N

Leg 49, site 410, forage 410A : éléments majeurs.

Echantillon	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni		Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sb	Cs	Ba			
	J	B	B	B	B	B	B	J	B	J	B	J	B	J	B	J	J			
1-7,1-3																				
2-4,35-40		8393	279	233	1316	63980	39		126											
2-5,11-14																				
2-5,88-92	31.2	8393	295	225	929	64680	39	37.9	126	125	6.6	1.6	235	26.6	104	125	29.7	.033	.26	
3-1,55-57		8093	261	202	774	62020	35		113		6.2		230	25.5	107		28.8			
3-2,48-52		8932	251	250	1161	64330	33		114		13.7		307	27.1	125		39.0			
3-2,111-114		8213	251	265	851	62720	41		146		5.2		302	24.1	112		36.6			
3-3,3-8	28.6	8693	246	277	929	63560	43	42.3	164	162							137	.08	.068	150
3-3,120-129	29.8	8812	257	276	1006	64820	40	40.7	154	150		5.0					169	.04	.10	196
3-4,3-5	28.0	8513	241	257	1006	63700	39	39.4	148	144		10.1					129	.076	.15	184
3-4,116-119	29.7	8693	271	309	1006	63140	35	35.5	128	135		2.9					116		.09	154
3-5,47-50	18.5	8693	245	269	1084	59150	42	28.3	160	102	4.2		319	23.4	125	85	37.3	.036	.048	142
4-1,53-60	28.4	8393	244	263	929	62860	40	39.8	144	148		6.2					134	.06	.09	193
4-1,110-115		8992	257	270	929	63210	41		151		3.1		310	24.0	107		134			
4-2,7-10		8033	255	272	929	65170	37		137								41.0			
4-2,87-93		8453	244	291	851	62440	35		146											
4-3,130-132		8633	256	272	1006	63210	35		137											
4-4,65-70	29.1	8752	261	290	1006	63980	38	38.8	149	148	6.8	5.5	320	24.6	121	131	35.4	.045	.25	168
5-1,69-76		8693	275	288	1161	64190	36		140											
5-2,105-119		8932	283	278	1006	64960	39		120		5.4		321	26.4	130		39.6			
5-3,38-45		8393	265	285	929	64890	35		142		7.4		306	24.4	115		35.2			
5-4,95-106	28.5	8513	278	298	1161	61020	34	35.1	120	123	15.3	15.	260	25.2	120	133	37.7	.22	.05	230
6-1,118-126	35.6	10671	311	231	1316	70070	35	35.9	79	76			80.				184	.05	.15	247
6-2,122-132		8752	245	270	1239	66920	40		156											
6-3,2-8		8513	251	301	1084	63910	37		170											

Tableau V.21b: 45°N

Leg 49, site 410, forage 410A, éléments traces(en ppm).

J : analyse par activation neutronique (J.L.JORON). B : analyse par spectrométrie de fluorescence X (C.O.B.).

Echantillon	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Th	U							
	J	J	W	W	W	J	W	W	W	W	J	W	J	J	W	J					
1-7,1-3			32.6	17.0	4.15		1.43	4.5		.71	.4	2.52	.41				2.69			2.32	
2-4,35-40																					
2-5,11-14			31.8	15.4	3.67		1.32	4.6		.64	.4	2.36	.37				2.27			2.07	
2-5,88-92	14.1					1.25				.54				2.45		1.59	1.88			.28	
3-1,55-57																					
3-2,48-52																					
3-2,111-114																					
3-3,3-8	19.2					1.4				.58				2.73		2.15	2.65			.37	
3-3,120-129	19.7					1.45				.63				2.96		2.20	2.67			.39	
3-4,3-5	19.7					1.4				.57				2.73		2.13	2.6			.60	
3-4,116-119	19.5					1.45				.62				2.82		2.18	2.64			.39	
3-5,47-50						.87				.36				1.81		1.37	1.73			.62	
4-1,53-60	19.8					1.4				.61				2.75		2.10	2.64			.45	
4-1,110-115																					
4-2,7-10																					
4-2,87-93																					
4-3,130-132																					
4-4,65-70	19.9	37	39.3	19.5	3.96	1.31	1.40	4.4	.56	.66	.4	2.11	.30	2.91	2.79	2.18	2.69	2.92		.58	
5-1,69-76																					
5-2,105-119																					
5-3,38-45																					
5-4,95-106	20.0					1.36				.57				2.8		2.16	2.68			.71	
6-1,118-126	26.1					1.78				.76				3.5		2.87	3.49			.64	
6-2,122-132																					
6-3,2-8			43.3	21.0	4.45		1.53	4.8		.70	.4	2.21	.32		2.99					3.24	

Tableau V.21b: 45°N

Leg 49, site 410, forage 410A, éléments traces(en ppm). (suite).

J : analyse par activation neutronique (J.L.JORON). W : analyse par activation neutronique (D.WOOD).

Echantillon	Intervalle (cm)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>
1.1.4	30-32	48.20	15.13	10.24	.17	11.33	12.03	1.98	.08	.70	.12	99.98	.18	.29
1.1.7	60-62	48.54	15.36	10.31	.18	11.57	12.05	2.50	.08	.73	.12	101.44	.22	.16
1.1.8b	78-82	48.39	15.31	10.23	.17	12.20	11.97	1.88	.05	.71	.11	101.02	.29	.19
1.1.8b	78-82	48.58	15.58	10.15	.16	11.58	11.90	1.95	.11	.69	.08	101.24	.46	
2.2.1	2-13	48.65	15.20	10.28	.17	11.92	11.95	2.16	.06	.71	.12	101.22	.30	.23
3.1.13	96-100	50.85	14.98	10.28	.17	8.26	12.83	2.08	.27	.97	.16	100.85	.26	.21
3.1.18	134-136	50.35	17.00	9.56	.15	6.99	12.94	2.26	.27	.96	.15	100.63	.29	.18
4.1.8	68-70	50.63	16.93	9.46	.16	7.28	12.96	2.50	.20	.96	.17	101.30	.18	.24
5.1.3	22-24	50.66	14.95	9.78	.16	7.93	12.90	2.04	.25	.97	.16	99.80	.23	.03
5.1.3	22-24	50.24	15.12	9.74	.16	8.22	12.57	2.23	.30	.94	.12	100.36	.72	

Tableau V.22a: 36°N.

Leg 49, site 411, forage 411 : éléments majeurs.

Echantillon	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Cs				
	J	B	B	B	B	B	B	J	B	J	B	B	J	B	J			
1-1,30-32		4196	208	589	1316	71680	55	264	2.2	80	19.7	39		4.1				
1-1,78-82	39.6	4184	202	553	1294	70392	54	56.4	265	285	.7	81	18.7	44	42	4.9		
2-2,2-13		4256	201	540	1316	71360	54		263	.6	82	22.2	41			5.3		
3-1,44-46	39.	4376	215	551	1394	72170	54	54.6	248	264	3.5	80	22.3	42	55	4.8		
3-1,96-100	37.1	5710	281	278	1294	70664	49	49.4	92	93	6.9	6.2	117	23.4	47	71	10.0	.12
2-1,134-136		5755	237	183	1161	66920	37		72		6.9		124	24.0	60			8.5
4-1,68-70		5640	235	177	1214	64895	34		76		4.0		124	23.2	46			10.0
5-1,22-28	37.5	5815	270	275	1239	68460	47	49.9	95	97	5.1	4.5	118	24.1	55	75	10.3	.038

Tableau V.22b: 36°N

Leg 49, site 411, forage 411, éléments traces(en ppm).

J : analyse par activation neutronique (J.L.JORON). B : analyse par spectrométrie de fluorescence X (C.O.B.).

Echantillon	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Th	U				
	J	W	W	W	J	W	J	W	W	W	J	W	J	J	W	J		
1-1,30-32																		
1-1,78-82	2.4	6.3	4.9	1.79	.66	.72	2.2	.44	.47	.3	2.17	.39	1.07	1.00	.228	.28	.35	
2-2,2-13		6.2	4.6	1.63		.69	2.4		.39	.3	2.15	.38		1.01			.66	
3-1,44-66	2.7				.73			.45					1.06		.242	.29		
3-1,96-100	5.8				.88			.53					1.45		.605	.69		
3-1,134-136		11.4	8.1	2.24		.87	2.7		.53	.4	2.02	.34		1.38			.61	
4-1,68-70		11.7	7.8	2.48		.91	2.7		.48	.3	2.24	.37		1.47			.90	
5-1,22-28	6.3	13.7	8.6	2.43	.87	.91	2.5	.55	.54	.4	2.18	.37	1.48	1.49	.62	.64	.73	.20

Tableau V.22b: 36°N

Leg 49, site 411, forage 411, éléments traces(en ppm). (suite).

J : analyse par activation neutronique (J.L.JORON). W : analyse par activation neutronique (D.WOOD).

Echantillon	Intervalle (cm)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>
14.cc.1	2-4	50.08	16.37	9.68	.18	7.03	13.62	2.22	.22	.97	.10	100.47	.15	1.31
14.cc.4	39-41	50.11	14.83	10.91	.17	8.02	12.33	2.22	.25	1.05	.13	100.02	.21	
15.1.7	63-65	50.78	15.77	9.64	.16	7.28	12.89	2.18	.29	1.03	.13	100.15	.32	.50
15.cc.6	50-53	50.25	15.43	.63	.14	9.00	12.48	2.18	.15	.96	.12	100.34	.51	.39

Tableau V.23a: 36°N

Leg 49, site 412, forage 412 : éléments majeurs.

Echantillon	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sb	Cs	Ba				
	J	B	B	B	B	B	B	J	B	J	B	B	J	B	J	J				
14CC,2-8	35.4	5815	240	348	1394	67760	41	43.1	109	105		4.1				.17				
14CC,37-42	37.8	6294	278	93	1316	76370	46	47.8	74	76		3.8				.11	42			
15-1,50-56	35.9	5755	257	367	1084	67410	41	44.4	121	123	5.5	1.8	124	22.1	53	54	10.4	.024	.11	42
15-1,62-68	37.4	6175	274	256	1239	67480	47	49.6	115	116		4.2				76		.015	.03	73

Tableau V.23b: 36°N

Leg 49, site 412, forage 412, éléments traces(en ppm).

J : analyse par activation neutronique (J.L.JORON). B : analyse par spectrométrie de fluorescence X (C.O.B.).

Echantillon	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Th	U						
	J	J	W	W	W	J	W	W	W	W	J	W	J	J	W	J				
14CC,2-8					.86			.48												
14CC,37-42	5.5	9	12.7	8.5	2.53	.93	.93	3.1	.54	.53	.3	2.09	.35	1.56	1.54	.58				
15-1,50-56	5.0	9	12.7	8.6	2.59	.91	.94	3.3	.46	.56	.3	2.29	.37	1.63	1.69	.59	.63	.70	.18	
15-1,62-68	5.9	11			.95			.51						1.48	1.55	.54	.59	.72	.16	

Tableau V.23b: 36°N

Leg 49, site 412, forage 412, éléments traces(en ppm). (suite).

J : analyse par activation neutronique (J.L.JORON). W : analyse par activation neutronique (D.WOOD).

Echantillon	Intervalle (cm)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>
1.1.1	4-6	50.48	14.68	10.42	.17	6.82	12.54	2.30	.34	1.03	.14	98.97	.43	.26
1.1.3	78-82	49.80	14.79	10.78	.17	8.55	12.28	2.14	.19	1.05	.13	99.88	1.01	.19
2.1.3	20-22	50.36	15.74	9.72	.16	7.63	12.73	2.12	.28	.98	.14	99.86	.23	.15
3.1.2	7-9	50.80	15.22	10.54	.18	7.54	12.41	2.06	.26	1.09	.12	100.22	.25	.05
3.1.6	39-41	49.74	16.26	9.40	.16	7.58	12.86	2.04	.25	.98	.12	99.39	.17	.07
3.1.9	70-80	49.56	15.93	9.72	.15	8.14	12.64	2.20	.16	.96	.12	99.58	1.00	.02
3.2.4b	70-80	50.21	13.78	10.29	.15	10.05	12.27	1.66	.17	.98	.12	99.68	.41	.28
3.3.3.	25-27	49.90	14.43	11.69	.18	7.47	11.64	2.28	.42	1.28	.17	99.46	.08	
4.1.3	20-25	49.93	14.50	11.49	.18	7.72	11.66	2.20	.19	1.28	.15	99.30	.90	
4.1.5	40-42	50.80	14.95	11.03	.17	7.85	11.92	2.14	.21	1.20	.12	100.39	.15	
5.1.5	50-54	50.01	14.45	10.86	.16	8.89	11.96	2.25	.17	1.05	.14	99.40	.72	.01
5.1.10	91-93	50.20	14.78	10.54	.18	7.81	12.45	2.25	.31	1.16	.13	99.81	.06	.09
6.1.6	70-73	50.55	14.18	10.42	.17	8.23	12.29	2.17	.14	.95	.12	99.22	.64	.36
7.1.1	2-5	51.00	14.79	10.48	.18	7.84	12.57	2.22	.16	.99	.12	100.35	.79	.29
7.2.7	60-62	50.63	14.39	10.44	.16	8.80	12.20	2.19	.17	.99	.12	100.09	.80	.06
7.2.7	60-62	50.81	14.79	10.39	.16	8.52	12.07	2.38	.21	.98	.11	100.42	.49	
7.2.12	110-118	50.38	15.00	10.23	.18	7.48	12.97	2.18	.24	1.00	.12	99.78	1.92	.46
8.1.17	130-133	50.03	14.46	10.73	.17	8.20	12.29	2.12	.22	.98	.13	99.33	.78	.25
8.2.4a	35-39	50.40	14.89	10.54	.16	8.50	12.34	2.19	.15	.98	.10	100.10	.61	.11
9.1.8	61-63	50.20	15.02	10.24	.18	8.00	12.69	2.17	.25	.98	.10	99.83	.18	.02
10.1.5	47-50	50.56	14.64	10.53	.16	8.59	12.37	2.34	.13	1.03	.11	100.46	.64	.08
11.1.4	32-35	50.89	14.53	10.05	.15	8.82	12.73	2.15	.12	.93	.12	100.49	.97	.21
11.2.2	17-21	50.52	15.23	9.66	.15	8.73	12.98	2.17	.12	.90	.10	100.56	.64	
12.1.2	8-10	50.10	15.45	9.68	.16	8.08	13.34	2.20	.21	.91	.09	100.22	.58	.18
13.1.3	20-25	50.63	14.65	10.86	.17	8.07	12.29	2.21	.11	1.02	.13	100.14	1.54	.48
13.2.5	55-60	50.72	14.52	11.04	.18	8.20	12.14	2.24	.18	1.03	.12	100.37	.64	.33
13.2.5	55-60	50.58	14.96	10.79	.17	7.92	11.85	2.24	.22	1.01	.12	99.86	.93	
13.3.4	31-36	50.00	14.81	10.85	.18	7.83	12.36	2.26	.10	1.05	.12	99.56	.50	.02
14.3.4	71-75	50.98	14.34	11.03	.17	8.08	12.01	2.27	.12	1.02	.11	100.13	.12	.27
14.4.14	123-125	50.17	14.98	9.11	.15	8.26	13.25	2.16	.13	.93	.12	99.26	.70	.30
14.5.3	22-29	50.68	14.94	9.55	.15	8.52	13.35	2.07	.13	.92	.13	100.44	.77	.32

Tableau V.24a: 36°N

Leg 49, site 412, forage 412A : éléments majeurs.

Echantillon	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sb	Cs	Ba					
	J	B	B	B	B	B	B	J	B	J	B	J	B	J	J	J					
1-1,30-32	37.3	6294	281	525	1316	75460	47	48.	209	79	3.6	111	25.0	.58		45					
2-1,18-22	36.1	5875	254	352	1161	68040	42	43.6	122	123	5.5	3.7	119	22.0	59	62	10.8	.07	41		
3-1,7-10	38.8	6534	273	92	1394	73780	45	46.8	70	71	4.9		112	25.0	65	61	10.4	.025	.04	51	
3-1,36-41		5875			1239	65800					5.1		118	22.4	55		10.2				
3-1,70-80	35.3	5755	254	297	1161	68040	42	41.9	105	105	2.4	3.3	119			55	9.5	.02		47	
3-2,70-80	39.0	5875			1161	72030		49.7		166						45				45	
3-3,27-30	38.3	7673	293	158	1394	81830	44	44.9	83	81	4.5	7.1				72			.14	52	
4-1,20-25	40.6	7673	297	157	1394	80430	45	47.4	82	84	3.7	2.3	124	29.0	83	77	14.1	.045		52	
4-1,40-44	39.6	7194		153	1316	77210		47.4		95	3.5		114	27.1	75	76	8.7	.137	.02	46	
5-1,50-54		6294	269	92	1239	76020	48		80		3.4		119	25.9	62		11.3				
5-1,91-94	36.9	6954	294	100	1394	73780	46	47.6	78	68	6.5		123	27.5	76	67	12.8			49	
6-1,70-73	39.5	5695	271	111	1316	72940	46	48.1	69	72	2.2		120	23.3	61	62	10.3		.031	50	
7-1,2-5		5935	268	107	1394	73360	45		73		3.3		122	24.1	47		11.0				
7-2,60-62	39.3	5935	276	111	1239	73080	47	49.1	77	77	4.0	2.3	121	23.6	48	77	9.3		.035	48	
7-2,110-115	39.8	5995	262	97	1394	71610	47	49.7	68	68	5.3	3.7	124	24.3	50	62	9.7	.007	.117	48	
8-1,130-135	39.3	5875	271	103	1316	75110	46	48.5	76	79	3.6	2.9	121	25.1	51	76	9.6		.031	50	
8-2,35-39	39.4	5875			1239	73780		47.6		72	2.4		120	24.4	48		9.1				
9-1,62-72		5875			1394	71680					5.4		120	23.7	52		10.5				
10-1,50-51	39.3	6175			1239	73710		47.2		65	2.4		118	25.2	55	61	10.6		.018	44	
11-1,32-35	38.2	5575	244	140	1161	70350	45	47.2	92	96	1.4		113	22.7	47	54	8.9		.031	48	
11-2,17-21	40.1	5395	250	151	1161	67620	44	45.6	84	86	2.4		119	21.1	48	58	8.0		.025	35	
12-1,10-15	38.7	5455	239	136	1239	67760	45	46.5	92	86		3.7			50		10.7		.25	30	
13-1,20-25		6115	273	62	1316	76020	47		70		2.7		113	23.8	51		9.0				
13-2,55-60	37.4	6175	269	56	1394	77280	46	80.6	67	58	3.3		116	25.6	50	39	10.5			34	
13-3,31-36	39.2	6194	282	71	1394	75950	46	47.6	68	64						63				39	
14-1,4-14	38.2							47.2		81		2.5				60		.017	.03	46	
14-4,123-125		5575	236	133	1116	63770	44		85		2.1		126	21.1	46		9.9				
14-5,22-29		5515	237	141	1161	66850	43		89												

Tableau V.24b: 36°N

Leg 49, site 412, forage 412A, éléments traces(en ppm).

J : analyse par activation neutronique (J.L.JORON). B : analyse par spectrométrie de fluorescence X (C.O.B.).

Echantillon	La	Ce		Nd	Sm	Eu		Gd	Tb		Tm	Yb	Lu	Hf		Ta	Th		U
	J	J	W	W	W	J	W	W	J	W	W	W	W	J	W	J	J	W	J
1-1,30-32	5.7	11			2.40	.88	.91	3.2	.50	.51	.3	2.18	.36	1.63	1.53	.58	.63		.10
2-1,18-22	5.4	12	13.2	7.8	2.40	.87	.91	3.2	.47	.51	.3	2.18	.36	1.52	1.53	.55	.61	.74	.10
3-1,7-10	6.1					.96			.57					1.71		.61	.67		
3-1,36-41			12.7	8.2	2.52		.93	2.9		.53	.3	2.18	.37		1.52			.65	
3-1,70-80	4.8					.87			.46					1.48		.535	.54		
3-2,70-80	5.0	10				.92			.46					1.44		.52	.56		.16
3-3,27-30	8.0	17				1.1			.61					2.09		.81	.86		.20
4-1,20-25	7.4	17				1.16			.69					2.08		.81	.87		.14
4-1,40-44	7.0					1.06			.68					1.99		.73	.79		
5-1,50-54			12.9	8.4	2.50		.94	2.7		.51	.4	2.35	.41		1.55			1.02	
5-1,91-94	6.1	12				.91			.48					1.57		.57	.59		.14
6-1,70-73	5.5	11				.88			.49					1.53		.57	.65		.11
7-1,2-5																			
7-2,60-62	5.7	11	12.5	8.9	2.34	.79	.92	3.2	.48	.49	.4	2.21	.40	1.47	1.51	.57	.62		
7-2,110-115	5.7	11				.95			.49					1.5		.58	.65		.21
8-1,130-135	5.4	11				.84			.49					1.49		.57	.64		.13
8-2,35-39						.85			.47					1.47		.54	.62		
9-1,62-72			13.0	9.2	2.70		.96	2.7		.51	.4	2.35	.39		1.53				
10-1,50-51	4.9	11				.94			.49					1.53		.51	.56		.13
11-1,32-35	4.6	9				.81			.45					1.38		.46	.51		
11-2,17-21	4.0	9				.78			.5					1.35		.44	.48		
12-1,10-15	4.6	10				.83			.51					1.47		.45	.49		.54
13-1,20-25																			
13-2,55-60	5.	10	12.4	8.6	2.73	1.00	.99	3.1	.49	.52	.4	2.41	.44	1.57	1.56		.55		
13-3,31-36	5.2	11				.91			.49					1.58		.525	.57		.22
14-1,4-14	5.5	9				.90			.50					1.63		.574	.62		.18
14-4,123-125																			
14-5,22-29																			

Tableau V.24b: 36°N

Leg 49, site 412, forage 412A, éléments traces(en ppm). (suite).

J : analyse par activation neutronique (J.L.JORON). W : analyse par activation neutronique (D.WOOD).

Echantillon	Intervalle (cm)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>
		1.1.5	38-40	49.16	14.86	9.59	.15	9.71	12.16	2.28	.54	1.45	.24	100.14
1.2.14	125-129	49.86	14.11	10.10	.15	10.64	11.22	2.30	.49	1.58	.28	100.73	2.42	1.73
2.1.5	41-43	49.26	14.07	9.84	.15	10.72	11.59	2.28	.42	1.46	.22	100.01	1.14	1.20
3.1.6	46-48	49.96	14.02	9.84	.16	10.57	11.49	2.18	.62	1.43	.20	100.47		
5.1.3	20-22	47.48	16.26	11.06	.16	10.51	10.88	2.44	.15		.08	99.72	1.36	

Tableau V.25a: 36°N

Leg 49, site 413, forage 413 : éléments majeurs.

Echantillon	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni		Rb		Sr	Y	Zr	Nb	Sb	Cs	Ba		
	J	B	B	B	B	B	B	J	B	J	B	J	B	B	J	B	J	J	J	
1-2,35-40	37.5	8693	265	536	1161	67130	45	46.6	194	199	7.1	5.1	241	25.8	108	130	26.8	.06	.13	94
1-2,124-129	33.2	9472			1161	70700		50.4		248	7.3	5.5	238	27.1	114	132	32.3	.06	.15	116
2-1,42-46	35.2	8752	268	631	1161	68880	50	51.5	264	273	6.5		234	25.1	107	107	27.7	.05	.16	105
3-1,44-48	36.6	8573	260	594	1239	68880	45	50.0	231	245	14.0	13.4	228	24.1	104	116	28.1	.031	.14	154
5-1,20-22																				

Tableau V.25b: 36°N

Leg 49, site 413, forage 413, éléments traces(en ppm).

J : analyse par activation neutronique (J.L.JORON). B : analyse par spectrométrie de fluorescence X (C.O.B.).

Echantillon	La	Ce		Nd	Sm	Eu		Gd	Tb		Tm	Yb	Lu	Hf		Ta	Th		U
	J	J	W	W	W	J	W	W	J	W	W	W	W	J	W	J	J	W	J
1-2,35-40	14.5					1.32			.64					2.61		1.56	1.52		.16
1-2,124-129	16.0		27.8	14.8	3.41	1.41	1.24	4.0	.53	.62	.3	2.03	.33	2.84	2.37	1.80	1.76	1.52	.24
2-1,42-46	14.4					1.26			.55					2.61		1.59	1.51		.24
3-1,44-48	14.6	27	30.7	16.5	4.09	1.27	1.34	4.4	.58	.68	.4	2.16	.40	2.7	2.68	1.61	1.53	1.82	.37
5-1,20-22			4.5	4.5	1.69		.67	2.6		.48	.3	2.32	.35		.95			.22	

Tableau V.25b: 36°N

Leg 49, site 413, forage 413, éléments traces(en ppm). (suite).

J : analyse par activation neutronique (J.L.JORON). W : analyse par activation neutronique (D.WOOD).

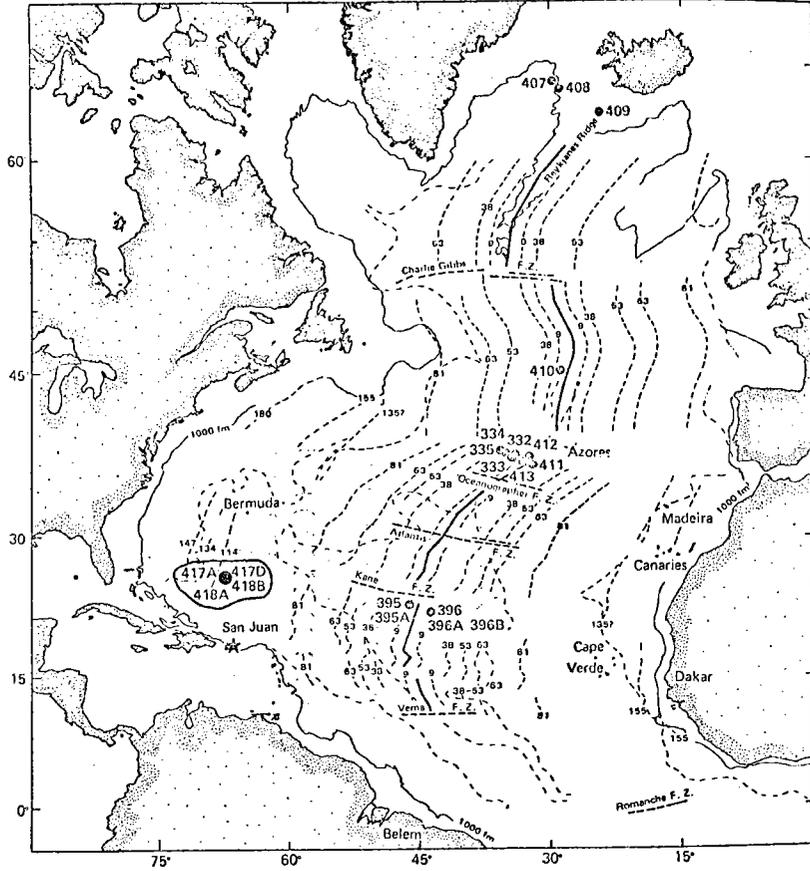


Figure V.9: Sites de forage des legs 51 et 52 de D.S.D.P.

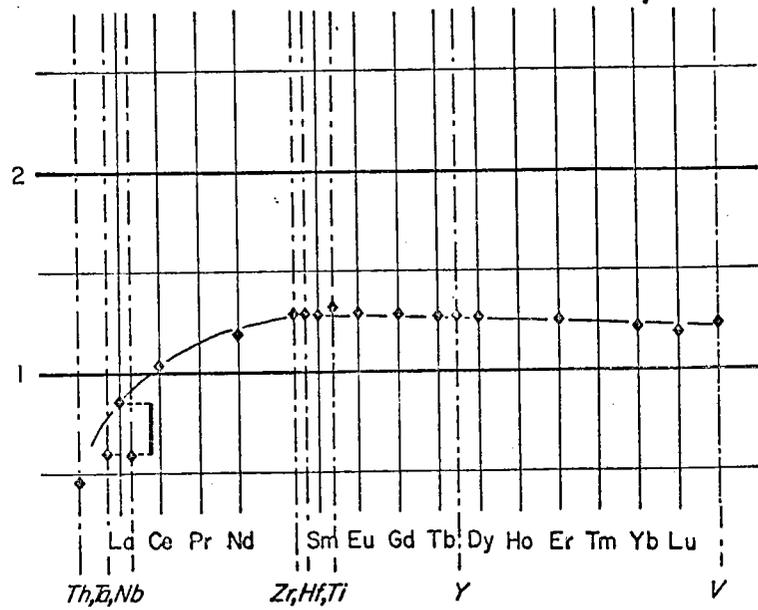


Figure V.10: Diagramme terres rares "élargi": les données terres rares sont de Masuda et al., Initial reports des legs 51, 52, 53.

D.S.D.P. : I.P.O.D. Legs 51-52

---

Les sites 417 et 418 font partie du programme de forage de la croûte océanique suivant une perpendiculaire à la direction d'ouverture pour l'étude de l'évolution des propriétés de la croûte océanique en fonction de l'âge. Ils sont situés sur l'anomalie MO, (~ 110 millions d'années, fig. V.9 ).

Les échantillons du forage 417 A présentent un très fort degré d'altération, tandis que dans le forage 417 D situé seulement à 400 m de 417 A, les basaltes sont frais et le verre basaltique parfaitement conservé. Cette différence, du point de vue altération, est expliquée par la différence de topographie des deux sites : 417 A est un "haut" qui ne s'est couvert de sédiment que très tardivement (absence de sédiments crétacés) tandis que 417 D aurait été très rapidement protégé de l'action de l'eau de mer par le dépôt sédimentaire (Bougault et al., 1979).

Les basaltes échantillonnés à ce site, correspondent à des basaltes typiquement "appauvris" (fig. V.10 ) tout à fait comparables aux basaltes "jeunes" correspondant approximativement au même "flow line" des sites 395 et 396 (Joron et al., in press).

Echantillon Intervalle (cm)	Echantillon										Total	LoI
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		
24-1,99-101	54.19	20.64	10.19	.12	3.06	2.66	1.56	6.38	1.80	.35	100.95	4.75
24-2,119-115	51.86	19.97	11.92	.16	3.33	5.52	2.05	4.26	1.69	.31	101.06	3.75
26-1,140-143	48.64	15.90	13.35	.20	6.58	8.08	1.69	2.89	1.87	.17	99.37	4.35
26-2,58-61	47.70	16.85	14.71	.22	5.41	6.68	1.81	3.19	1.92	.17	98.66	3.20
26-5,28-30	49.86	19.13	12.06	.14	4.79	7.68	2.11	3.03	1.61	.27	100.68	5.45
27-1,118-120	50.91	19.81	9.95	.14	4.10	9.91	2.12	2.89	1.58	.16	101.57	5.75
29-1,72-74	49.75	17.90	8.93	.16	5.49	12.53	2.10	1.16	1.48	.12	99.52	2.75
29-3,4-7	49.79	17.64	9.48	.17	5.32	12.39	2.43	.70	1.42	.14	99.48	1.85
29-6,30-32	48.94	17.76	9.90	.16	5.44	12.77	2.18	.80	1.43	.11	99.49	3.50
30-3,92-95	48.94	16.88	11.24	.17	5.63	12.15	2.28	.72	1.41	.14	99.56	2.60
31-1,8-10	48.59	17.65	9.69	.12	5.11	11.48	2.21	1.64	1.51	.22	98.22	4.90
33-5,90-93	50.20	18.15	7.78	.15	5.45	12.92	2.28	1.43	1.54	.12	100.02	3.35
34-1,28-31	49.23	16.54	10.89	.15	6.09	12.45	2.35	.59	1.41	.10	99.80	1.15
35-1,125-128	47.97	19.44	6.38	.13	3.57	18.53	2.19	1.20	1.53	.12	101.06	7.45
35-4,100-103	49.40	17.97	13.18	.11	3.57	7.67	3.97	2.04	1.65	.32	99.88	5.10
35-4,111-113	49.11	17.76	10.39	.15	4.21	13.32	2.54	.98	1.44	.20	100.10	3.60
36-3,63-65	48.90	17.54	10.63	.15	5.53	12.57	2.31	.78	1.47	.15	100.03	2.20
37-1,31-34	48.74	16.75	10.81	.16	6.80	13.16	2.01	.03	1.31	.14	99.91	.30
38-3,46-49	48.62	18.02	9.52	.19	6.17	14.12	2.02	.00	1.35	.12	100.13	.70
38-7,35-38	49.67	17.39	10.69	.15	5.38	11.60	2.62	.83	1.60	.27	100.10	3.35
39-1,37-40	49.16	17.60	11.54	.13	4.59	11.55	2.64	1.15	1.52	.26	100.14	1.70
40-1,14-17	48.67	18.35	9.54	.13	4.40	13.30	3.28	.99	1.57	.18	100.41	5.25
40-3,17-19	48.75	17.73	8.87	.19	6.51	14.41	2.30	.07	1.27	.12	100.22	2.05
41-1,103-10	49.28	16.97	10.57	.19	6.27	13.47	2.33	.00	1.40	.12	100.60	.75
41-4,136-139	49.61	17.39	9.94	.20	5.37	13.89	1.97	.00	1.49	.10	99.96	1.55
42-2,20-22	49.66	17.65	9.68	.20	6.28	13.43	2.07	.01	1.53	.15	100.66	1.00
43-5,22-25	49.64	16.47	11.13	.17	6.41	12.69	2.28	.02	1.41	.11	100.33	.75
44-1,12-15	48.15	16.23	11.56	.17	6.37	12.59	2.22	.04	1.44	.13	98.90	.30
44-3,58-68	49.73	16.02	11.08	.18	6.92	12.47	2.33	.08	1.45	.12	100.38	.25
46-1,56-59	48.70	15.92	11.23	.21	6.46	13.85	1.93	.22	1.44	.12	100.08	2.20

Tableau V.26a: 25°N, 110 my.  
Leg 51, site 417, forage 417A : éléments majeurs.

Eléments	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Rb	Sr	Zr	Sb	Cs	La	Eu	Tb	Hf	Ta	Th	U	
																					Méthode Analytique
23-1,99-101	46	10790	242	355	910	71270	75	72	104	94	61	59	110	97	.14	.86		1.44	.96	2.54	.13
24-2,113-115		10130	244	265	1130	83370	53		70		51		118	96							
26-1,140-143		11210	453	303	1590	93370	44		72		28		144	106							
26-2,58-61		11510	427	304	1730	102890	41		72		34		132	102							
26-5,28-30	42	9650	292	280	1050	84350	32	29	65	58	43	38	129	81	.24	.73		1.59	1.11	2.42	.13
27-1,118-120	42	9470	328	279	1090	69590	43	44	90	85	26	25	127	90	.28	.33	2.3	1.26	.76	2.57	.16
29-1,72-74	41	8870	328	266	1208	62460	49	50	102	98	10	8	114	76	.12	.12	1.2	.76	2.27	.12	
29-3,4-7	41	8515	337	259	1310	66310	53	56	119	119	6	6	106	82	.09	.09	2.2	1.21	.84	2.40	.11
29-6,30-32	39	8570	335	268	1250	69240	59	61	115	115	9	9	108	74			2.1	.73	.72	2.26	.11
30-3,92-95	38	8450	360	268	1290	78620	44	42	83	77	11	10	104	85	.02	.20	2.1	1.09	.72	2.13	.11
31-1,8-10	42	9050	303	296	940	67770	37	36	74	69	23	20	139	93	.16	.44	2.7	1.21		2.33	.13
32-3,105-108	43	10070	293	298	990	68130	34	32	68	57	10	19	129	82	.34	.49	2.6	1.27		2.49	.13
33-5,90-93	41	9230	327	294	1140	54420		123	169	159	20	6	120	79	.01	.01	2.3	1.21	.74	2.30	.12
34-1,28-31	39	8450	322	262	1140	76170	39	38	82	78	11	12	103	76			1.2	.75	2.31	.11	
34-3,10-13	38	8510	334	276	1770	71270	56	56	150	130	3		106	81			2.0	1.12	.70	2.22	.12
35-1,125-128	40	9170	328	305	1010	44620	48	49	126	114	7	6	146	76			2.0	1.22	.74	2.27	.12
35-4,100-103	43	9890	306	334	870	92190	40	(25)	74	67	29	27	161	87	.94	.56	3.3	1.36	.93	2.44	.12
35-4,111-113		8630	346	317	1180	72670	28		78		12	12	113	79	.13	.22	1.2	.78	2.3	.12	
36-3,63-65	40	8810	346	305	1140	74350	41	40	75	68	13	13	102	83	.14	.31	2.4	1.23	.77	2.41	.11
37-1,31-34	39	7850	312	317	1250	75610	42	44	115	117	0		104	83			1.9	1.17	.70	2.26	.11
38-3,46-49	38	8090	328	282	1460	66590	40	42	92	95	3		105	85			2.1	1.15	.66	2.22	.10
38-7,35-38	42	8990	343	350	1150	74770	36	35	59	54	13	11	100	76	.15	.28	1.21	.84	2.44	.12	
39-1,37-40	41	9110	336	318	980	80710	33	33	56	47	15	12	113	89	.37	.32	2.9	1.44	.94	2.56	.13
40-1,14-17		9410	303	346	1030	66730	37		64		13		280	95							
40-3,17-19	43	7610	313	373	1470	62040	40	45	119	93	4	4	100	77	.06	.08	2.3	1.24	.73	2.39	.12
41-1,103-105	39	8390	336	316	1450	73930	43	43	103	102	2		111	85			1.13	.75	2.37	.11	
41-4,136-139		8930	335	284	1560	69520	39		86		0		104	90							
42-2,20-22	41	9170	363	303	1530	67700	44	43	100	95	0		104	94			2.3	1.21		2.33	.12
43-5,22-25	39	8450	356	314	1300	77850	45	41	116	83	0		98	90			1.19	.79	2.21	.11	
44-1,12-15	39	8630	335	287	1320	80850	41	41	87	86	1		101	91			2.2	1.24	.73	2.41	.10
44-3,58-68		8690	346	290	1390	77500	41		87		1		104	88	.04	.04					
46-1,56-59	39	8630	348	282	1660	78550	64	61	129	120	3	3	104	86			2.1	1.14	.73	2.2	.11

Tableau V.26b: 25°N, 110 my.  
Leg 51, site 417, forage 417A : éléments traces (en ppm).

Echantillon Intervalle (cm)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	LoI
21CC	50.29	19.84	10.53	.12	5.22	9.01	2.87	1.31	1.99	.16	101.34	4.25
22-4, 18-21	48.77	16.32	10.65	.21	7.13	12.81	2.52	.06	1.41	.10	99.98	1.55
22-5, 57-60	48.85	16.39	10.80	.19	6.37	13.46	2.06	.09	1.42	.12	99.75	2.30
26-2, 9-12	49.03	16.45	10.78	.15	6.22	13.41	2.62	.25	1.49	.12	100.52	2.15
26-4, 75-77	49.16	16.64	11.26	.18	6.55	12.06	2.60	.13	1.53	.13	100.24	.90
27-3, 43-45	49.79	17.17	10.04	.15	5.82	13.75	2.45	.04	1.44	.11	100.76	1.55
27-5, 25-27	49.34	17.27	9.27	.15	6.38	13.48	2.35	.03	1.36	.11	100.44	1.95
28-2, 37-39	49.37	17.36	10.45	.16	6.07	14.08	2.55	.14	1.42	.11	101.73	1.00
28-3, 66-68	50.95	16.31	11.92	.11	6.16	9.98	2.33	1.04	1.39	.07	100.26	3.45
28-4, 102-104	49.34	17.15	10.05	.16	6.23	14.52	2.27	.04	1.27	.11	101.14	1.25
29-2, 83-86	50.85	17.54	9.70	.14	5.44	13.00	2.44	.04	1.39	.11	100.65	.75
29-3, 57-60	50.00	17.25	10.33	.15	5.65	13.66	2.16	.04	1.39	.13	100.76	1.80
30-4, 57-60	49.14	17.09	10.53	.14	5.54	13.19	2.45	.17	1.41	.12	99.78	1.90
30-8, 70-73	50.42	18.16	9.73	.09	5.50	11.17	2.49	.40	1.54	.13	99.63	1.50
31-1, 29-31	49.01	17.04	11.75	.10	5.11	11.86	2.41	.84	1.39	.13	99.64	2.85
31-4, 27-29	49.76	17.36	10.42	.15	5.70	13.14	2.42	.18	1.43	.11	100.67	.85
32-1, 96-98	50.53	17.17	10.80	.15	5.79	12.54	2.34	.06	1.44	.12	100.94	.25
32-6, 60-62	51.01	16.78	10.01	.12	5.85	12.33	2.39	.07	1.49	.10	100.15	.60
33-3, 128-131	49.42	16.62	10.92	.15	6.16	12.47	2.01	.12	1.36	.12	99.35	.60
34-3, 37-40	49.44	16.67	9.50	.16	5.31	15.52	2.26	.13	1.36	.12	100.47	2.85
34-5, 83-86	48.76	16.79	11.03	.16	5.75	13.57	2.07	.14	1.45	.15	99.87	1.00
35-4, 36-79	49.33	17.23	10.22	.16	6.40	12.66	2.00	.04	1.39	.11	99.54	.25
36-3, 130-132	49.57	16.74	11.04	.19	5.94	14.07	2.08	.27	1.40	.13	101.43	.65
37-5, 116-119	49.37	17.01	10.75	.19	6.75	12.84	2.31	.06	1.47	.13	100.88	1.35
38-5, 102-10	49.10	14.6	14.2	.2	6.3	10.8	2.19	.6	1.7	.1	100.20	.8
39-3, 39-42	49.64	14.83	11.93	.19	7.08	12.64	1.96	.03	1.49	.19	99.98	.40
40-1, 114-117	48.68	17.02	9.99	.18	6.39	13.70	2.11	.04	1.36	.18	99.65	1.30
41-3, 102-105	49.90	17.61	10.19	.17	6.57	10.92	2.84	.21	1.61	.17	100.19	1.70
41-3, 43-46, 50-52	50.07	17.13	9.98	.17	6.85	13.60	1.84	.01	1.16	.17	100.98	.90
42-3, 121-125 125-127	50.81	17.12	10.22	.16	6.46	13.77	2.05	.04	1.17	.16	101.96	99.91
43-1, 78-81	49.38	15.75	11.40	.19	6.71	12.77	2.14	.07	1.58	.19	100.18	1.05
43-2, 4-6	49.80	16.24	11.68	.16	6.71	12.06	2.21	.19	1.60	.16	100.81	1.10
43-4, 130-132	49.57	15.79	12.25	.19	6.65	13.35	2.00	.14	1.49	.19	101.62	1.15
43-5, 93-95	49.65	15.55	10.34	.18	6.10	15.12	2.13	.21	1.50	.18	100.96	2.60
43-6, 13-15	48.83	15.75	11.23	.19	6.77	12.54		.04	1.52	.19	97.06	1.25
45-1, 35-37 39-41	49.16	15.89	11.01	.17	6.18	12.69	3.01	.15	1.63	.15	100.04	.75

Tableau V.27a: 25°N, 110 my.

Leg 51, site 417, forage 417D : éléments majeurs.

Echantillon Intervalle (cm)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total
48-5, 100-102	49.60	16.20	9.08	.15	6.60	13.40	2.31	.12	1.55	.17	99.18
48-7, 84-86	50.30	16.50	10.82	.19	7.25	12.60	2.25	.03	1.54	.15	101.63
49-2, 20-22	49.70	16.50	10.13	.12	7.23	11.30	2.44	.13	1.65	.17	99.37
49-2, 114-116	51.60	17.70	9.84	.15	6.39	10.10	2.54	.80	1.67	.20	100.99
50-2, 88-90	50.90	15.70	10.32	.17	6.60	13.20	2.17	.06	1.56	.16	100.84
51CC	49.40	15.50	12.33	.18	6.78	12.40	2.08	.26	1.46	.16	100.55
52-2, 41-43	49.70	14.70	11.78	.17	7.24	12.50	1.95	.06	1.39	.13	99.62
52-4, 7-9	48.20	14.80	12.00	.22	6.96	13.90	1.93	.28	1.43	.16	99.88
52-5, 73-75	49.30	15.80	11.78	.22	6.30	12.60	2.08	.08	1.61	.16	99.93
53-1, 110	48.60	15.50	11.78	.20	6.34	13.20	2.28	.37	1.56	.14	99.97
54-1, 7-9	49.40	15.70	12.00	.19	6.41	12.50	2.40	.20	1.59	.16	100.55
54-5, 42-44	50.80	14.70	11.67	.19	6.48	12.30	2.54	.03	1.50	.15	100.36
55-4, 96	48.20	14.90	12.11	.21	6.62	13.20	2.43	.03	1.48	.17	99.35
57, 70	48.6	15.3	12.3	.2	7.0	13.9	2.19	.03	1.56	.16	101.8
58-4, 139-141	49.70	16.30	10.72	.15	6.77	12.40	2.52	.37	1.38	.16	100.47
59-5, 136	50.50	15.20	13.44	.16	6.74	10.70	2.15	1.26	1.36	.13	101.64
62-1, 94-96	50.10	16.50	11.33	.19	6.07	13.80	2.02	.04	1.47	.13	101.65
63-2, 64-66	49.30	16.50	10.70	.19	5.31	13.40	1.93	.03	1.43	.15	98.94
64-4, 87-89	50.30	14.40	12.00	.22	7.69	11.90	2.13	.04	1.66	.16	100.50
64-6, 15-17	50.10	16.40	10.86	.18	6.63	12.90	2.10	.02	1.39	.16	100.74
65-2, 7-9	50.30	16.10	10.83	.19	6.43	13.80	1.93	.03	1.37	.15	101.13
65-4, 127-129	49.70	16.60	11.22	.19	6.94	12.80	2.00	.05	1.36	.13	100.99
65-6, 37-39	48.80	16.90	9.97	.16	7.11	12.60	1.95	.03	1.12	.12	98.76
66-3, 44-46	50.60	16.50	11.04	.19	6.72	12.90	1.98	.03	1.36	.20	101.52
66-5, 69-73	49.20	17.50	10.08	.17	5.46	14.00	2.06	.02	1.37	.14	100.00
67-2, 29-3	49.6	16.2	11.0	.1	6.9	12.9	1.9	.0	1.3	.1	100.2
67-5, 33-35	49.20	16.30	11.22	.16	7.00	12.70	1.92	.04	1.34	.19	100.07
67-7, 35-37	50.70	16.00	10.53	.14	6.36	12.80	2.07	.04	1.42	.20	100.26
68-2, 48-50	48.30	22.00	8.02	.11	5.20	12.60	1.94	.06	.91	.09	99.29
68-3, 92-94	51.30	15.30	11.67	.15	6.88	12.10	2.19	.07	1.65	.22	101.53
68-4, 18-20	50.10	15.50	12.00	.15	7.04	12.60	8.06	.03	1.50	.19	101.17

Tableau V.27a: 25°N, 110 my. (suite)

Leg 52, site 417, forage 417D : éléments majeurs.

Eléments	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sb	Cs	La	Eu	Tb	Hf	Ta	Th	U				
Méthode Analytique	NAA	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	NAA	XRF	NAA	XRF	NAA	XRF	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA				
21CC	50	11900	445	281	930	73650	59	58	136	129	4.9	4.6	137.7	36	111	3	.12		3.2	1.42	.76	3.05	.15	.10	1.67	
22-1,63-67		10600	417	291	750	89108	49		124		26.1		128.8	46	99	4										
22-4,18-21		8450	339	255	1610	74490	45		112		6.4		125		92											
22-5,57-60	40	8510	349	245	1450	75540	48	48	112	105	1.8		110.8		77		.06		2	1.16	.74	2.24	.11		.11	
26-2,9-12	40	8930	355	239	1200	75400	61	61	164	159	2.2	3	112.1		78		.08	.02	2.4	1.25	.76	2.16	.11	.06	.25	
26-4,75-77	42	9170	362	244	1410	78760	48		106	104	2.1		112.7		85		.04		2.0	1.22	.87	2.29	.11	.07	.05	
27-3,43-45	40	8630	345	256	1180	70220	43	43	104	96	.2		114.2		84	<1		2	1.12	.72	2.20	.12			.07	
27-5,25-27		8150	333	261	1200	69730	42	44.3	102	96	.3		115.5		72											
28-2,37-39	40	8510	351	247	1240	73090	48	53	95	134	16.2		98.4	35	99	2.6	.01		2.1	1.20	.73	2.29	.11	.05	.28	
28-3,66-68	38	8330	291	264.50	860	83370	35		82	75	22.4	22	107.1	28	87	1.8	.06	.41	1.6	.83	.52	2.04	.11		.19	
28-4,102-104	38	7610	310	283	1230	70290	42	43	113	109	.1		120.4		74	<1			1.7	1.04	.64	1.96	.10		.16	
29-2,83-86		8330	343	259	1070	67840	43		102	96	0.0		113.2	37	77.5	2.3										
29-3,57-60	41	8330	347	270	1140	72250	44	45	114	109	.3		131.7	39	101	3	.04		2	1.11	.73	2.22	.10			
30-4,57-60	40	8390	347	263	1100	73650	49	50	120	117	.9		114		81		.06		1.9	1.15	.71	2.29	.11			
30-8,70-73		9230	370.5	270	720	68060	66	68	130	126	.5	7	100.8		75		.17	.05				2.44	.12	.07		
31-1,29-31	40	8330	355	273	810	82180	20	20	47	42	22.3	22	113.4		85		.15	.46	3.2	1.25	.78	2.07	.11			
31-4,27-29	40	8570	352	256	1130	72880	47	47	117	113	3.9	4.4	114.8		81		.05	.08	2.0	1.18	.71	2.23	.11		.12	
32-1,96-98	39	8630	354	246	1200	75540	45	44	101	93	.4		106.4		89				2.0	1.18	.69	2.21	.11		.12	
32-6,60-62	41	8930	355	263	920	70010	43	44	92	89	.2		117.5		85		.04		2.1	1.23	.71	2.37	.12		.09	
33-3,128-131	39.7	8150	336	230	1130	76380	43	42.8	87	86	.6		115.6		82				1.9	1.18	.72	2.23	.11		.06	
34-3,37-40	39	8150	334	258	1220	66450	60	59	160	151	2.1		118.2	37	85	2.4	.01		1.8	1.08	.70	2.14	.11			
34-5,83-86	40	8690	339	264	1260	77150	61	47	139	106	2.6		113.6		88	1.6	.05	.04	2.2	1.17	.76	2.26	.11		.05	
35-4,3-6-7-9		8330	343	302	1260	71480	48	47.2	131	127	0.0		112.0		84											
36-3,130-132	40	8390	345	286	1440	77220	47	46.5	122	119	5.9	5	114.1		89	2.5	.04		2.0	1.15	.72	2.03	.11			
37-5,116-119		8810	353	300	1490	75190	48		128		0.0		114.3		90	1.8										
38-5,102-106		10250	416	265	1830	99880	42		81		1.3		122.5		80.5											
39-3,39-42	42.4	8930	361	279	1440	83440	48	47.4	115	111	.1		106		92											
40-1,114-117	41	8150	342	300	1430	69870	47		127	128	.1		115.3		77				1.8	1.06	.75	2.06	.10	.08	.05	
41-3,102-105	48	9650	391	333	1285	71270	49		99	101	2.8		128.7	34	66		.08		2.3	1.2	.83	2.41	.13	.08	.32	
41-5,43-46,50-52		6950	289.5	296	1290	69800	39		115		0.0		131.9	29	66											
42-3,121-123,125-127	37	7010	294	291	1220	71480	40		106	107	.4		113.2		67.5				1.6	.96	.66	1.72	.09	.06		
43-1,78-81	44	9470	384	280	1500	79740	44	48	108	98	0.0		113.3		88		.07	.08	2.3	1.25	.78	2.45	.11		.09	
43-2,4-6	45	9590	384	272	1250	81690	53		105	106	4.1	3	119.6	37	88.5				2.4	1.23	.86	2.38	.12			
43-4,130-132	41.1	8930	352	261	1470	85680	51	49	112	100	2.8		115.7		88											
43-5,93-95		8990	373	275	1420	72320	62		128		3.4		120.5													
43-6,13-15	43	9110			1510	78550		48		110	0.0		112.3		81		.03		2.3	1.23	.78	2.53	.11	.07		
44-1,28-31	46	10490	397	279	1180	73720	60		132	124	1.3		115.5		77		.06		2.3	1.34	.86	2.44	.13	.08	.13	
45-1,35-37	46	9770	388	254	1360	77010	52		123	120	1.6		119.9	40	101		.09		2.2	1.38	.88	2.5	.12	.08	.07	

Tableau V.27b: 25°N, 110 my.

Leg 51B, site 417, forage 417D : éléments traces(en ppm).

Eléments	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sb	Cs	La	Eu	Tb	Hf	Ta	Th			
Méthode Analytique	NAA	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	NAA	XRF	NAA	XRF	NAA	XRF	NAA	XRF	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA		
48-5,100-102		9290	383	249	1160	63500	63.5	119	0.0	123.7	36	101	1.6											
48-7,84-86		9230	386	251	1470	75680	62	100	.5	120.2	35	99	<1											
49-2,20-22		9890	434	309	930	70850	63	110.5	.5	119.4	37	99	1											
49-2,114-116		10010	375	279.5	1160	86820	36	57	13	129.2	37	101	<1											
50-2,88-90		9350	371	225	1320	72180	53	106	0.0	128.4	40		1											
51CC		8750	382	240	1390	86240	48.5	79	6.8	112.8	36	99	1.4											
52-2,41-43		8330	322	253	1320	82390	48	126	1	146.8	35	84	<1											
52-4,7-9		8570	341	246	1700	83930	44	95.5	6	115	37	91	<1											
52-5,73-75		9651	394	269	1700	82390	51	116	0.0	104.2	38	105	2											
53-1,110	43	9350	385	261	1550	82390	50	50	108.5	115	9	10	103.8	42	105	1.3	.05	.16	2.6	1.35	.88	2.71	.11	
54-1,7-9		9530	425	294	1470	83930	56	123.5	2.5	103.4	41	103	1											
54-5,42-44		8990	367	239	1470	81620	49	98.5	0.0	135.7	39.5	98	2											
55-4,96		8870	364	237	1630	84700	46	103.5	0.0	147.6	37.3		1.6											
57-1,70		9350	374	269	1630	86240	68.5	109	0.0	104.1	38.5	100	<1											
58-4,139-141	45	8270	349	320	1160	74980	57.5	59	83.5	89	7	8	105.6	3.6	83	1.5	.09	.09		1.26	.75	2.31	.10	.05
59-5,136		8150	333	274	1240	94000	37.5	80	27	102	25	90	0.0											
62-1,94-96		8810	352	204	1470	79240	72	98	0.0	122.5	38	88	<1											
63-2,64-66		8570	300	213	1470	74840	69	100	0.0	170.6	33	77.5	1											
64-4,87-89		9950	404	219	1700	83930	49	83	0.0	103.2	45	92	2.7											
64-6,15-17		8330	337	201	1390	75960	42	83	<1	138.3	33	76	1.4											
65-2,7-9		8210	326	199	1470	75750	44	102	0.0	218.1	35.5	87.5	0.0											
65-4,122-124		8150	315	236	1470	78480	43	111	0.0	108.7	34	98	2.2											
65-6,37-39		6710	279	314	1240	69730	45	167	0.0	105	28	69	0.0											
66-3,44-46		8150	333	199	1470	77220		94	<1	128.5	32	87	<1											
67-5,33-35		7970	328	235	930	77150	43	101.5	0.0	107	33	87	1.5											
67-5,33-35		8030	325	243	1240	87480	43	114.5	0.0	106.4	35	91	3											
67-7,35-37	40	8510	344	203	1080	73650	42	42	73.5	77	0.0	120.2	36	84	0.0				2.1	1.22	.78	2.33	.12	
68-2,46-48		5450	221	276	850	56090	37	137	<1	123.8	25	57	0.0											
68-3,92-94	44	9890	384	210	1160	81620	45	46	77	76	<1	107.6	35	100	1.7				2.5	1.36	.93	2.66	.14	
68-4,18-20		8990	357	268	1160	83930	49	109	0.0	115.4	40	97	2.2											

Tableau V.27b: 25°N, 110 my. (suite)

Leg 52, site 417, forage 417D : éléments traces(en ppm).

Echantillon Intervalle (cm)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	HgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total
15-1,46-48	49.10	16.50	9.92	.15	6.88	13.20	2.08	.04	1.12	.11	99.10
15-3,36-38	49.96	16.50	9.44	.16	7.44	13.10	2.06	.04	1.11	.11	99.92
16-1,13-15	50.50	17.80	8.26	.16	7.28	11.80	2.50	.09	1.28	.13	99.80
16-1,118-120	50.00	18.40	8.21	.13	7.67	11.00	2.54	.06	1.31	.10	99.42
17-2,72-75	50.80	18.20	8.73	.13	7.19	12.00	2.46	.10	1.28	.12	101.01
17-4,139-141	50.80	16.70	9.36	.14	6.91	12.90	2.10	.05	1.16	.10	100.22
18-4,48-50	49.50	15.90	10.30	.16	7.11	12.80	1.99	.03	1.08	.12	98.99
18-5,94-96	50.50	15.90	11.44	.18	7.81	10.30	2.71	.10	1.55	.13	100.62
19-4,102-105	50.50	15.60	10.22	.16	7.44	12.80	2.03	.03	1.11	.10	100.00
20-7,62-64	50.60	16.00	10.39	.16	7.53	12.80	2.10	.03	1.13	.11	100.85
22-2,33-35	50.90	16.20	10.98	.17	6.28	13.40	2.09	.05	1.15	.12	101.34
24-1,50-52	50.30	16.00	10.01	.16	7.30	13.20	2.02	.03	1.13	.11	100.26
24-1,76-79	50.40	17.00	9.52	.12	6.11	12.20	2.34	.08	1.18	.12	99.12
25-1,66-67	50.80	15.30	10.32	.16	7.40	12.90	2.30	.04	1.31	.13	100.66
25-2,87-89	50.00	15.70	11.11	.16	7.81	12.40	2.23	.04	1.39	.11	100.95
26-2,14-17	50.90	16.00	10.94	.17	6.82	13.70	1.96	.03	1.13	.11	101.76
26-4,111-114	49.70	18.30	9.14	.21	7.03	12.60	2.25	.07	1.28	.12	100.70
28-4,120-122	50.50	18.30	8.81	.17	6.60	12.10	2.60	.12	1.27	.12	100.59
29-1,35-37	49.80	18.20	8.20	.23	6.78	13.20	2.56	.36	1.27	.12	100.72
30-1,50-52	49.70	19.50	7.93	.14	6.51	13.40	2.36	.06	1.06	.10	100.76
33-1,18-20	49.50	18.90	8.28	.18	6.81	12.30	2.59	.60	1.25	.14	100.55
34-1,76-78	50.20	18.00	9.03	.16	6.48	13.30	2.30	.02	1.18	.11	100.78
36-4,18-20	49.50	17.30	9.24	.20	6.41	13.60	2.39	.01	1.17	.11	99.93
38-4,34-36	50.20	17.50	9.89	.24	6.98	12.70	2.22	.04	1.24	.13	101.20
39-1,119-121	50.00	17.60	9.82	.20	6.99	13.70	2.26	.08	1.24	.11	102.00
41-1,40-42	49.70	18.50	9.80	.14	5.50	14.50	2.25	.16	1.09	.11	101.75
42-4,89-91	49.80	18.40	10.00	.15	5.40	14.30	2.00	.02	.99	.09	101.15
44-2,34-36	50.10	16.20	10.60	.17	7.87	13.20	1.86	.03	1.07	.11	101.21
45-3,82-84	49.00	15.20	10.83	.20	6.94	15.50	1.99	.17	1.17	.10	101.10
45-4,9-12	49.20	17.10	10.31	.16	6.65	14.20	1.88	.03	1.04	.11	100.68
47-1,27-30	49.50	16.60	10.22	.16	8.17	12.90	1.92	.03	1.04	.10	100.64
48-5,32-34	49.60	16.40	9.78	.16	7.45	12.70	1.82	.01	1.04	.10	99.06

Tableau V.28a: 25°N, 110 my.

Leg 52, site 418, forage 418A : éléments majeurs.

Eléments	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sb	Cs	La	Eu	Tb	Hf	Ta	Th	U
Méthode Analytique	NAA	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	NAA	XRF	NAA	XRF	NAA	XRF	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA
15-1,46-48		6710	290	219	1160	69380	42	84	<1	110.3	28	66.5	<1									
15-3,36-38	39	6650	290	225	1240	66030	42	43 83	83	<1	112.4	29	61	<1		1.7	.99	.57	1.69	.10		
16-1,13-15	44	7670	315	270	1240	57910	44	45 88	92	<1	132	30	72	1.8		1.7	1.05	.73	1.89	.12		
16-1,118-120	35	7850	327	273	1010	57420	48.5	45 90	114	2	128.7	26.5	68.5	1.2	.4	1.4	.84	.49	1.5	.07		
17-2,72-75	43	7670	327	271	1010	61060	47	47 95	95	<1	127	27	67	1		1.7	.97	.62	1.78	.11	.08	
17-4,139-141	40	6950	305	241	1080	65470	44	44 77	76	<1	117.2	30.5	76	1.4		1.7	1.02	.58	1.69	.10	.07	
18-4,48-50	40	6470	281	231	1240	72040	41.5	42 78	78	<1	111.7	28	67	2.3		1.8	1.01	.61	1.8	.11	.08	
18-5,94-96	(53)	9290	391	299	1390	80020	55	53 76.5	71	0	128.1	31	90	2.5		2.3	1.19	.76	2.28	.14	.10	.07
19-4,101-105	40	6650	288	225	1240	71340	41.5	43 76	85	<1	107	27	69.5	2.5		1.7	.96	.65	1.72	.10		
20-7,62-64	40	6770	283	245	1240	72670	41.5	43 84	83	<1	109.2	27	65.5	3.7		1.9	1.05	.60	1.7	.11	.07	
22-2,33-35	40	6890	287	249	1320	76800	42	83	83	<1	118.8	28	71	0		1.8	1.04	.47	1.82	.11	.07	
24-1,50-52		6770	282	248	1240	70010	42	48 87	0		112.6	28	72	<1								
24-1,76-79	43	7070	316	274	930	66940	48	90	94	<1	120.6	29	81	<1			1.04	.67	1.92	.12	.05	
25-1,66-68	46	7850	334	274	1240	72180	48	49 85	87	0	116	31	76	3.3		1.9	1.12	.68	2.03	.13	.09	
25-2,87-89	46	8330	347	286	1240	77710	47	47 83.5	82	0	123.4	31	89	1.4		1.4	1.11	.62	2.17	.13	.09	
26-2,14-17	40	6770	277	245	1320	76520	44	44 95	97	0	121.8	28	65	1		1.7	1.01	.60	1.74	.11	.06	
26-4,111-113	41	7670	333	321	1630	63930	44	45 107	105	0	126.1	29	76	1		1.7	.93	.60	1.88	.07		
28-4,120-122		7610	317	307	1320	61620	45	110.5		<1	121.2	30.5	75	<1								
29-1,35-37	(51)	7610	326	314	1780	57350	49	(58) 133	110	<1	124.8	29	74	0		1.6	1.16	.74	2.21	.14	.09	.2
30-1,127-129	35	6350	267	251	1080	55470	36	38 98.5	93	0	121.4	23	64	2.5	.03	1.3	.92	.50	1.60	.07	.04	.1
33-1,18-20		7490	321	306	1390	57910	48	116	5		128.4	30	73	.3								
34-1,76-78	37	7070	296	276.5	1240	63160	40	41 102	99	0	119.4	29	69	0		1.7	.97	.58	1.74	.07		
36-4,18-21		7010	289	284	1550	64630	41	96	<1		116.2	29	66	.4								
38-4,36-38	40	7430	275	320	1700	69170	41	46 119.5	106	0	119.2	32	85	.8		1.5	1.0	.58	1.87	.09		
39-1,119-121	41	7430	309	289	1550	68680	43	46 112	111	0	118.3	32	77	1.3	.04	1.7	1.10	.66	1.88	.09		
41-1,40-42	39	6530	339	312	1080	68540	45	44 108	121	1	126.8	30	70	.2	.08	1.4	.92	.57	1.63	.08	.04	
42-4,89-91	38	5940	267	445	1160	69940	47	44 137	148	0	122.1	27	69	.9		1.2	.91	.60	1.50	.05		
44-2,34-36		6410	274	360	1320	74140	43	129	0		98.9	30	64	0								
45-3,82-85	42	7010	308	357	1550	75750	46	46 136.5	134	4	118.6	31	77	0	.03	.09	1.6	1.06	.62	1.73	.07	.18
45-4,9-12	37	6230	265	343	1240	72110	43	42 143	150	<1	125.7	27	69	0	.02	1.3	.72	.60	1.53	.06		
47-1,27-30	37	6230	278	331	1240	71480	41	43 131	131	<1	93.4	27	68	2.3		1.3	.89	.57	1.71	.06	.04	
48-5,82-84	35	6230	264	322	1240	68400	41.5	43 129	138	.5	93.7	26	68	.3	.03	1.1	.91	.54	1.57	.06		

Tableau V.28b: 25°N, 110 my.

Leg 52, site 418, forage 418A : éléments traces (en ppm).

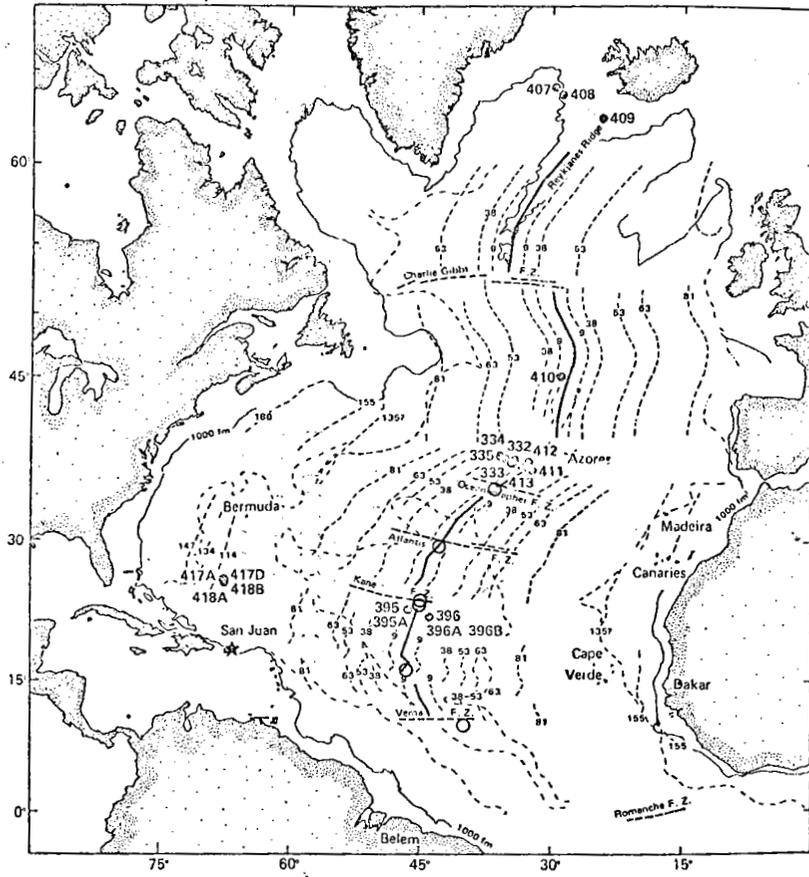


Figure V.11: Position des dragages de la campagne "VEMA". O

## VEMA

----

La campagne VEMA (1977) avait deux objectifs : l'un structural, l'autre géochimique. L'aspect structural concernait la dorsale, depuis la zone FAMOUS (36° N) jusqu'à la zone de fracture VEMA, et la zone de fracture VEMA elle-même. Au cours de cette étude structurale, quelques dragages étaient effectués pour aborder le deuxième aspect: géochimie. Les dragages dont les résultats sont reportés ici ont été effectués dans la vallée du Rift (sauf CH77 - DRO4, dans la zone de fracture KANE), l'utilisation du "Sea-Beam" (Renard et Allenou, 1979) permettant une identification précise du lieu de dragage.

Les basaltes tholéitiques prélevés sont extrêmement frais, excepté dans la zone de fracture KANE. Certains de ces échantillons sont des verres exempts de phénocristaux.

Les échantillons prélevés immédiatement au Sud de la zone de fracture Océanographer CH77 - DRO2 (34°56.9' N, 36°24.7' W : 2338 - 2148 m) présentent les mêmes caractéristiques que ceux de la zone FAMOUS (fig.V.12,13).

Les échantillons de la zone de fracture KANE CH77 - DRO4 (23°42'N, 45°26'W, 4200 m) et ceux prélevés dans le rift immédiatement au Sud de la zone de fracture KANE (CH77 - DRO5 ( 23°25'N , 44°59'W , 4416 m ) ) présentent les mêmes caractéristiques que les échantillons des sites 395 et 396 forés à 5 et 7 millions d'années, légèrement au Sud (Terres rares légères appauvries et "anomalie" Ta, Nb) figure V.14 .

Entre ces deux zones [FAMOUS, Oceanographer] et [KANE, 22° N] les échantillons prélevés immédiatement au Sud de la zone de fracture Atlantis CH77 - DRO3 (29°37.3 N, 42°49.7 W : 3300 - 3210 m), présentent des valeurs normées de Nb, Ta comparativement à celles de La qui ne correspondent ni à celles de la zone FAMOUS, ni à celle de 22° N. La différence fondamentale (fig.V.15) qui existe pour la distribution des terres rares, des rapports isotopiques entre les deux zones indiquées (36° N et 20° N) et cette dernière observation, constitue le sujet de la Campagne MAPCO : Comment se fait la transition entre les deux zones ?

- 15° N correspond à un haut topographique (Le Douaran, 1979). Les échantillons prélevés à cette latitude CH 77 - DRO6 (14°07'N , 45°00'W , 2954 m ) présentent les mêmes caractéristiques que les échantillons de la zone FAMOUS (fig.V.16).

Les échantillons prélevés au Sud de la zone de fracture VEMA CH78 - DRO8 (10°37'N 40°50'W , 4339 m ) correspondent à des basaltes typiquement appauvris, identiques à ceux de la zone de 22° N (fig.V.17).

Echantillon	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	P.F.110°C	P.F.1050°C
101b	50.03	14.39	11.41	.18	7.24	12.01	2.46	.28	1.37	.15	99.52	.26	-.24
102	50.42	14.59	11.58	.18	7.04	12.03	2.58	.24	1.37	.14	100.17	.37	.06
102c	50.01	14.67	11.09	.18	7.28	12.13	2.40	.33	1.38	.18	99.65	.42	.12
201	49.98	14.87	10.86	.17	7.78	12.35	2.40	.31	1.33	.18	100.23	.47	.23
202	49.46	14.72	10.88	.17	7.52	12.31	2.56	.25	1.35	.19	99.41	.52	.30
203	50.61	14.84	10.80	.17	7.48	12.39	2.32	.40	1.33	.17	100.51	.58	.29
204 verre	50.19	14.64	10.74	.17	7.51	12.33	2.28	.29	1.33	.18	99.66	.09	-.51
301	50.87	14.64	11.49	.18	7.22	11.82	2.38	.40	1.38	.18	100.56	.55	.27
302	49.95	14.36	11.78	.20	7.18	11.69	2.30	.45	1.38	.20	99.49	.54	.10

Tableau V.29a:

"Sud Oceanographer" CH77-DR2 : éléments majeurs.

Eléments	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sb	Cs	Ba	La	Eu	Tb	Hf	Ta	Th	U			
Méthode Analytique	NAA	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	NAA	XRF	NAA	XRF	XRF	XRF	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA			
1016	40.6	8220	263	115	1393	79870	47	47.1	44	39	4.3	4.7	132	32.4	114	7.9	.05	.03	37	4.4	1.20	.69	2.23	.44	1.52	.18
102	40.7	8220	260	110	1393	81060	47	46.4	44	38	4.5	5.0	131	32.0	90	6.8	.03	.09	37	4.3	1.17	.66	2.16	.43	.42	.12
102C	39.9	8280	262	128	1393	77630	47	45.9	43	39	5.9	4.1	141	30.7	90	10.7	.06	.08	51	6.0	1.21	.67	2.38	.64	.83	.20
201	39.2	7980	262	129	1316	76020	45	44.7	47	45	7.2	5.8	162	29.7	95	12.9	.04	.07	69	7.1	1.22	.63	2.16	.78	.98	.25
202	38.6	8100	266	119	1316	76160	45	44.4	44	42	4.0	2.2	159	30.1	93	13.1	.09	.07	61	6.9	1.20	.61	2.23	.77	1.22	.31
203	38.8	7980	262	141	1316	75600	44	44.4	44	45	8.3	7.8	161	30.1	93	12.7	.04	.17	67	6.8	1.16	.63	2.18	.80	1.22	.13
204V	39.8	7980	259	129	1316	75180	43	45.1	44	45	6.8	6.2	155	29.5	87	11.8	.01	.03	70	7.0	1.25	.65	2.18	.80	.77	.23
301	38.6	8280	278	67	1393	80430	44	45	36	36	8.3	7.3	144	31.2	99	12.1	.05	.16	73	7.1	1.11	.64	2.29	.79	2.17	.25
302	37.1	8280	275	63	1548	82460	47	45.9	43	34	9.4	9.3	143	31.6	261		.08	.23	215	7.9	1.15	.66	6.18	.77	.77	.21

Tableau V.29b:

"Sud Oceanographer" CH77-DR2 : éléments traces

Echantillon	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	P.F.110°C	P.F.1050°C
104	49.10	14.84	12.20	.20	7.26	10.98	2.50	.17	1.84	.20	99.29	.23	-.27
113	49.80	15.14	12.05	.19	7.25	10.96	2.40	.17	1.79	.19	99.94	.24	-.27
204	50.60	14.95	11.67	.16	7.69	10.60	2.40	.20	1.63	.17	99.53	.07	-.61
205	51.16	15.04	11.71	.16	7.65	10.00	2.40	.18	1.63	.15	100.08	.09	-.58
209	50.18	14.98	11.67	.18	7.62	10.00	2.48	.19	1.64	.16	99.10	.13	-.50
211	50.70	15.04	11.75	.16	7.61	10.09	2.44	.18	1.63	.15	99.75	.08	-.54
213	50.27	14.90	11.65	.17	7.59	10.01	2.42	.19	1.64	.16	99.00	.08	-.62
215	50.65	15.06	11.76	.16	7.68	10.07	2.52	.19	1.64	.15	99.88	.39	-.22
225	50.55	14.90	11.71	.17	7.73	10.04	2.64	.19	1.63	.17	99.73	.32	-.08

Tableau V.30a:

"Sud Atlantis" CH77-DR3 : éléments majeurs.

Eléments	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sb	Cs	Ba	La	Eu	Tb	Hf	Ta	Th	U			
Méthode Analytique	NAA	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	NAA	XRF	NAA	XRF	XRF	XRF	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA			
104	41.0	11040	327	181	1548	85400	45	44.8	98	102	1.9		106	44.3	131	5.0	.02	.03	24	3.9	1.47	.97	3.27	.28	.25	
113	39.9	10740	316	180	1471	84350	45	43.2	100	103	1.7	2.8	109	41.7	136	5.5	.04	.01	17	3.70	1.51	.91	3.11	.27	.24	.11
204	29.5	9780	220	279	1238	81690	48	47.7	180	192	3.7	4.8	135	28.4	94	8.1	.02	.03	25	3.5	1.22	.66	2.48	.51	.41	
205	29.4	9780	219	277	1238	81970	46	47.0	180	190	3.8	2.8	135	27.4	97	7.7	.02	.02	33	3.8	1.21	.66	2.44	.51	.34	
209	29.4	9840	222	278	1393	81690	51	51.3	177	188	3.7	4.1	133	27.2	94	8.0	.04	.04	242	3.8	1.27	.67	2.33	.50	.38	.09
211	28.8	9780	221	285	1238	82250	46	46.6	180	186	3.3	2.2	133	28.2	97	9.3	.03	.02	31	3.7	1.22	.67	2.55	.50	.35	.12
213	29.0	9840	223	274	1316	81550	46	46.5	178	187	3.9	4.1	134	27.8	94	7.4	.01	.05	36	3.8	1.22	.67	2.41	.50	.35	
215	29.3	9840	223	282	1238	82320	47	46.2	179	183	3.8	2.5	134	26.9	100	7.6	.03	.05	27	3.7	1.31	.65	2.37	.50	.34	
225	28.1	9780	219	272	1316	81970	48	46.1	182	185	3.9	3.6	133	28.0	95	7.2	.03	.02	34	3.4	1.2	.61	2.42	.50	.52	.12

Tableau V.30b:

"Sud Atlantis" CH77-DR3 : éléments traces

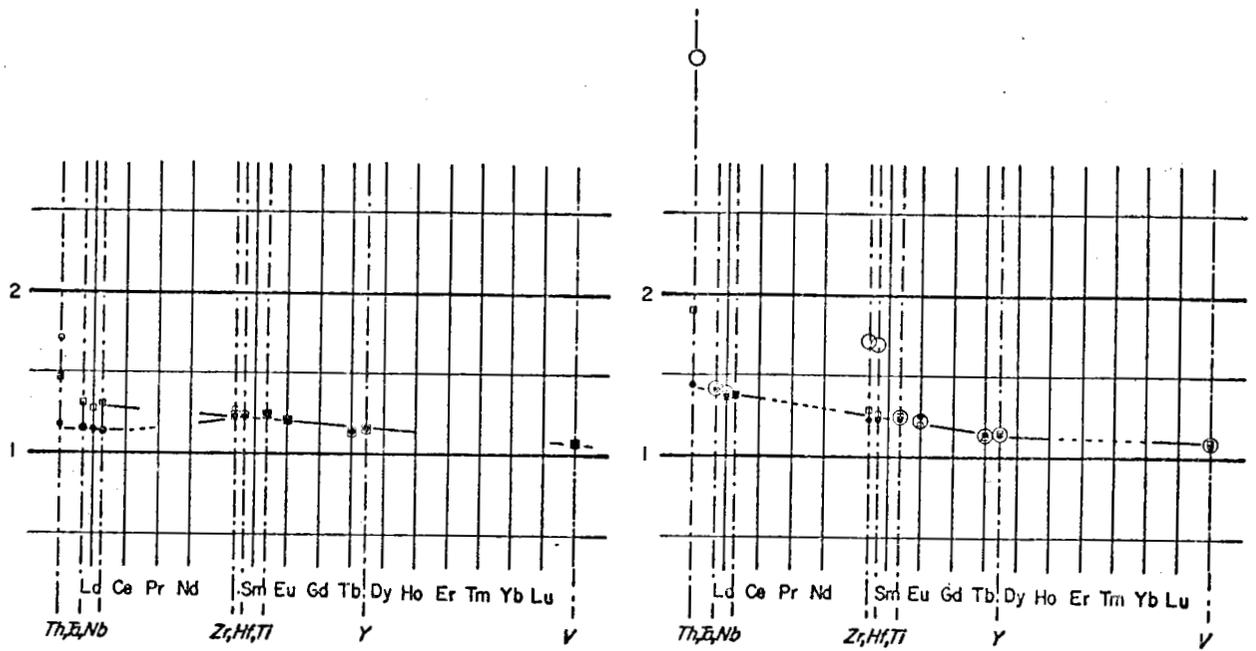


Figure V.12 : "sud Oceanographer"; sur la figure de gauche, noter que pour des valeurs identiques de Zr à V deux valeurs différentes sont observées pour le groupe (Ta, La, Nb) confirmant les propriétés très voisines de ces trois éléments. Sur la figure de droite, l'anomalie Th, Zr, Hf demeure inexpliquée.

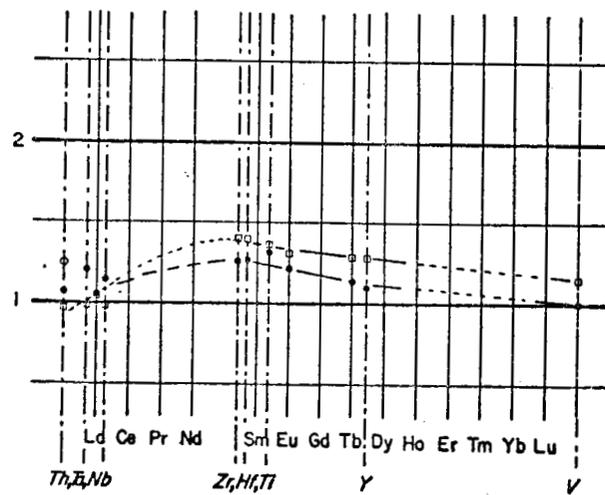


Figure V.13 : "sud Atlantis"; deux groupes d'échantillons, dont l'un ne présente pas l'une des deux valeurs La/Ta. Cette observation pose le problème de la manière dont se fait la transition entre 36°N et 22°N, objet de la campagne MAPCO 1979.

Echantillon	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	P.F.110°C	P.F.1050°C
101	49.37	18.38	9.23	.14	6.18	12.39	2.36	.24	1.37	.15	99.81	1.17	.64
103	50.27	16.20	10.52	.17	6.56	11.63	2.56	.29	1.61	.18	99.99	1.81	1.44
105	50.48	15.32	11.36	.18	6.73	11.18	2.84	.27	1.89	.21	100.46	1.17	.48
149	51.27	17.21	7.90	.12	8.18	12.30	2.54	.11	.46	.05	100.14	.80	1.49
153	50.34	16.86	10.08	.13	6.53	11.46	2.88	.22	1.54	.18	100.22	1.47	1.06
166	49.61	16.19	11.96	.19	5.33	11.35	3.28	.15	2.02	.20	100.28	2.70	1.31
170	49.02	19.34	8.29	.21	7.14	11.06	3.56	.38	1.17	.13	100.30	1.87	3.02
172	50.43	16.55	10.38	.14	6.74	11.34	3.02	.22	1.60	.18	100.60	1.29	1.10
201	50.81	19.84	4.71	.10	8.65	12.56	3.21	.11	.30	.06	100.35	.29	4.34
209	49.10	18.22	6.93	.11	10.92	12.87	2.14	.09	.32	.05	100.75	.36	2.84
212	50.40	17.59	6.56	.12	9.50	13.38	2.48	.12	.37	.08	100.60	.36	2.29
301	50.16	16.11	10.17	.15	7.60	11.82	2.76	.22	1.54	.16	100.69	1.41	1.01
304	51.31	17.44	4.74	.10	9.01	15.21	2.20	.07	.35	.06	100.49	.28	.78
306	46.08	2.09	9.35	.11	42.33	.52	.10	.06	.02	.04	100.70	1.19	11.16
401	50.51	15.28	10.83	.19	7.75	11.04	3.08	.34	1.43	.15	100.60	1.10	1.26

Tableau V.31a:

"Zone de Fracture KANE" CH77-DR4 : éléments majeurs.

Eléments	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sb	Ce	Ba	La	Eu	Tb	Hf	Ta	Th	U				
Méthode Analytique	NAA	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	NAA	XRF	NAA	XRF	NAA	XRF	XRF	NAA	NAA	NAA										
101	31.3	8220	243	245	1084	64610	36	35.6	97	99	4.1	3.3	129	33.4	104	2.5	.01	.25		2.7	1.17	.72	2.37	.15	.12		
103	39.1	9660	285	297	1316	73640	44	44.9	72	71	4.4	3.8	127	39.4	116	2.4	.06	.21		3.5	1.42	.82	2.87	.20	.15		
105	39.6	11340	307	197	1393	79520	46	44.4	107	110	5.0	3.5	131	45.4	150	3.0	.02	.22		4.2	1.73	1.03	3.52	.18	.14		
149	34.	2760	210	565	929	55300	50	54.2	246	259	1.2	2.2	119	16.0	25	.4	.09	.05		4	.28	.60	.26	.48	.01	.07	
153	36.1	9240	263	280	1006	70560	39	39.5	146	123	2.1	3	144	36.3	120	3.0	.01	.18			3.2	1.28	.77	2.77	.18	.21	
166	40.2	12120	337	237	1471	83720	49	46.6	128	130	.7		118	46.5	152	4.2	.04	.02			4.3	1.68	1.19	3.49	.25	.24	
170	30.3	7020	218	331	1625	58030	39	40.1	155	154	2.3		265	27.4	72	3.1	.03	.04			2.2	1.04	.58	1.96	.12	.07	
172	37.9	9600	277	269	1084	72660	39	40.8	120	124	2.2	2.7	144	38.9	123	4.2	.02	.09			3.5	1.50	.94	2.91	.19	.14	
201	25.6	1800	116	364	774	32970	28	31.3	137	137	1.4		189	10.9	13	.7	.02				.39	.44	.16	.37	.02	.03	
209		1920	129	1377	851	48510	42		207		.8		97	11.5	19	.2											
212	30.7	2220	148	435	928	45920	35	36.4	141	145	1.0		81	15.9	23	.9	.05	1.1			.65	.48	.27	.63	.01	.05	
301	38.8	9240	277	344	1161	71190	41	41	94	94	3.0	2.2	122	36.8		3.7	.03	.16			5	3.0	1.44	.8	2.6	.21	.15
304	35.8	2100	155	1353	774	33180	26	29.7	162	174	.7		110	12.8	22	0.0	.01					.35	.54	.21	.33	.01	.01
306		120	66	2969	851	65450	101		1713		.2		2	7.4		.6											
401	37.1	8580	266	314	1471	75810	42	41.8	99	100	6.2	2.5	124	34.5	98	2.7	.08	.18				2.6	1.15	.72	2.59	.17	.15

Tableau V.31b:

"Zone de fracture KANE" CH77-DR4 : éléments traces

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	P.F.110°C	P.F.1050°C
1	49.78	14.79	11.42	.19	7.56	10.81	2.90	.17	1.82	.21	99.65	.05	-.66
1 verre	49.96	14.95	11.44	.19	7.50	10.79	2.82	.16	1.83	.19	99.89	.04	-.69
3	49.61	14.81	11.42	.18	8.16	10.96	2.72	.16	1.72	.19	99.93	.07	-.55
107	49.93	15.01	11.47	.19	7.84	10.87	2.90	.20	1.84	.21	100.46	.17	-.27
118	50.03	14.88	11.49	.18	7.64	11.01	2.84	.23	1.73	.14	100.17	.23	-.13
164	48.93	14.95	11.39	.18	8.07	11.07	2.66	.15	1.69	.18	99.27	.10	-.46
401	49.70	15.91	10.11	.16	8.02	11.83	2.66	.14	1.35	.15	100.03	.15	-.38
408	49.74	14.94	12.27	.19	7.01	10.57	2.80	.23	2.11	.23	100.09	.18	-.39

Tableau V.32a:

"Sud KANE" CH77-DR5 : éléments majeurs.

Eléments	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sb	Ce	Ba	La	Eu	Tb	Hf	Ta	Th	U				
Méthode Analytique	NAA	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	NAA	XRF	NAA	XRF	XRF	XRF	NAA	NAA												
1	37.6	10920	292	240	1471	79940	44	42.7	105	107	1.5	134	41.0	143	4.0	.01					4.1	1.54	1.00	3.58	.24	.18	
1 verre	38.6	10980	284	234	1471	80080	43	44.5	106	109	.8	132	41.7	139	4.0	.02					4.5	1.73	.96	3.54	.24	.23	
3	38.3	10320	285	265	1393	79940	45	44.7	112	118	.7	128	38.8	127	3.1	.02					3.9	1.49	.87	3.15	.21	.19	
107	38.0	11040	289	238	1471	80290	43	43.3	106	104	1.2	133	41.0	144	3.5	.01					7	4.3	1.57	.93	3.6	.23	.30
118	37.6	10380	286	263	1393	80430	45	44.1	109	114	2.0	129	39.8	132	3.3	.02	.05	12			3.4	1.50	.86	3.14	.19	.15	
164	37.9	10140	282	267	1393	79730	44	44.7	119	118	.6	129	37.6	128	3.6	.02					3.6	1.46	.86	3.18	.19	.14	
401	35.3	8100	242	290	1238	70770	40	42.7	113	119	.8	114	38.4	97	2.5							2.6	1.23	.70	2.42	.12	.06
408	38.9	12660	315	166	1471	65890	43	43.3	88	90	.9	125	48.3	168	4.9							5.4	1.86	1.13	4.15	.28	.20

Tableau V.32b:

"Sud KANE" CH77-DR5 : éléments traces

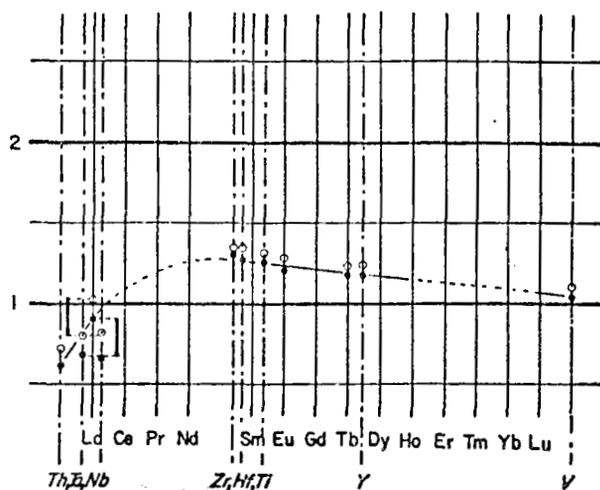


Figure V.14 : zone de fracture Kane :distribution identique à celles de 22 et 25°N.

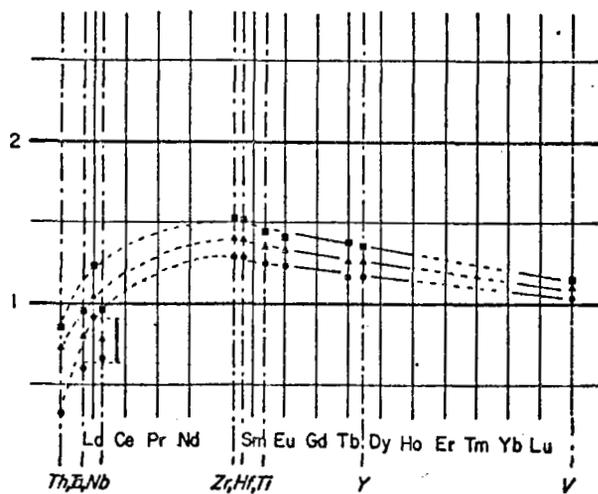


Figure V.15 : "sud Kane" : distribution identique à celles de 22 et 25°N.

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	P.F.110°C	P.F.1050°C
119	49.59	15.27	10.78	.17	7.49	11.52	2.42	.58	1.42	.23	99.47	.39	-.07
124	50.97	15.23	10.35	.17	7.31	11.59	2.42	.60	1.46	.23	100.33	.29	.00
125	49.99	15.57	10.25	.16	7.58	11.97	2.46	.55	1.33	.20	100.06	.20	.12
126	49.89	15.37	10.54	.17	7.26	11.52	2.42	.60	1.44	.21	99.42	.36	.16
157 verre	50.39	15.25	10.50	.17	7.55	11.43	2.42	.50	1.42	.21	99.84	.05	-.35
201	48.04	15.37	9.71	.16	10.46	12.07	1.90	.37	.99	.16	99.23	.23	.13
203	48.63	15.86	10.15	.16	9.37	12.02	1.96	.43	1.04	.16	99.78	.27	.09
205	50.04	16.47	10.01	.15	6.10	11.45	2.48	.63	1.58	.26	99.17	.31	.13

Tableau V.33a:

"Haut 15° N" CH77-DR6 : éléments majeurs.

Eléments	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sb	Cs	Ba	La	Eu	Tb	Hf	Ta	Th	U			
Méthode Analytique	NAA	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	NAA	XRF	NAA	XRF	NAA	XRF	XRF	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA		
119	36.5	8520	237	279	1316	75460	43	43.4	118	118	10.0	8.6	226	25.5	117	18.6	.08	.11	113	10.7	1.22	.58	2.49	1.25	1.14	.39
124	37.3	8760	244	263	1316	72450	40	41.6	99	98	9.9	8.8	225	26.1	110	20.1	.02	.11	116	10.2	1.23	.58	2.6	1.23	1.19	.31
125	37.4	7980	238	301	1238	71750	40	42.2	105	107	9.0	8.6	219	26.4	103	18.1	.03	.14	96	9.2	1.44	.56	2.34	1.12	1.02	.22
126	35.5	8640	245	253	1316	73780	41	39.4	98	92	10.2	9.4	226	26.0	102	18.2	.03	.14	118	10.1	1.23	.56	2.53	1.20	1.12	.19
157 verre	35.6	8520	245	283	1316	73500	41	41.6	106	107	9.2	8.7	220	25.8	108	19.6	.03	.09	109	10.6	1.23	.56	2.47	1.21	1.13	.29
201	35.5	5940	204	803	1238	67970	45	47.8	236	247	5.3	4.7	193	22.0	74	10.8	.04	.09	60	6.0	.92	.44	1.57	.68	.65	.2
203	35.2	6240	206	512	1238	71050	46	46.6	204	207	7.1	6.7	197	24.2	84	11.7	.03	.21	63	6.1	.91	.47	1.8	.73	.69	.21
205	33.2	9480	244	187	1161	70070	42	36.5	73	74	10.4	8.4	271	26.1	122	20.6	.02	.15	118	12	1.36	.6	2.94	1.35	1.27	.36

Tableau V.33b:

"Haut 15° N" CH77-DR6 : éléments traces

Echantillon	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	P.F.110°C	P.F.1050°C
13	49.07	14.46	12.71	.20	7.03	10.14	3.25	.21	2.16	.23	99.46	.21	-.29
20	49.55	14.54	12.65	.20	7.16	10.21	3.36	.21	2.17	.22	100.27	.22	-.28
23	48.83	19.42	8.12	.12	7.24	12.53	2.51	.21	1.18	.13	100.29	.21	-.00
26	49.55	19.19	8.06	.13	6.95	12.52	2.89	.14	1.14	.10	100.67	.16	-.12
27, 28, 29	49.33	14.53	11.66	.19	7.58	10.56	3.27	.15	1.98	.22	99.47	.04	-.70
46	49.66	14.58	12.84	.20	6.70	10.27	3.53	.38	2.19	.22	100.57	.38	-.04

Tableau V.34a:

"Sud VEMA" CH78-DR8 : éléments majeurs.

Eléments	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sb	Cs	Ba	La	Eu	Tb	Hf	Ta	Th			
Méthode Analytique	NAA	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	NAA	XRF	NAA	XRF	NAA	XRF	XRF	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA	NAA		
DR8.13	40.6	12960	332	164	1550	88970	46	43.3	103	106	1.1	132	50	171	6.0	.03		18	5.1	1.88	1.31	4.54	.24	.19	
DR8.20	38.5	13020	323	165	1550	88550	45	42	103	104	.9	134	50	176	6.6	.02			4.9	1.81	1.11	4.36	.24	.19	
DR8.23	26.9	7080	198	283	930	56840	33	34.3	126	138	2.4	2.8	161	27	83	3.2	.03	.05		2.6	1.11	.60	2.13	.12	.38
DR8.26	27.7	6840	204	256	1000	56420	33	34.2	116	109	1.3	150	27	77	3.1	.02	.03		2.3	1.05	.56	2.05	.11	.23	
DR8.27-28-29	38.1	11880	303	233	1470	81620	45	43.7	119	129	.8	135	45	151	5.7	.02	.02		4.5	1.74	1.12	3.94	.23	.39	
DR8.46	38.6	13140	331	169	1550	89880	47	41.6	105	102	3.7	3.2	137	50	177	6.5	.05	.14	6	5.1	1.89	1.09	4.42	.24	.21

Tableau V.34b:

"Sud VEMA" CH78-DR8 : éléments traces

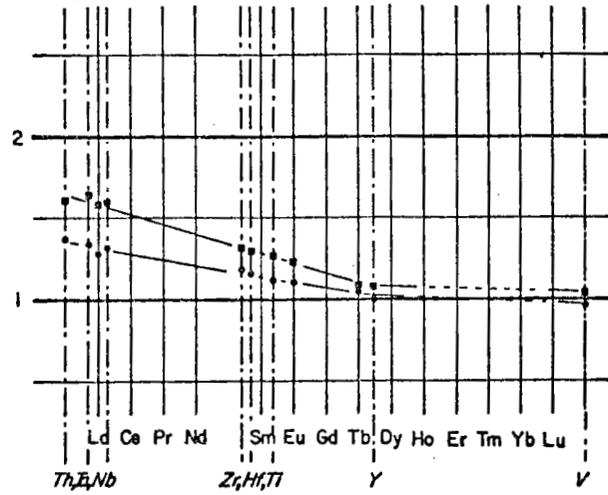


Figure V.16 : "haut 15°N : distribution comparable à celle de la zone FAMOUS : notion de corrélation entre distribution terres rares "élargie" et profondeur moyenne à âge zéro.

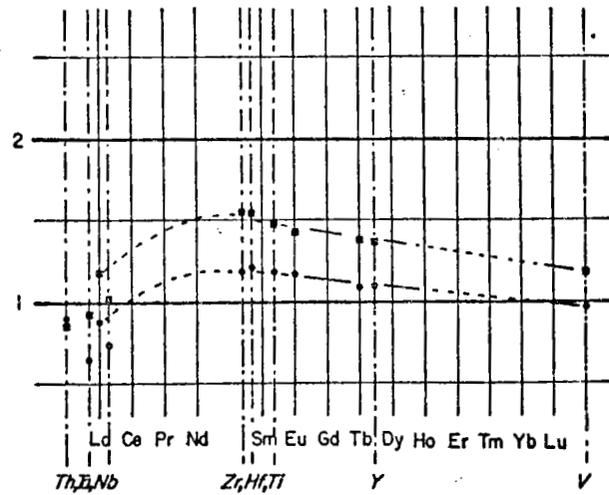


Figure V.17 : "sud Vema" : distribution voisine de celle à 22 , 25°N .

## BIBLIOGRAPHIE

-----

- ALBAREDE F. and BOTTINGA Y., 1972 - Kinetic disequilibrium in trace element partitioning between phenocrysts and host lava. *Geochim. Cosmochim. acta*, vol. 36, pp 141-156.
- ALLEGRE C.J., BREVART O., DUPRE B. and MINSTER J.F. (in press) - Isotopic and chemical effects produced in a continuously differentiating earth mantle. *Proceedings of the Royal Society*.
- ALLEGRE C.J., JAVOY M. and MICHARD G., 1968 - Etude de la distribution et l'abondance des éléments de transitions dans l'écorce terrestre, comparée à celles des Terres Rares. In *Origin and Distribution of the Elements*, (editor L.H. Ahrens), p. 914-928. Pergamon Press.
- ALLEGRE C.J., MONTIGNY R. and BOTTINGA Y., 1973 - Cortège ophiolitique et cortège océanique, géochimie comparée et mode de genèse. *Bull. Soc. Geol. Fr.*, 15, p.461-477.
- ALLEGRE C.J., TREUIL M., MINSTER J.F., MINSTER B. and ALBAREDE F., 1977 - Systematic use of trace element in igneous processes, I. Fractional crystallization processes in volcanic suites. *Contrib. Mineral. Petrol.* 60, p. 57.
- ALLEGRE C.J. and MINSTER J.F., 1978 - Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes. *Earth Planet. Sci. Lett.* 38, p. 1-25.
- ALLER L.H., 1961 - *The abundances of the elements*. New York: Interscience.
- ALLER L.H., 1965 - The abundances of the elements in the solar atmosphere. *Advan. Astron. Astrophys.* 3, p 1 - 25.
- ANDRIANBOLONA D.R., LEFEVRE C. and DUPUY C., 1975 - Coefficient de partage des éléments de transition dans les minéraux ferromagnésiens extraits des dacites. *C.R. Acad. Sci. Paris* 281D, 1797.
- ANDRIANBOLONA D.R., 1978 - Etude de la répartition et du comportement des éléments de transition : Ti, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, dans les différentes séries volcaniques. Thèse - Université des Sciences et Techniques du Languedoc.
- ARCYANA , 1975 - Transform fault and Rift Valley from bathyscaphe and diving saucer. *Science* 190 (4210), p. 108-116.
- ARCYANA , 1977 - Rocks collected by bathyscaphe and diving saucer in the "FAMOUS" area of the mid-Atlantic Rift valley : petrological diversity and structural setting. *Deep-sea Research*, vol. 24, p. 565 to 589.
- AUMENTO F., 1967 - Magmatic evolution on the mid-Atlantic Ridge. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2, p. 225-230.
- AUMENTO F., 1968 - The mid-Atlantic Ridge near 45°N, 2, Basalts from the area of Confederation Peak. *Can. J. Earth Sci.* 5 (1), p. 1-21.
- AUMENTO F., 1969 - Diorites from the mid-Atlantic Ridge at 45°N. *Science*, 165, p. 1112-1113.

- AUMENTO F., LONCAREVIC B.D. and ROSS D.I. , 1971 - Hudson geotraverse : geology of the mid-Atlantic Ridge near 45°N. *Trans. Roy. Soc. Ser. A* 268, p. 623-650.
- AUMENTO F. and LOUBAT H., 1971 - The mid-Atlantic Ridge near 45°N, XVI. Serpentinized ultramafic intrusions. *Can. J. Earth Sci.* 8, p. 631-663.
- BALLARD R.D., BRYAN W.B., HEIRTZLER J.R., KELLER G., MOORE J.G. and van ANDEL Tj.H., 1975 - Manned submersible observations in the FAMOUS area, mid-Atlantic Ridge. *Science*, vol. 190, p. 103-108.
- BALLARD R.D. and van ANDEL Tj.H., 1977 - Project FAMOUS : Operational techniques and American submersible operations. *Geol. Soc. America Bull.*, vol. 88, p. 495-506.
- BALLARD R.D. and van ANDEL Tj.H., - Morphology and tectonics of the Inner Rift Valley at 36° 50'N on the mid-Atlantic Ridge. *Geol. Soc. America Bull.*
- BELLAÏCHE G., CHEMINÉE J.L., FRANCHETEAU J., HEKINIAN R., LE PICHON X., NEEDHAM H.D. and BALLARD B., 1974 - Rift Valley's inner floor : first submersible study. *Nature* 250, p. 558-560.
- BENCE A.E., PAPIKE J.J. and AYUSO R.A., 1975 - Petrology of submarine basalts from the central Caribbean : D.S.D.P. leg 15. *J. Geophys. Res.*, 80, p. 4775-4804.
- BENCE A.E., BAYLIS D.M., BENDER J.F. and GROVE T.L., 1979 - Diversity of Major and Minor Elements in mid-Ocean Ridge Basalts. *M. Ewing series*, vol.2, Am. Geophys. Union.
- BENDER J.F., HODGES F.N. and BENCE A.E., 1978 - Petrogenesis of basalts from the project FAMOUS area : Experimental study from 0 to 15 Kb. *E.P.S.L.*
- BETHE H., 1929 - Splitting of terms in crystals. *Ann. Phys.* 3, p. 133-206.
- BIRCH F., 1965 - Speculations on the Earth's thermal history. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 76, p. 133-153.
- BLANCHARD D.P., RHODES J.M., DUNGAN M.A., RODGERS K.V., DONALDSON C.H., BRANNON J.C., JACOBS J.W. and GIBSON E.K., 1976 - The chemistry and petrology of Basalts from Leg 37 of the Deep-Sea Drilling Project. *J. Geophys. Res.*, Vol. 81, n° 23, p. 4231-4246.
- BONNIN J., 1978 - Etude géodynamique de zone Açores-Gibraltar. Thèse d'Etat, Paris, 230 p.
- BOTTINGA Y. and ALLEGRE C.J., 1976 - Geophysical and petrological models of the oceanic lithosphere. *Tectonophysics* 32, p. 9-59.
- BOUDIER F., 1976 - Le massif lherzolitique de LANZO. Etude structurale et pétrologique. Thèse de doctorat d'Etat, Univ. de Nantes.
- BOUGAULT H. et HEKINIAN R., 1974 - Rift valley in the atlantic ocean near 36°50'N : petrology and geochemistry of basaltic rocks. *Earth Planet. Sci. Letter* 24, p. 249-261.
- BOUGAULT H., 1977 - Evidence de la cristallisation fractionnée au niveau d'une ride médio-océanique : Co, Ni, Cr, FAMOUS, Leg 37 du D.S.D.P. *Bull. Soc. Geol. France*, XIX, n° 6, p. 1207-1212.
- BOUGAULT H., 1977 - First transition series elements : fractional crystallization and partial melting. Leg 37 Initial Reports of the Deep-Sea Drilling Project. Vol. 37, Washington (U.S. Government Printing Office).

- BOUGAULT H., 1977 - Major elements : analytical chemistry onboard and preliminary results. Initial Reports of the Deep-Sea Drilling Project, vol. 37, Washington (U.S. Government Printing Office) p. 643.
- BOUGAULT H., CAMBON P., CORRE O., JORON J.L. and TREUIL M., 1979 - Evidence for variability of magmatic processes and upper mantle heterogeneity in the axial region of the mid-Atlantic Ridge near 22° and 36°N. *Tectonophysics*, 55, p. 11-34.
- BOUGAULT H., TREUIL M. and JORON J.L., 1979 - Trace elements in basalts from 23°N and 36°N in the Atlantic ocean : fractional crystallization, partial melting and heterogeneity of the upper mantle in Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project , vol. 45, p. 493-506.
- BOUGAULT H., JORON J.L. and TREUIL M., 1979 - Alteration, fractional crystallization, partial melting, mantle properties from trace elements in basalts recovered in the north atlantic. Maurice Ewing series, vol. 2 (AGU). Deep Drilling results in the Atlantic ocean : ocean crust.
- BOUGAULT H., JORON J.L. and TREUIL M. , in press - The primordial chondritic nature and large scale heterogeneities in the mantle : evidence from high and low partition coefficient elements in oceanic basalts. *Proceeding of the Royal Society*.
- BRYAN W.B., FINGER L.W. and CHAYES F., 1969 - Estimating proportions in petrographic mixing equations by least-squares approximation. *Science*, 163, p. 926-927.
- BRYAN W.B., THOMPSON G., FREY F.A. and DICKEY J.S., 1976 - Inferred geological settings and differentiation in basalts from the Deep Sea Drilling Project : *J. Geophys. Res.*, vol. 81, p. 4285-4304.
- BRYAN W.B. and THOMPSON G., 1977 - Basalts from D.S.D.P. Leg 37 and the FAMOUS area : compositional and petrogenetic comparisons. *Can. J. Earth Sci.*, 14, p. 875-885.
- BRYAN W.B. et MOORE J.G., 1977 - Compositional variations of young basalts in the mid-Atlantic Ridge rift valley near lat. 36° 49'N. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 88, p. 556-570.
- BRYAN W.B. and THOMPSON G., 1979 - Compositional variation in a steady state zoned magma chamber : mid-Atlantic Ridge at 36° 50'N. *Tectonophysics*.
- BURNS R.G., 1970 - Mineralogical applications of crystal field theory. Cambridge Earth Science Series, Cambridge University Press., p. 224.
- BURNS R.G., 1970 - Site preferences of transition metal ions in silicate crystal structures. In *Geochemical application of crystal-field theory : Chem. Geol.*, 5, p. 275-283.
- BURNS R.G., FYFE W.S., 1972 - Crystal field theory, in *Encyclopedia of Geochemistry and environmental sciences*, Fairbridge Ed., Van Nostrand Reinhold Company.
- CAMBON P., JORON J.L.; BOUGAULT H. and TREUIL M., in press - Emperor Seamounts : trace elements in transitional tholeiites, Alkali basalts and Hawaiites : Mantle homogeneity or heterogeneity and magmatic processes, in *Initial Report of the Deep Sea Drilling Project*, 55, Washington (U.S. Government Printing Office).
- CANN J.R., 1970 - Rb, Sr, Y, Zr and Nb in some ocean floor basaltic rocks. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 10, p. 7-11.
- CANN J.R., 1971 - Major element variations in ocean floor basalts. *Phil. Trans. Roy. Soc. Ser. A*, 268, p. 495-506.

- COLEMAN R.G., 1977 - Ophiolites (Springer, Berlin).
- CORYELL C.D., CHASE J.W. and WINCHESTER J.W., 1963 - A procedure for geochemical interpretation of terrestrial rare-earth abundance patterns. *J. Geophys. Res.* 68, p. 559.
- CULLERS R.L., MEDARIS L.G. et HASKIN L.A., 1973 - Experimental studies of the distribution of rare earths as trace elements among silicate minerals and liquids and water. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, p. 1499-1512.
- CURTIS C.D., 1964 - Application of the crystalfields theory : the inclusion of trace transition elements in minerals during magmatic differentiation. *Geochem. Cosmochim. Acta*, 28, p. 389-403.
- DALE S.M. and HENDERSON P., 1972 - The partition of transition elements in phenocryst bearing basalts and the implications about melt structure, 24 th IGC, Section 10.
- DELONG S.E., 1974 - Distribution of Rb, Sr and Ni in igneous rocks, central and western Aleutian Island, Alaska. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 38, p. 245-266.
- DE PAOLO D.J. and WASSERBURG G.J. - 1976 - Nd isotopic variations and petrogenesis models. *Geophys. Res. Lett.* 3, p. 249.
- DONALDSON C.H., BROWN R.W. and REID A.M., 1976 - Petrology and chemistry of basalts from Nazca plate : Part 1 - petrography and mineral chemistry, in Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 34, Washington (U.S. Government Printing Office) p. 227-238.
- DON ELTHON , 1979 - High magnesia liquids as the parental magma for ocean floor basalts. *Nature* 278, p. 514-518.
- DONN W.L., DONN B.D. and VALENTINE W.G., 1965 - On the early history of the Earth. *Bull. Geol. Soc. Am.* 76, p. 287-306.
- D.S.D.P., AUMENTO F., MELSON W. et al., 1977 - Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 37, Washington (U.S. Government Printing Office).
- D.S.D.P., CANN J.R., et al., 1979 - Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 49, Washington (U.S. Government Printing Office).
- D.S.D.P., HEIRTZLER J.R., DMITRIEV L. et al., 1979 - Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 46, Washington (U.S. Government Printing Office).
- D.S.D.P., MELSON W., RABINOWITZ P. et al., 1979 - Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project , 45, Washington (U.S. Government Printing Office).
- D.S.D.P., in press - Initial Report of the Deep Sea Drilling Project, 51, 52, 53, Washington (U.S. Government Printing Office).
- D.S.D.P. , in press - Initial Report of the Deep Sea Drilling Project, 55, Washington (U.S. Government Printing Office).
- EHMANN W.D. and REBAGAY T.V., 1970 - Zirconium and Hafnium in meteorites by activation analysis. *Geochim. Cosmochim. Acta* 34, p. 649.
- EHMANN W.D. and CHYIL L., 1974 - Zirconium and hafnium in meteorites. *Earth Planet Sci. Lett.* 21, p. 230-234.
- ENGEL A.E.J. and ENGEL C.G., 1964 - Igneous rocks of the East Pacific rise, *Science*, 146, p.477-485.

- ENGEL A.E.J. and ENGEL C.G., 1964 - Composition of basalts from the mid-Atlantic Ridge. *Science* 144, p. 1330.
- ENGEL A.E.J., ENGEL C.G. and HAVENS R.G., 1965a - Chemical characteristics of oceanic basalts and the upper mantle. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 76, p. 719-734.
- ENGEL C.G., FISHER R.L. and ENGEL A.E.J., 1965b - Igneous rocks of the Indian Ocean floor. *Science*, 150, p. 605-610.
- ERLANK A.J. and KABLE E.J.D., 1976 - The significance of incompatible elements in mid-Atlantic Ridge basalts from 45°N with particular reference to Zr/Nb. *Contrib. Mineral. Petrol.* 54, p. 281.
- ETIENNE F., 1971 - La lherzolite rubanée de Baldissero Canavese, Essai d'analyse structurale et petrogenèse. Thèse de 3ème Cycle, Nancy.
- EVANS B.W., 1969 - The nickel partition geothermometer applied to the prehistoric Makaopuhi lava lake, Hawaii. *Geochim. Cosmochim. Acta* 33, p. 409.
- FIJK M.R., 1978 - Melting relations and crystal chemistry of Rey Kjanas Ridge basalts. PH.D. Thesis, University of Rhode Island.
- FRANCHETEAU J., NEEDHAM H.D., CHOUCROUNE P., JUTEAU T., SEGURET M., BALLARD R.D., FOX P.J., NORMARK W., CARRANZA A., CORDOBA D., GUERRERO J., RANGIN C., BOUGAULT H., CAMBON P., HEKENIAN R. - Massive deep-sea sulphide ore deposits discovered on the East Pacific Rise. *Nature* vol. 277, N° 5697, p523-528. (1979)
- FREY F.A., HASKIN M.A., POETZ J.A. and HASKIN L.A., 1968 - Rare-earth abundances in some basic rocks. *J. Geophys. Res.* 73 p.6085-6098.
- FREY F.A., BRYAN W.B. and THOMPSON G., 1974 - Atlantic ocean floor ; Geochemistry and petrology of basalts from legs 2 and 3 of the Deep-Sea Drilling Project. *J. Geophys. Res.* 79, p. 5507-5527.
- FREY F.A., GREEN D.H. and ROY S.O., 1978 - Integrates models of Basalts petrogenesis : a study of quartz tholeiites to olivine melilitites from South Eastern Australia utilising Geochemical and Experimental petrological data. *Journal of Petrology*, vol. 19, part. 3, p. 463-513.
- GANAPATHY R., PAPIA G.M. and GROSSMAN?L., 1976 - The abundances of zirconium and hafnium in the solar system. *E.P.S.L.*, 29, p. 302.
- GAST P.W., 1968 - Trace element fractionation and the origin of tholeiitic and alkaline magma types. *Geochim. Cosmochim. Acta* 32, p. 1057-1086.
- GILL J.B., 1974 - Role of underthrust oceanic crust in the genesis of a Fijian calc-alkaline suite. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 43, p. 29-45.
- GOLDSCHMIDT V.M., 1937 - The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. *J. Chem. Soc.*, p. 655.
- GOSLIN J., 1973 - Etude géophysique de la terminaison orientale de la dorsale de Walvis (Atlantique Sud). Thèse 3ème cycle, Paris.
- GRAHAM A.L. and MASON B., 1972 - Niobium in meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 36, p. 917.

- GREEN D.H. and RINGWOOD A.E., 1963 - Mineral assemblages in a model mantle composition. *J. Geophys. Res.*, 68, p. 937-945.
- GREEN D.H. and RINGWOOD A.E., 1967 - The genesis of basaltic magmas. *Contrib. Mineral. Petrol.* 15, p. 103-190.
- GULACAR O.F., 1973 - Contribution à la géochimie du cuivre, du nickel et du cobalt dans les roches ultrabasiques. Thèse n° 1619, Fac. Sciences Genève (Dépt. de Minéralogie et Géophysique).
- HAKLI T.A. and WRIGHT T.L., 1967 - The fractionation of nickel between olivine and augite as a geothermometer. *Geochim. Cosmochim. Acta* 31, p. 877-884.
- HAKLI T.A., 1968 - An attempt to apply the Makaopuhi nickel fractionation data to temperature determination of a basic intrusive. *Geochim. Cosmochim. Acta* 32, p. 449-460.
- HANSON G.N. and LANGMUIR C.H., 1979 - Use of distribution coefficients for major elements in mantle-melt systems. *Geochim. Cosmochim. Acta*.
- HART S.R., SCHILLING J.G. and POWELL J.L., 1973 - Basalts from Iceland and along the Rey Kjanes Ridge : Sr isotope geochemistry. *Nature* 246, p. 104.
- HART S. and SCHILLING J.G., 1973 - The geochemistry of basalts from Iceland and the Rey Kjanes Ridge. *Carnegie Institute, Washington, Year book*, vol. 72, p. 259-261.
- ✓ HART S.R., DAVIS K.E., KUSHIRO I. and WATSON E.B., 1976 - Partitioning of nickel between olivine and silicate liquid. *Geol. Soc. Am. Abstr. Progr.* 8, p. 906.
- HEKINIAN R., 1972 - Volcanics from the Walvis Ridge in the south east Atlantic ocean. *Nature* 239, p. 91.
- HEKINIAN R. and AUMENTO F., 1973 - Rocks from the Gibbs fracture zone and the Minia Seamount near 53°N in the Atlantic Ocean, *Mar. Geol.*, 14, p. 47-72.
- HEKINIAN R., CHAIGNEAU M. and CHEMINEE J.L., 1973 - Popping rocks and lava tubes from the Mid-Atlantic Rift Valley at 36°N, *Nature* 245, p. 371-373.
- HEKINIAN R., MOORE J.G. and BRYAN W.B., 1976 - Volcanic rocks and processes of the Mid-Atlantic Ridge rift valley near 36°49'N : *Contr. Mineralogy and Petrology*, 58, p. 83-110.
- HEKINIAN R. and THOMPSON G., 1976 - Comparative geochemistry of volcanics from Rift Valleys, transform faults and aseismic ridges. *Contrib. Mineral. Petrol.*, p. 145-162.
- HELTON Don., 1979 - High magnesia liquids as the parental magma for ocean floor basalts. *Nature* 278, p. 514-518.
- HENDERSON P. and DALE I.M., 1969 - The partitioning of selected transition element ions between olivine and ground mass of oceanic basalts. *Chem. Geol.*, 5, p. 267-274.
- HERTOGEN J. and GILBELS R., 1976 - Calculation of trace element fractionation during partial melting. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 40, p. 313.
- HESS H.H., 1962 - History of the ocean basins. In *Petrologic studies, Buddington Memorial volume*, *Geol. Soc. Am. New York* p 599-620.

- JAHN H.A. and TELLER E., 1937 - Stability of polyatomic molecules in degenerate electronic states, orbital degeneracy. Proc. Royal Soc. (London) A 161, p. 220-225.
- JORON J.L., BOUGAULT H., TREUIL M. et ALLEGRE C.J., 1976 - Etude géochimique des roches magmatiques de la zone FAMOUS et de l'archipel des Açores. Bull. Soc. Geol. Fr., (7), t. XVIII, n° 4, p. 811-818.
- JORON J.L. et TREUIL M., 1977 - Utilisation des propriétés des éléments fortement hygromagmatophiles pour l'étude de la composition chimique et de l'hétérogénéité du manteau. Bul. Soc. Géol. France 7ème série, t.XIX, N°6, p.1197-1205.
- JORON J.L., BOUGAULT H., WOOD D.A., et TREUIL M., 1978 - Application de la géochimie des éléments en traces à l'étude des propriétés et des processus de genèse de la croûte océanique et du manteau supérieur. Bul. Soc. Géol. France, 7ème série, t.XX, N°4, p.521-531.
- JORON J.L., BOLLINGER C., QUISEFIT J.P., BOUGAULT H. et TREUIL M., in press - Trace elements in basalts at 25°N, old crust, in the Atlantic ocean : alteration, mantle and magmatic processes. In Initial reports of the Deep Sea Drilling Project, vol. 51, Washington (U.S. Government Printing Office).
- KAY R., HUBBARD N.J. and GAST P.W., 1970 - Chemical characteristics and origin of oceanic ridge volcanic rocks. J. Geophys. Res., 75, p. 1585-1613.
- KUSHIRO I., 1973 - Compositions of magmas formed by partial zone melting of the earth's upper mantle. J. Geophys. Res., 73 (2), p. 619-634.
- KUSHIRO I., 1973 - Origin of some magmas in oceanic and circum oceanic regions. Tectonophysics, 17, p. 211-222.
- LANGMUIR C.H., BENDER J.F., BENCE A.E., HANSON G.N. and TAYLOR S.R., 1977 - Petrogenesis of basalts from the FAMOUS area : mid-Atlantic Ridge. E.P.S.L., 36, p. 133-156.
- LEEMAN W.P., 1976 - Petrogenesis of Mc Kinney (Snake river) olivine tholeiite in light of rare-earth element and Cr/Ni distributions. Geol. Soc. Am. Bull., 87, p. 1582-1586.
- LEEMAN W.P. and SCHEIDEGGER K.F., 1977 - Olivine / liquid distribution coefficients and a test for crystal-liquid equilibrium. E.P.S.L., 35, p. 247-257.
- LE PICHON X., 1968 - Sea floor spreading and Continental Drift. J.G.R., 73, p. 3661-3697.
- LE DOURAN S., - 1979 - Caractéristiques structurales et géophysiques de la dorsale médio-atlantique de 10° à 50°N. Thèse de 3ème cycle et Doctorat Ingénieur "Géochimie, Pétrologie et Métallogénie". Ecole Nationale Supérieure de Géologie Appliquée et de Prospection Minière de Nancy. Université de Nancy I.
- LEWIS J., 1972 - Metal/Silicate fractionation in the solar system. EPSL, 15, 286-290.
- LOUBET M., 1976 - Géochimie des terres rares dans les massifs de péridotites dits de "haute température" : évolution du manteau terrestre. Thèse, Paris.
- MASON B. and GRAHAM A.L., 1970 - Minor and trace elements in meteorite minerals. Smithsonian Contrib. Earth Sci., 3, p. 1.
- MASON B., JAROSEVICH E. and NELEN J., 1971 - Transition element distribution in stony meteorites and in terrestrial and lunar rocks. Chem. Erde, 30, p. 259.

- MASUDA A., 1962 - Regularities in variation of relative abundances of lanthanide elements and an attempt to analyze separation-index patterns of some minerals. *J. Earth Sci. Nagoya Univ.*, 10, p. 173-187.
- MATSUI Y., ONUMA N., NAGASAWA H., HIGUCHI H. and BANNO S., 1977 - *Bull. Soc. Fr. Mineral. Cristallogr.*, 100, p. 315-324.
- MC.KENZIE D.P. and PARKER R.L., 1967 - The North Pacific: an example of a tectonics on a sphere. *Nature* 216, p1276-1280.
- MELSON W.G., THOMPSON G. and Van ANDEL T.H., 1968 - Volcanism and metamorphism in the mid-Atlantic Ridge, 22°N latitude. *J. Geophys. Res.*, 73, p. 5925-5941.
- MELSON W.G. and THOMPSON G., 1973 - Glassy abyssal basalts, Atlantic sea floor near St-Paul's rocks : petrography and composition of secondary clay minerals. *Geol. Soc. Am. Bull.* 84, p. 703-716.
- MELSON W.G., VALLIER T.L., WRIGHT T.L., BYERLY G. and NELEN J., 1976 - Chemical diversity of abyssal volcanic glass erupted along Pacific, Atlantic, and Indian Ocean sea-floor spreading centers ; in Sutton, G.H., Manghani M.H. and Moberly R., eds., *Geophysics of the Pacific Ocean Basin. Am. Geophys. Union Geophys. Mon.*, 19, p. 351-367.
- MINSTER J.F., MINSTER J.B., ALLEGRE C.J. and TREUIL M., 1977 - Systematic use of trace elements in igneous processes, II. Inverse problem of the fractional crystallization process in volcanic suites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 61, p. 49.
- MIYASHIRO A., SHIDO F. et EWING M., 1969 - Diversity and origin of abyssal tholeiites from the mid-Atlantic Ridge near 24° and 30° North latitude. *Contrib. Mineral. and Petrol.* 23, p. 38-52.
- MOCKEL J.R., 1969 - The structural petrology of the garnet peridotite of Alpe Arami (Ticino, Switzerland). *Leid Geol. Meded* 42, p. 61-130.
- MONTIGNY R., 1975 - Géochimie comparée des cortèges de roches océaniques et ophiolitiques, problèmes de leur genèse. Thèse d'Etat, Universités Paris VI et VII.
- MONTIGNY R., BOUGAULT H., BOTTINGA Y., and ALLEGRE C.J. 1973 - Trace element geochemistry and genesis of the Pindos ophiolite suite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol.37, p.2135-2147.
- MORGAN W.J., 1968 - Rises, Trenches, Great Faults and Crustal Blocks. *J. Geophys. Res.*, 73, p.1959-1982.
- MORGAN W.J., 1971 - Convection plumes in the lower mantle. *Nature*, 230, p. 42-43.
- MORGAN W.J., 1972 - Deep mantle convection plumes and plate motion. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 56, p. 203-213.
- MUIR I.D. and TILLEY C.E., 1964 - Basalts from the northern part of the rift zone of the mid-Atlantic Ridge. *J. Petrol.*, 5, p. 409-34.
- MUIR I.D. and TILLEY C.E., 1966 - Basalts from the northern part of the mid-Atlantic Ridge, II. The Atlantis collection near 30°N. *J. Petrol.*, 7,p. 193-201.

- MYSEN B.O., BOETTCHE A.L., 1975 - Melting of a hydrous mantle : II. Geochemistry of crystals and liquids formed by anatexis of mantle peridotite at high pressures and high temperatures as a function of controlled activities of water, hydrogen and carbon dioxide. *J. Petrol.*, 16, p. 549-593.
- MYSEN B., and KUSHIRO I., 1977 - Partitioning of Fe, Ni, Mg between metal, oxide and silicates in Allende meteorite in function of  $fO_2$ . *Annual Report Geophysical Lab. 1975-76*, p. 678-684.
- NEEDHAM H.D. and FRANCHETEAU J., 1974 - Some characteristics of the rift valley in the Atlantic Ocean near 36°48' North : *Earth and Planetary Sci. Letters*, 22, p. 29-43.
- NICHOLLS G.D., NALWALK A.J. and HAYS E.E., 1964 - The nature and composition of rock samples dredged from the mid-Atlantic Ridge between 22°N and 52°N. *Mar. Geol.*, 1, p. 333-343.
- NIXON P.H., 1973 - Lesotho kimberlites. Lesotho national development corporation.
- O'HARA M.J., 1977 - Geochemical evolution during fractional crystallisation of a periodically refilled magma chamber. *Nature*, 266, p. 503-507.
- OHNENSTETTER D. et OHNENSTETTER-CROCHEMORE M., 1975 - Le puzzle ophiolitique corse. Un bel exemple de paléo-dorsale océanique. *Thèses Nancy 1*.
- OLIVET J.L., 1978 - Nouveau modèle d'évolution de l'Atlantique nord et central. *Thèse d'Etat, Paris*, 234 p.
- O'NIONS R.K. and PANKHURST R.J., 1974 - Petrogenetic significance of isotope and trace element variations in volcanic rocks from the mid-Atlantic. *J. Petrol.*, 15, p. 603.
- O'NIONS R.K., PANKHURST R.J. and GRONVOLD , 1976 - Nature and development of basalt magma sources beneath Iceland and the Rey Kjanes Ridge. *J. Petrol.*, 17, p. 315-338.
- O'NIONS R.K. and PANKHURST R.J., 1977 - Sr isotope and rare earth element geochemistry of DSDP leg 37 basalts in *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project vol. 37*, Washington (U.S. Government Printing Office), p. 599-602.
- ONUMA N., HIOUCHI H., WAKITA H. and NAGASAWA H., 1968 - Trace element partition between two pyroxenes and the host lava. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 5, p. 47-51.
- ORGEL L.E., 1952 - The effects of crystal fields on the properties of the transition metal ions. *J. Chem. Soc.*, p. 4656-4761.
- ORGEL L.E., 1964 - *Chimie des éléments de transition*. Dunod, Paris.
- ORGEL L.E., 1966 - *An introduction to transition metal chemistry : organo-field. Theory* Methuen, London.
- PALME H., 1974 - Zerstörungsfreie Bestimmung einiger Spurenelemente in Mond und Meteoritenproben mit 14 MeV-Neutronen. In : Kiesl W., Mallissa J.H. (eds.) : *Analyse extraterrestrischer Materiale*. New-York : Springer-verlag.
- PEARCE J.A. et CANN J.R., 1971 - Ophiolite origin investigated by discriminant analysis using Ti, Zr, and Y. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 12, p. 339-349.
- PHILPOTTS J.A., SCHNEIZLER C.C., BOTTINO M.L., SCHUMANN S. and THOMAS H.H., 1972 - Luna 16 : Some Li, K, Rb, Sr, Ba, rare earth, Zr and Hf concentrations. *Earth Planet. Sci. Lett.* 13, p. 429-435.

- PITMAN W.C. and TALWANI M., 1972 - Plate tectonics, paleomagnetism and the opening of the Atlantic. *Geol. Soc. of America Bull.*, 83, p.1579-1600.
- PRESNALL D.C., DIXON J.R., O'DONNELL T.H. and DIXON S.A., 1979 - Generation of mid-Ocean Ridge tholeiites. *J. of Petrol.*, 20, part. 1, p. 3-35.
- RAYLEIGH J.W.S., 1896 - Theoretical considerations respecting the separation of gases by diffusion and similar processes. *Mhil. Mag.*, 42, p. 77-107.
- RENARD Y. et ALLENOU J.P., 1979 - *Internat. Hydrographic Rev. Monaco*, 56 (1), p. 35-67.
- RHODES J.M., BLANCHARD D.P., RODGERS K.V., JACOBS J.W. and BRANNON J.C., 1976 - Petrology and chemistry of basalts from the Nasca Plate, 2, Major and trace element chemistry in Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Leg 34, p. 239-244, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- RHODES J.M., DUNGAN M.A., BLANCHARD D.P. and LONG P.E., 1979 - Magma mixing at mid-Ocean Ridges: evidence from basalts drilled near 22°N on the mid-Atlantic Ridge. *Tectonophysics*.
- RICHARD P., SHIMEZU N. and ALLEGRE C.J., 1976 -  $^{143}\text{Nd}/^{146}\text{Nd}$ , a natural tracer : an application to oceanic basalts. *E.P.S.L.*, 31, p. 269-278.
- RINGWOOD A.E., 1955 - The principles governing trace element behaviour during magmatic crystallization. Part II: the role of complex formation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 7, p.242-254.
- RINGWOOD A.E. , 1966 - The chemical composition and origin of the earth, in Hurley P.M. ed., *Advances in earth science* : Cambridge, Mass., M.I.T. Press.
- ROEDER P.L. and EMSLIE R.F., 1970 - Olivine-liquid equilibrium. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 29, p. 275-289.
- SATO H., 1977 - Nickel content of basaltic magmas and a measure of the degree of olivine fractionation. *Lithos.*, 10, p. 113-120.
- SCHILLING J.G. and WINCHESTER J.W., 1967 - Rare earth fractionation and magmatic processes. In *Mantles of the earth and terrestrial planets*. (Ed. S.K. Runcorn) p.267-283. New York, Interscience.
- SCHILLING J.G., 1973a - Iceland mantle plumes : Geochemical evidence along Rey Kjanes Ridge. *Nature*, 242, p. 565-571.
- SCHILLING J.C., 1973b - Iceland mantle plume. *Nature*, 246, p. 141-143.
- SCHILLING J.G., 1975 - Azores mantle blob : Rare earth evidence : *Earth and Planetary Sci. Letters*, 25, p. 102-115.
- SCHILLING J.G., 1975 - Rare earth variations across "normal segments" of the Rey Kjanes Ridge, 60°-53°N, mid-Atlantic Ridge, 29°S, and East Pacific rise, 2°-19°S, and evidence on the composition of the underlying low-velocity layer. *J. Geophys. Res.* 80, p. 1459-1473.

- SCHILLING J.G., KINGSLEY R. and BERGERON M., 1977 - Rare earth abundances in DSDP site 332A, 332B, 334 and 335, and inferences on the Azores mantle blob activity with time. In Aumento F., Melson W.G. et al. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 37, U.S. Government Printing Office, Washington, p. 591-598.
- SCHMITT R.A., BINGHAM E. and CHODOS A., 1964 - Zirconium abundances in meteorites and implication of nucleosynthesis. *Geochim. Cosmochim. acta* 28, p. 1961.
- SCHNETZLER C.C. and PHILPOTTS J.A., 1968 - Partition coefficients of rare earth elements and barium between igneous matrix material and rock forming mineral phenocrysts. In *Origin and Distribution of the Elements*. (Editor L.H. Ahrens), p. 929-938.
- SCHNETZLER C.C. and PHILPOTTS J.A., 1970 - Partition coefficients of rare earths elements between igneous matrix material and rock forming mineral phenocryst, II. *Geochim. Cosmochim. Acta* 34, p. 331-340.
- SHAW D.M., 1970 - Trace element fractionation during anatexis. *Geochim. Cosmochim. Acta* 34, p. 237-243.
- SHIMA M., 1979 - The abundances of titanium, zirconium and hafnium in stony meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta* 43, p. 353-362.
- SHIMIZU N. and KUSHIRO I., 1975 - The partitioning of rare earth between garnet and liquid at high pressures : Preliminary experiments. *Geophys. Res. Lett.*, 2, p. 413-416.
- SIGVALDASON G.E., 1974 - Basalts from the centre of the assumed Icelandic mantle plume. *J. Petrol.*, 15, p. 497-524.
- SIGVALDASON G.E., STEINTHORSSON S., IMSLAND P. and OSKARSSON N., 1976 - The simultaneous production of basalts enriched and depleted in large lithophile trace ions (LIL) within the same fissure swarms in Iceland. *Bull. Soc. Geol. Fr.*, 18, p. 863-867.
- SUESS H.E. and UREY H.C., 1956 - Abundances of the elements. *Rev. Mod. Phys.*, 28, p.63-74.
- SUN S.S. and HANSON G.N., 1975 - Origin of Ross Island basanitoids and limitations upon the heterogeneity of mantle sources for alkali basalts and nephelinites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 52, p. 77-106.
- SUN S.S. and NESBITT R.W., 1977 - Chemical heterogeneity of the archaic mantle composition of the earth and mantle evolution. *E.P.S.L.* 35, p. 429-448.
- SUN S.S., NESBITT R.W. and SHARASKIN A.Y., 1979 - Geochemical characteristics of mid-Ocean Ridge basalts. *E.P.S.L.*
- TAKAHASHI E., 1978 - Partitioning of Ni<sup>+</sup>, Co<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> between olivine and silicate melts : compositional dependence of partition coefficient. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42, p. 1829-1844.
- TATSUMOTO M., 1966.- Genetic relations of oceanic basalts as indicated by lead isotopes. *Science* 153, p.1094-1101.
- TAYLOR S.R., MAUREEN K., WHITE A.J.R., DUNCAN A.R. et EWART A., 1969 - Genetic significance of Co, Cr, Ni, Sc and V content of andesites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 33, p. 275-286.

- TAYLOR S.R., KAYE M. WHITE A.J.R., DUNCAN A.R. and A. EWART A., 1969 - Genetic significance of Co, Cr, Ni, Sc and V content of andesites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 33, p. 275-286.
- TREUIL M., 1973 - Critères pétrologiques, géochimiques et structuraux de la genèse et de la différenciation des magmas basaltiques : exemple de l'Afar. Thèse, Université d'Orléans.
- TREUIL M., et VARET J., 1973 - Critères volcanologiques, pétrologiques et géochimiques de la genèse et de la différenciation des magmas basaltiques: exemple de l'Afar. *Bull.Soc. Géol. France*, 7ème série, t.XV, p.506-540.
- TREUIL M. et JORON J.L., 1975 - Utilisation des éléments hygromagmatophiles pour la simplification de la modélisation quantitative des processus magmatiques. Exemples de l'Afar et de la dorsale médio-atlantique. *Soc. Ital. Mineral. Petrol.*- Milano, Vol.XXXI, p.125-174.
- TREUIL M., JORON J.L., JAFFREZIC H., et VILLEMANT B., et CALAS G., 1979 - Géochimie des éléments hygromagmatophiles, coefficients de partage minéraux/liquides et propriétés structurales de ces éléments dans les liquides magmatiques. *Bull. Mineral.*, 102, p.402-409.
- VILLEMANT B., JORON J.L., JAFFREZIC H., TREUIL M., MAURY R., et BROUSSE R., sous presse - Cristallisation fractionnée d'un magma basaltique alcalin: la série de la chaîne des Puys (Massif Central), II: Géochimie. *Bull. Mineral.*
- UREY H.C., 1967 - The abundances of the elements with special reference to the problem of iron abundance. *Quart. J. Roy. Astron. Soc.*, 8, p.23-47.
- VINE F.J. and MATTHEWS O.H., 1963 - Magnetic anomalies over oceanic ridges. *Nature*, 199, p. 947-949.
- WALKER K.R., 1969 - The Palisades sill, New Jersey : a reinvestigation. *Geol. Soc. Am. Special paper*, III, p. 178.
- WEGENER AK, 1912 - Die Entstehung der Kontinente. *Petermanns mitteilungen* , p. 185-195, 253-256, 305-309.
- WHITE W.M., SCHILLING J.G. and HART S.R., 1976 - Evidence for the Azores mantle plume from strontium isotope geochemistry of the Central North Atlantic. *Nature*, 263, p. 659-663.
- WHITE W.R. and BRYAN W.B., 1977 - Strontium isotope, K, Rb, Cs, Sr, Ba and rare-earth geochemistry of basalts from the FAMOUS area. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 88, p. 571-576.
- WHITE W.M. and SCHILLING J.G., 1978 - The nature and origin of geochemical variation in mid-Atlantic Ridge basalts from the central north Atlantic. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42, p. 1501-1516.
- WILLIAMS R.J.P., 1959 - Deposition of trace elements in basic magma. *Nature*, 184, p. 44.
- WOOD D.A., 1976 - Spatial and temporal variations in the trace element geochemistry of the eastern Iceland flood basalt succession. *J. Geophys. Res.*, 81, p. 4353-4360.
- WOOD D.A., TARNEY J., VARET J., SAUNDERS A.A., BOUGAULT H., JORON J.L., TREUIL M. and CANN J., 1979 - Geochemistry of basalts drilled in the north Atlantic by IPOD Leg 49 : implications for mantle heterogeneity. *E.P.S.L.*, 42, p. 77-97.

## CHAPITRE VI

---

### SPECTROMÉTRIE DE FLUORESCENCE X

#### ÉLÉMENTS TRACES DANS LES ROCHES

Il ne s'agit pas dans ce chapitre de traiter de la spectrométrie de fluorescence X en général, de son principe, de son instrumentation et de la plupart de ses applications... Il faudrait y consacrer un développement qui sortirait du cadre de ce mémoire. Pour cet aspect général, on pourra consulter par exemple Bertin (1970) ou Liebhafsky et al., (1971).

Ce chapitre est consacré à l'analyse des éléments traces dans les roches; l'analyse des éléments majeurs y est mentionnée, avec quelques références bibliographiques. L'analyse des éléments traces n'est pas traitée dans les ouvrages généraux mais seulement dans des revues spécialisées. Aussi, pour le lecteur non-spécialiste, ai-je consacré trois paragraphes pour donner les éléments nécessaires à la bonne compréhension de la méthode proposée.

Le calcul de l'"effet de matrice" pour l'analyse des éléments traces à partir des poudres suppose connue la composition en éléments majeurs de l'échantillon: ce n'est pas à mon sens une restriction, les échantillons auxquels on s'intéresse pour l'étude des éléments traces devant nécessairement être connus du point de vue pétrographie et composition en éléments majeurs. D'autres méthodes permettent l'évaluation de l'effet de matrice sans supposer connue la composition en éléments majeurs - méthodes du bruit de fond ou des raies diffusées -. Par contre, la méthode proposée pour tenir compte des interférences instrumentales ou "blanc instrumental" est unique; elle permet, par extension, la détermination précise d'une concentration à partir de la simple mesure d'un "pic brut", c'est à dire sans mesure et déduction du bruit de fond dû au "fond continu" du tube.

La spectrométrie de fluorescence X a été choisie pour équiper un conteneur de géochimie "embarquable". Ce conteneur, utilisé pour la première fois en 1972 à bord du navire océa-

nographique J. Charcot pendant la campagne "GIBRACO", a été utilisé à ce jour pendant 10 legs croûte océanique du Glomar Challenger dans le cadre du programme de forages profonds Deep Sea Drilling Project - International Phase for Ocean Drilling. Ce conteneur, grâce à une action CNEOX, DGRST et CNRS, a permis une participation française accrue pendant les legs croûte océanique du Glomar Challenger, surtout au début et avant la phase I.P.O.D. Quelques résultats donnés à titre d'exemples ont été choisis parmi les résultats obtenus à bord.

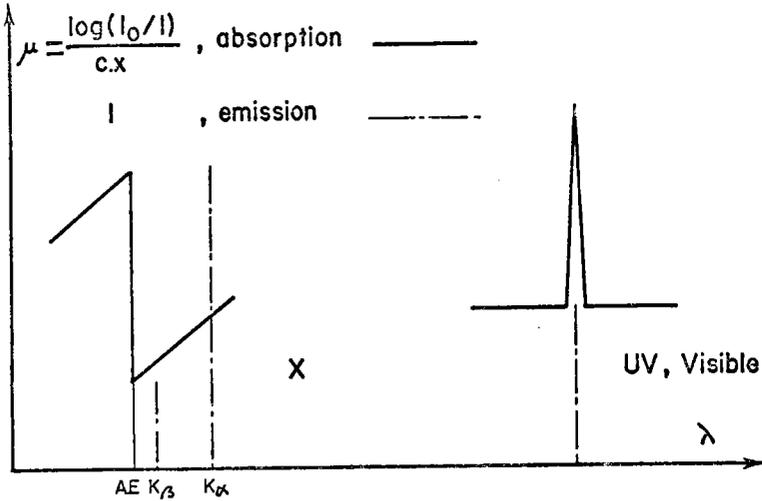


Figure VI.1: Emission absorption; différence entre spectrométrie X et spectrométrie optique.

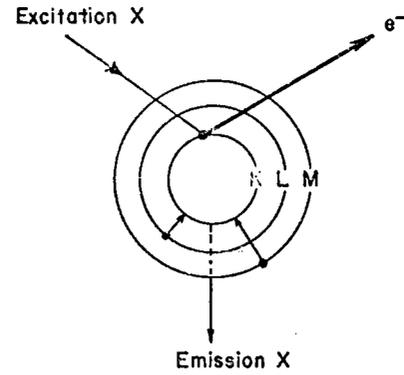


Figure VI.2: Effet photo-électrique, réarrangement électronique et émission X.

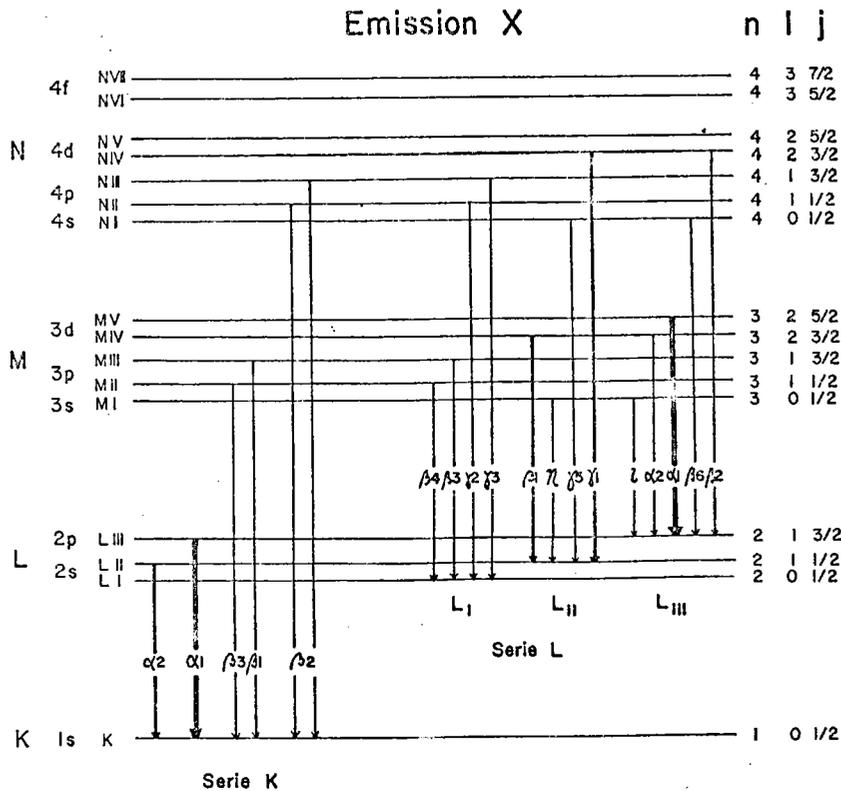


Figure VI.3: Emissions possibles dues aux transitions électroniques possibles entre couches N et K suivant les règles de sélection.

## 1- EMISSION X

-----

Une différence fondamentale existe entre spectrométrie X et spectrométrie optique, du point de vue émission-absorption; cette différence résulte de l'observation suivante :

- la spectrométrie X s'intéresse aux couches électroniques internes de l'atome,
- la spectrométrie optique s'intéresse aux couches externes.

En optique, visible, proche infra-rouge et ultra-violet, émission et absorption interviennent à la même longueur d'onde (fig.1). Dans le domaine des X, l'absorption croît avec la longueur d'onde; pour un élément donné cette absorption chute brutalement à une longueur d'onde qu'on appelle discontinuité d'absorption (Absorption Edge : A.E.), puis l'absorption croît de nouveau (fig.1). A cette absorption correspondent plusieurs émissions (fig.1) de longueur d'onde plus grande que celle de la discontinuité d'absorption.

## 1-A- DISCONTINUITÉ D'ABSORPTION ET EMISSION - REGLES DE SÉLECTION -.

L'un des effets fondamentaux susceptible de se produire lors de l'interaction d'un photon avec un atome est l'effet photo-électrique; si l'énergie du photon incident est suffisante (supérieure ou égale à l'énergie de liaison de l'électron dans l'atome), il peut donner lieu à l'extraction d'un électron (de la couche K par exemple, fig.2). Cet effet correspond à la discontinuité d'absorption observée fig.1. L'atome se trouve dans un état instable et va retrouver sa stabilité par un réarrangement de sa structure électronique; un électron de la couche M ou de la couche L (fig.2) peut venir prendre la place vacante de la couche K; ce retour à un état plus stable s'accompagne d'une émission X d'énergie correspondante à la différence d'énergie de liaison de la couche K et de la couche M (ou L).

N'importe quel électron d'une couche périphérique ne peut pas venir prendre la place vacante; le retour à un état plus stable est gouverné par les "règles de sélection" qui limitent en conséquence le nombre d'émissions X d'énergies différentes d'un élément donné.

L'électron d'un atome peut être caractérisé par trois nombres quantiques :

$n$  : nombre quantique principal, correspondant au numéro de la couche électronique à laquelle appartient l'électron ( $n=1$ , couche K;  $n=2$ , couche L ...).

$l$  : nombre quantique secondaire;  $0 < l < n-1$

$J$  : nombre quantique interne; il tient compte du spin de l'électron  $J = l \pm \frac{1}{2}$

Les règles de sélection permettant à un électron d'une couche externe de remplir une place vacante sur une couche interne s'expriment de la façon suivante :

$$\Delta n \neq 0 ; \quad \Delta l = \pm 1 ; \quad \Delta J = \pm 1 \text{ ou } 0.$$

A titre d'exemple la figure 3 permet de recenser les différentes raies X émises par un élément correspondant à des transitions électroniques entre la couche N et la couche K.

Les notations des différentes raies sont les suivantes :

exemples : Ni  $K\alpha_1$  , Au  $L\beta_2$ .

Le premier symbole correspond à l'élément émetteur;

le deuxième symbole est relatif à la couche électronique où est "retombé" l'électron;

le troisième symbole, lettre grecque indicée ( $\alpha_1$ ,  $\beta_2$ ) indique une raie particulière de la série (K ou L).

La raie  $\alpha_1$  est généralement la plus intense;  $\alpha$  est utilisé pour une transition  $\Delta n = 1$ ; les notations  $\beta$ ,  $\gamma$  ne font pas l'objet d'une nomenclature systématique; en général, l'intensité des raies décroît de  $\alpha$  à  $\beta$  à  $\gamma$  et suivant les indices 1, 2, 3 ...; différentes valeurs de  $\Delta n$  peuvent correspondre à  $\beta$  ou  $\gamma$ .

La notion d'intensité à laquelle on se réfère ici correspond à un nombre de photons observés en un temps donné; ceci n'a bien entendu rien à voir avec la notion d'énergie correspondant à une raie. La raie  $K\beta_1$  (fig.3) est plus "énergique" que la raie  $K\alpha_1$ , mais la raie  $K\alpha_1$  est plus "intense" que la raie  $K\beta_1$ . La notion d'énergie (donc la longueur d'onde correspondante) correspond à une différence d'énergie de liaison entre les niveaux d'énergie impliqués; la notion d'intensité correspond à une notion de probabilité de transition d'un électron d'un niveau d'énergie à un autre.

En général, dans le domaine de l'analyse des roches, on s'intéresse aux émissions  $K\alpha$  quelquefois  $K\beta$ , plus rarement aux émissions L.

#### 1-B- CALCUL DES ENERGIES X (OU LONGUEURS D'ONDE) - LOI DE MOSELEY -.

En supposant un modèle simple, l'électron se déplaçant suivant une orbite circulaire l'énergie potentielle de l'électron est égale au signe près au travail nécessaire pour amener l'électron depuis l'infini (potentiel 0) à la distance du noyau :

$$\text{potentiel} = \frac{Z|e|}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$W_p = - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (1)$$

Z : numéro atomique

e : charge de l'électron

$\epsilon_0$  : permittivité du vide

r : rayon de l'orbite

L'énergie cinétique  $W_c = \frac{1}{2} mv^2$  de l'électron se trouve facilement en écrivant l'équilibre force électro statique - force à accélération centrale  $\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{mv^2}{r}$  ( $m$  : masse de l'électron,  $v$  : vitesse de l'électron) permettant d'exprimer  $W_c$  en fonction des paramètres de l'atome  $Z$  et  $R$ .

$$W_c = -\frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r} \quad (2)$$

L'énergie totale de l'électron,  $W_c = W_p + W_c$  est donc :

$$W_c = -\frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r} \quad (3)$$

En introduisant le postulat de Sommerfield,

$$mv = n \frac{h}{2\pi r} \quad \begin{array}{l} h : \text{constante de Planck.} \\ n : \text{nombre entier} \end{array}$$

et en combinant avec l'expression de l'énergie cinétique, on obtient :

$$r = \frac{h^2 \epsilon_0}{Ze^2 m \pi^2} n^2 \quad (4)$$

En tenant compte de la valeur de  $r$  obtenue en 4, on obtient l'expression suivante de l'énergie de l'électron liée à la couche " $n$ " à partir de (3).

$$W_c = -\frac{Z^2 e^4 m}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2} \quad (5)$$

L'énergie  $h\nu$  ( $\nu$ , fréquence) du photon émis lorsqu'un électron passe de la couche  $n_2$  à une couche  $n_1$  est :

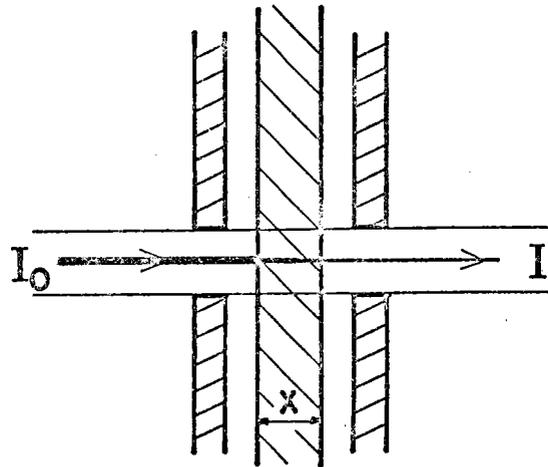
$$h\nu = \frac{Z^2 e^4 m}{8\epsilon_0 h^2} \left[ \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right] \quad (6)$$

Cette expression donne une première idée de l'énergie associée à un photon émis par un élément de numéro atomique  $Z$  lorsqu'un électron passe d'une couche  $n_2$  à une couche  $n_1$ . Une expression plus rigoureuse devrait tenir compte des autres nombres quantiques et de la "masse réduite" plutôt que de la masse de l'électron proprement dite.

La loi de Moseley, obtenue à partir de la relation 6 s'exprime de la façon suivante:

$$\sqrt{\nu} = a (Z - \beta) \quad a^2 = \frac{e^4 m}{8\epsilon_0^2 h^3} \left[ \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right]$$

La constante  $\beta$  "constante d'écran" est introduite pour tenir compte de l'influence des autres électrons.



$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

Figure VI.4: Absorption d'un faisceau X parallèle.

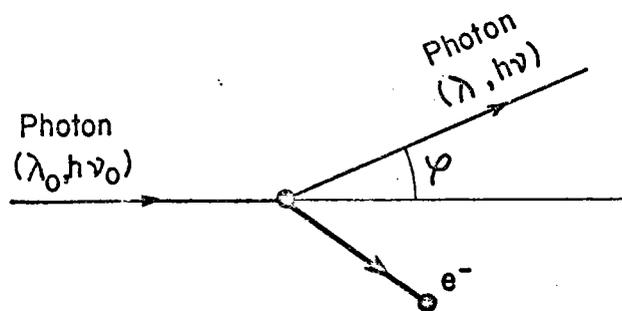


Figure VI.5: Effet Compton.

## 2- ABSORPTION X : INTERACTION PHOTON-MATIERE

-----

Après passage dans un matériau de masse volumique  $\rho$  et d'épaisseur  $x$ , l'intensité  $I$  d'un faisceau de rayons X parallèles est reliée à son intensité initiale  $I_0$  (avant absorption) par la relation :

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (7)$$

dans laquelle  $\mu$  est le coefficient d'absorption du matériau vis à vis du rayonnement X considéré (fig.4).  $\mu$  est homogène à  $L^{-1}$ . Plutôt que d'utiliser ce coefficient  $\mu$ , on utilise habituellement le coefficient  $\mu/\rho$  "coefficient d'absorption massique" d'un élément, homogène à  $M^{-1} L^2$ ; ce coefficient est indépendant de l'état de "compacité" de la matière. Le coefficient d'absorption massique d'un composé ou d'un mélange peut être calculé à partir de la composition du produit.

$$\mu/\rho = \sum (\mu/\rho)_i P_i \quad (8)$$

$(\mu/\rho)_i$  étant le coefficient d'absorption massique et  $P_i$  la proportion de l'élément  $i$  dans le produit. La relation (7) s'écrit donc sous la forme :

$$I = I_0 e^{- (\mu/\rho) \rho x} \quad (9)$$

Dans les tables courantes,  $\mu/\rho$  est exprimé en  $cm^2 g^{-1}$ .

### 2-A- LE PHENOMENE ABSORPTION -.

Le coefficient d'absorption précédemment défini est un coefficient d'absorption global résultant de plusieurs effets.

- L'effet photo-électrique (coefficient  $\tau/\rho$ ) correspondant à l'extraction d'un électron.

- L'effet de dispersion ( $\sigma/\rho$ ) rendant compte à la fois de l'effet Compton et des chocs élastiques des photons. Le choc élastique (dispersion cohérente) conduit à un changement de direction du photon X, sans perte d'énergie.

- L'effet Compton (collision d'un photon X avec un électron "libre") conduit à un changement de direction avec perte d'énergie du photon (fig.5). La relation qui existe du point de vue longueur d'onde ( $\Delta\lambda$ ) entre photon incident et photon dévié de l'angle  $\phi$  est :

$$\lambda - \lambda_0 = \Delta\lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \phi) \quad (10)$$

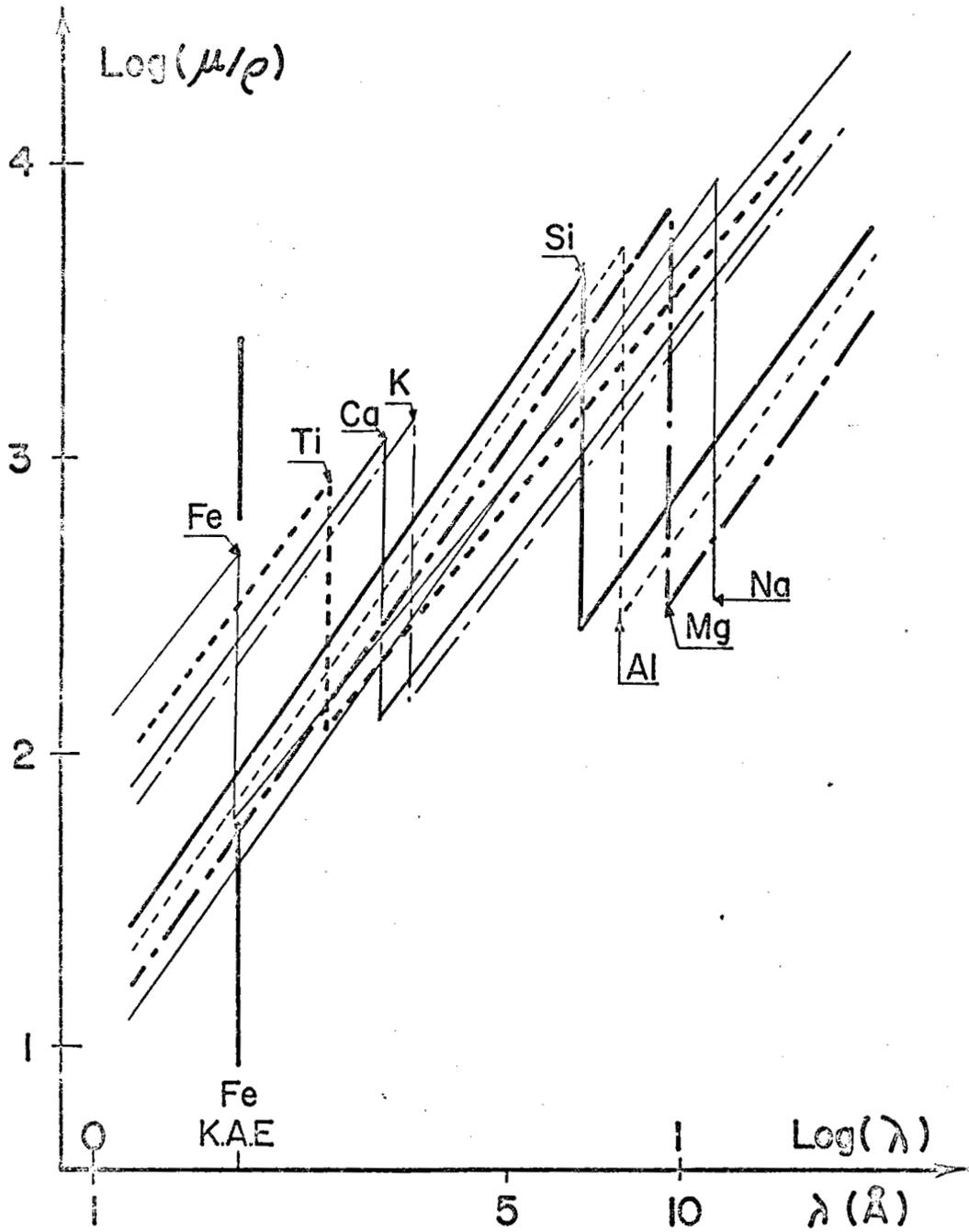


Figure VI.6:  $\log(\mu/\rho) = f(\log(\lambda))$  : variation des coefficients d'absorption massique des éléments constitutifs des roches en fonction de la longueur d'onde.

- La production de paire d'électrons; un photon passant très près du noyau peut libérer son énergie sous la forme d'un électron ( $e^-$ ) et d'un positron ( $e^+$ ).

- La production d'électrons Auger; cet effet fait suite à l'absorption photo-électrique; le réarrangement de l'atome se fait de telle sorte qu'au lieu de libérer son énergie sous la forme d'un photon X, l'atome la libère sous la forme d'un "photo-électron".

Dans le domaine qui nous intéresse en fluorescence X, les deux derniers effets sont mentionnés pour mémoire. Seuls interviennent sur le plan absorption et coefficients d'absorption, les deux premiers effets : effet photo-électrique et dispersion (cohérente et incohérente). L'effet de dispersion est d'autant plus important - vis à vis de l'effet photo-électrique - qu'on considère des atomes légers.

## 2-B- VARIATION DU COEFFICIENT D'ABSORPTION $\mu/\rho$ EN FONCTION DE LA LONGUEUR D'ONDE -.

La figure 1, montrée précédemment, mettait en évidence la différence fondamentale qui existe entre absorption en optique et dans le domaine des X, et la notion fondamentale de discontinuité d'absorption correspondant à l'effet photo-électrique pour un rayonnement X.

La figure 6 présente la variation de  $\mu/\rho$ ,  $\log(\mu/\rho)$  en fonction de  $\log(\lambda)$  pour les principaux éléments constitutifs des roches, depuis le sodium jusqu'au fer.

En raisonnant en énergie croissante (longueur d'onde décroissante), considérant un élément,  $\mu/\rho$  décroît jusqu'à une discontinuité d'absorption (A.E. absorption Edge); quand l'énergie d'un photon atteint cette valeur, le photon est capable d'extraire un électron dont l'énergie de liaison correspond à la longueur d'onde A.E. (effet photo-électrique); il s'en suit une diminution importante de l'intensité du faisceau X qui traverse la matière traduit par une discontinuité de  $\mu/\rho$  en fonction de  $\lambda$ .

Pour un élément  $i$ , entre deux discontinuités d'absorption, la figure 6 montre que  $\log(\mu/\rho)$  peut s'exprimer par une relation linéaire en fonction de  $\log \lambda$ .

$$\log(\mu/\rho)_i = \gamma \log \lambda + \delta_i$$

ou bien :

$$(\mu/\rho)_i = \delta_i \lambda^\gamma \quad (11)$$

$\gamma$  étant voisin de 3.

D'après la figure 6, on voit tout l'intérêt qu'il y a à bien connaître la ou les longueurs d'onde auxquelles on s'intéresse pour calculer un coefficient d'absorption massique pour une roche; en effet, compte tenu de toutes les discontinuités d'absorption, suivant que cette longueur d'onde se place d'un côté ou de l'autre d'une discontinuité, les valeurs relatives des coefficients d'absorption des éléments constitutifs de l'échantillon changent les uns vis à vis des autres.

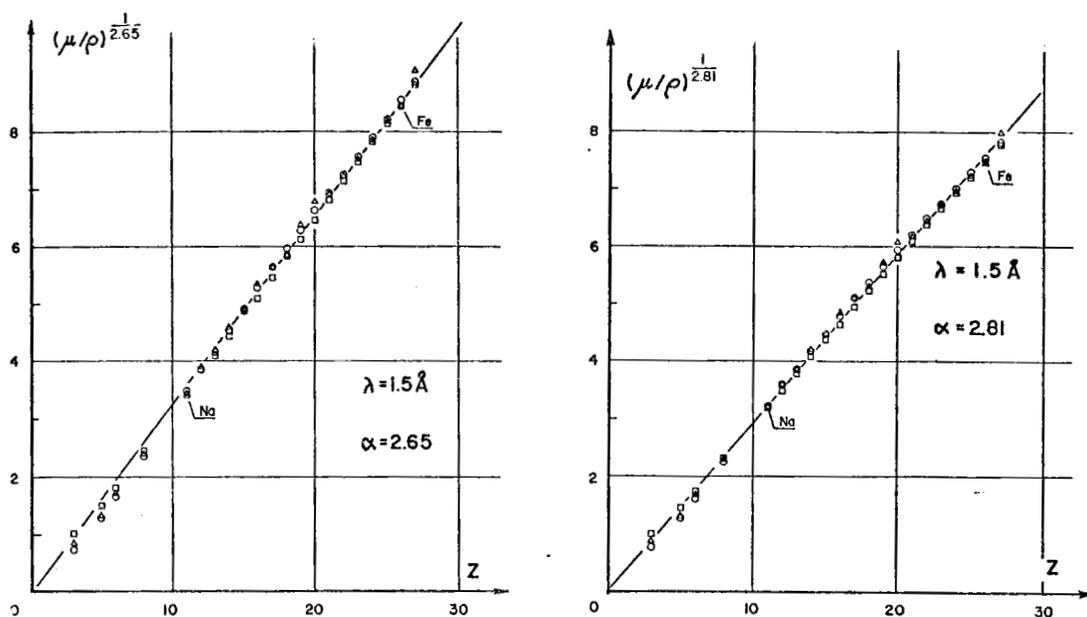


Figure VI.7:  $\mu/\rho = Z^\alpha$  : variation de  $\mu/\rho$  en fonction du numéro atomique, jusque  $Z = 27$ , Fe; éléments majeurs des roches, pour  $\lambda = 1.5 \text{ \AA}$

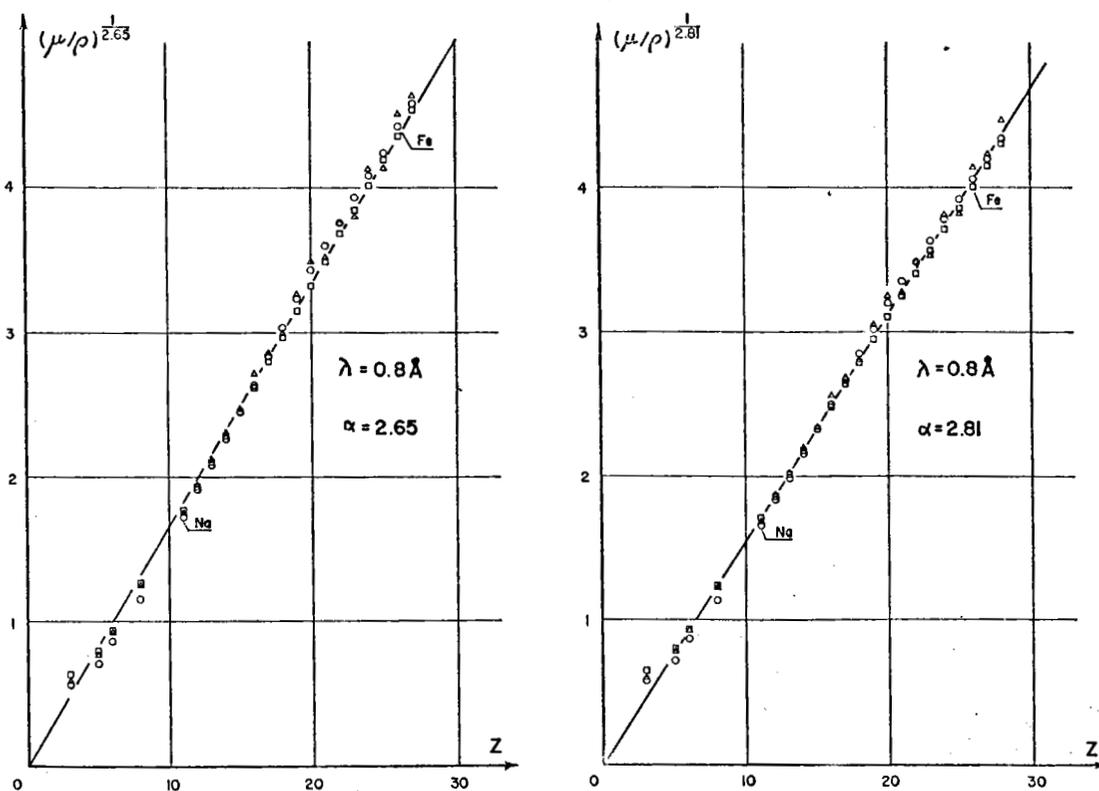


Figure VI.8: mêmes informations que figure VI.7, pour  $\lambda = 0.8 \text{ \AA}$ .

$$\mu/\rho = \beta Z^\alpha$$

## 2-C- VARIATION DES COEFFICIENTS D'ABSORPTION $\mu/\rho$ EN FONCTION DU NUMERO ATOMIQUE Z - CAS PARTICULIER DES ROCHES POUR $\lambda < \text{Fe K A.E.}$

En général, pour une longueur d'onde donnée, plus l'élément absorbant est lourd (Z élevé) plus  $\mu/\rho$  est élevé; néanmoins, du fait des discontinuités d'absorption cette affirmation est loin d'être vérifiée pour toute longueur d'onde.

Lorsqu'on considère les raies de longueur d'onde inférieures à Fe KA.E. (par exemple les raies  $K\alpha$  et  $K\beta$  des éléments de numéros atomiques supérieurs à 27, Fer), il n'y a plus pour les roches de discontinuités d'absorption (dûes aux éléments majeurs).

Bien que le coefficient d'absorption soit essentiellement la somme de deux termes (correspondant à l'effet photo-électrique et à la diffusion) dont la contribution de l'un varie par rapport à l'autre avec le numéro atomique, le coefficient d'absorption global dans le cas particulier des roches et pour  $\lambda < \text{Fe KA.E.}$  suit-il une loi simple ? Toutes les tables sont établies en se servant de lois semi-empiriques pour effectuer des interpolations (exemple :  $\mu/\rho = C E_{ab} \lambda^n$ ) utilisées par Leroux et Thinh pour la relation  $\mu/\rho = f(\lambda)$ , C étant une constante propre à chaque élément et  $E_{ab}$  l'énergie correspondant à une discontinuité d'absorption. On se propose de montrer qu'une loi de la forme

$$\mu/\rho = \beta Z^\alpha \quad (12)$$

est valide pour les éléments majeurs constitutifs des roches pour  $\lambda < \text{Fe KA.E.}$

Une régression simple montre qu'une telle loi permet d'obtenir, suivant les tables, Leroux et Thinh 1977, Jenkins and de Vries 1970, Liebhafsky 1971, des coefficients de corrélation d'au moins 0,99 et quelquefois meilleurs que 0,999; les valeurs de  $\alpha$  trouvées sont comprises entre 2,65 et 3. Les figures 7 et 8 montrent  $(\mu/\rho)^{1/\alpha}$  en fonction de Z pour deux valeurs de  $\alpha$  (2,81 et 2,65) et pour deux longueurs d'onde différentes 0,8 et 1,5 Å. On peut donc considérer que la relation 12 permet de s'affranchir de telle ou telle table particulière pour l'analyse des roches et pour des longueurs d'onde inférieures à la longueur d'onde correspondant à la discontinuité d'absorption K du Fe, 1,743 Å.

## 3- SPECTROMETRIE DE FLUORESCENCE X

---

### 3-A- EXCITATION

L'émission X d'un élément contenu dans un échantillon peut être produite par le bombardement de cet échantillon par des particules diverses (photons X, électrons,  $\alpha$ , protons,...) pourvu que la particule incidente ait une énergie plus grande que celle d'une discontinuité d'absorption de l'élément. Ce qui suit traite plus particulièrement de la fluorescence X, c'est

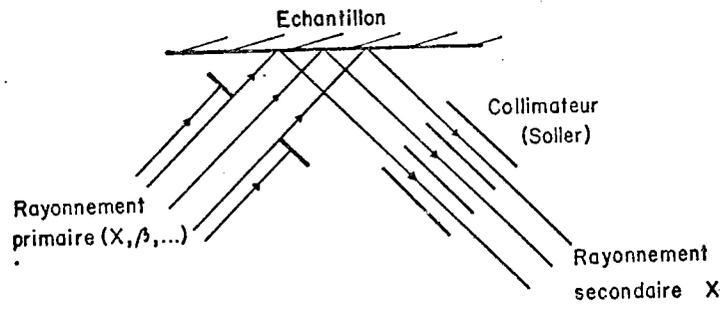


Figure VI.9: Excitation, émission X d'un échantillon.

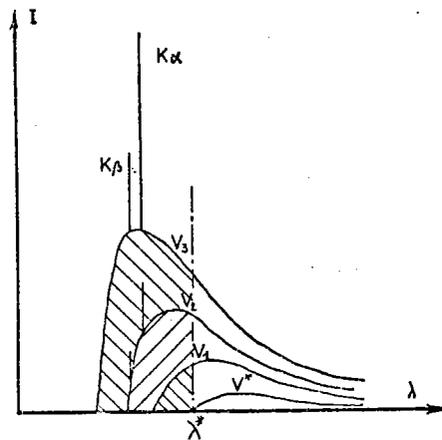


Figure VI.10: Spectre d'un tube X émis suivant différents potentiels  $V^*$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ .

à-dire de l'émission X provoquée par un bombardement X. En spectrométrie de fluorescence X dite "classique", le rayonnement excitant ou rayonnement primaire est obtenu à partir d'un tube à Rayons X. Une cible ou "anticathode" est bombardée par des électrons qui produisent le rayonnement X primaire; cette cible est en général constituée d'un métal pur.

Deux phénomènes contribuent à la production du rayonnement primaire :

- le "freinage" des électrons dans l'anticathode qui donne lieu au rayonnement de freinage, polychromatique, aussi appelé le fond continu du tube;
- l'effet photo-électrique : si les électrons ont une énergie plus grande que l'énergie de liaison de certains électrons du métal constituant l'anticathode, les émissions X correspondantes ont lieu.

Rayonnement primaire et rayonnement émis sont schématisés figure 9 : le rayonnement de fluorescence émis est observé dans une certaine direction grâce à l'emploi d'un collimateur (fentes de Soller).

Le rayonnement primaire est caractérisé par son fond continu sur lequel se surimposent les raies caractéristiques de l'anticathode (fig.10). Soit  $\lambda^*$  la longueur d'onde correspondant à la discontinuité d'absorption des raies de l'élément qu'on se propose d'analyser; seule la partie du spectre correspondant à des longueurs d'onde inférieures à  $\lambda^*$  sera efficace. La figure 10 montre que pour obtenir une bonne excitation, il est nécessaire d'utiliser une différence de potentiel V nettement supérieure à celle qui correspondrait à l'énergie eV\* correspondant à  $\lambda^*$  ; l'intensité du rayonnement primaire utilisable (correspondant à  $\lambda < \lambda^*$ ) devient en effet plus importante (fig.10), y compris l'intensité correspondante aux raies du tube.

A la remarque suivant laquelle seule la partie du spectre correspondant à des longueurs d'onde inférieures à  $\lambda^*$  est efficace, correspond la notion de "longueur d'onde équivalente"; c'est la longueur d'onde d'un rayonnement monochromatique qui produirait la fluorescence X d'un élément donné dans un échantillon donné avec la même intensité que le ferait l'excitation par le rayonnement polychromatique du tube considéré (Tertian et Vié Le Sage, 1976).

La meilleure excitation sera assurée en utilisant un tube dont l'anticathode émet une raie de longueur d'onde inférieure à  $\lambda^*$  (et proche de  $\lambda^*$ ).

### 3-B- SPECTRE OBTENU APRES EXCITATION DE L'ECHANTILLON -.

Le spectre obtenu après excitation d'un échantillon est constitué de deux ensembles :

- un ensemble caractéristique de l'échantillon composé des différentes raies émises par les éléments présents dans l'échantillon;
- un ensemble correspondant au tube : par chocs élastiques ou inélastiques sur l'échantillon, le porte échantillon et plus généralement sur toute partie de l'instrument se trouvant sur le trajet du faisceau X, le système observe des photons provenant du tube.

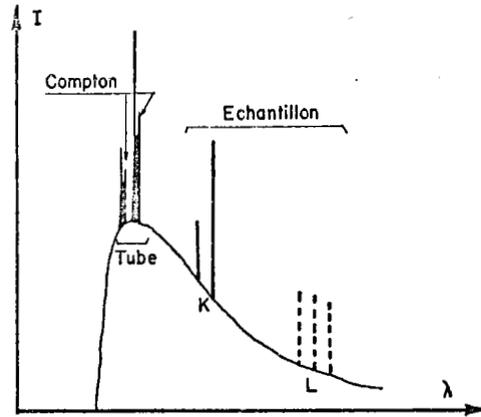


Figure VI.11: Spectre observé après excitation de l'échantillon.

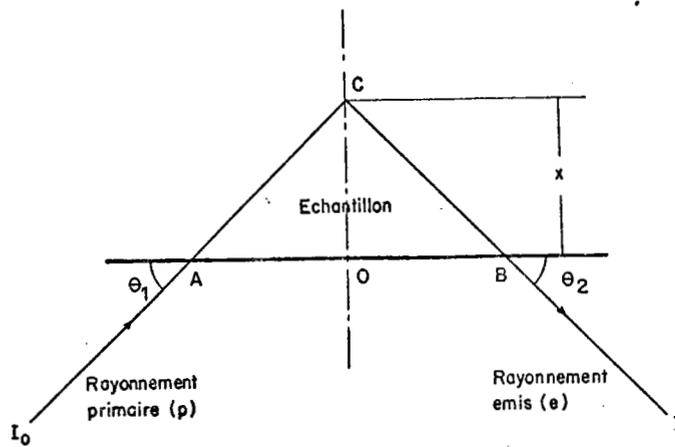


Figure VI.12: Géométrie rayonnement primaire, rayonnement émis.

La diffusion par choc élastique donne une image du spectre du tube - fond continu et raies caractéristiques -.

La diffusion inélastique (effet Compton) fournit pour un rayonnement de longueur  $\lambda$  provenant du tube, un rayonnement de longueur d'onde  $\lambda + \Delta\lambda$ ,  $\Delta\lambda$  étant donné par la relation 10 (fig.5);  $\Delta\lambda$  étant exprimé en Å.

$$\Delta\lambda = 0,0243 (1 - \cos \phi)$$

Dans les spectromètres courants, l'angle entre le rayonnement primaire (excitation) et la direction d'observation de l'échantillon est de l'ordre de  $90^\circ$ ; en conséquence,  $\Delta\lambda = 0,0243 \text{ \AA}$ . Associés aux raies caractéristiques de l'anticathode, on observe donc des "Pics Compton" distants de  $\Delta\lambda$  des raies auxquelles ils correspondent (fig.11). La diffusion Compton contribue également à la formation du fond continu : à une longueur d'onde donnée, le détecteur observe des photons diffusés par choc élastique ( $\lambda$ ) ainsi que des photons Compton initialement de longueur d'onde ( $\lambda - \Delta\lambda$ ) dans le rayonnement primaire. Le spectre obtenu après excitation de l'échantillon est schématisé figure 11 : fond continu (choc élastique et inélastique), raies caractéristiques du tube (choc élastique), Pics Compton (choc inélastique) et raies émises par l'échantillon.

Il est à noter que la largeur du pic Compton est plus grande que celle du pic Rayleigh (choc élastique). L'intensité d'un pic Compton par rapport à un pic Rayleigh décroît quand le numéro atomique de l'élément responsable de la diffusion croît.

### 3-C- INTENSITE DE FLUORESCENCE

Les trajets des rayonnements primaires et émis sont schématisés figure 12 : le pinceau primaire irradie l'échantillon sous un angle  $\theta_1$ ; le système de détection examine le rayonnement émis sous un angle  $\theta_2$ ; on considère un élément de l'échantillon émettant un rayonnement de fluorescence en C : le rayonnement primaire parcourt la distance AC de l'échantillon, le rayonnement émis AB. Le point C se trouve à une profondeur  $x$  dans l'échantillon.

$(\mu/\rho)_p$  étant le coefficient d'absorption massique du rayonnement primaire dans l'échantillon,  $\rho$  la masse volumique de l'échantillon, si  $I_0$  est l'intensité initiale du rayonnement primaire, l'intensité du rayonnement primaire disponible en C, après absorption pendant le trajet AC est :

$$I_0 e^{- (\mu/\rho)_p \rho \frac{x}{\sin.\theta_1}}$$

En C se produit l'effet photo-électrique responsable de l'émission X : l'intensité du rayonnement émis par l'élément de volume situé en C, est :

$$K I_0 \tau e^{- (\mu/\rho)_p \rho \frac{x}{\sin.\theta_1}}$$

$\tau$  étant la concentration de l'élément responsable du rayonnement émis considéré (par unité de volume :  $ML^{-3}$ ).

$K$  est une constante d'excitation correspondant à une notion de probabilité (analogue à la notion de section efficace).

Soit  $(\mu/\rho)_e$  le coefficient d'absorption du rayonnement émis, après le trajet AB dans l'échantillon, l'intensité  $dI$  du rayonnement émis par l'élément de volume situé en C est :

$$dI = KI_0 \tau e^{-\left[\frac{(\mu/\rho)_p}{\sin.\theta_1} + \frac{(\mu/\rho)_e}{\sin.\theta_2}\right] \rho x} dv$$

En posant 
$$M = \frac{(\mu/\rho)_p}{\sin.\theta_1} + \frac{(\mu/\rho)_e}{\sin.\theta_2} \quad (13)$$

on obtient la relation fondamentale qui exprime l'intensité de fluorescence émise par un élément de concentration  $\tau$  ( $ML^{-3}$ ) situé dans un élément de volume  $dv$  à la profondeur  $x$  dans l'échantillon.

$$dI = KI_0 \tau e^{-M\rho x} dv \quad (14)$$

$M$  est "l'effet de matrice" de l'échantillon; il tient compte de l'absorption du rayonnement primaire et du rayonnement considéré émis par l'échantillon ainsi que de la géométrie du spectromètre. Chaque terme de  $M$  (relation 13) peut théoriquement se calculer à partir de la composition de l'échantillon en utilisant la relation 8 ( $\mu/\rho = \sum (\mu/\rho)_i P_i$ ) qui exprime l'additivité des absorptions dûes à chaque constituant.

### 3-D- NOTION D'ÉPAISSEUR INFINIE DE L'ÉCHANTILLON EN FLUORESCENCE X - INTENSITÉ EMISE PAR UN ÉCHANTILLON D'ÉPAISSEUR INFINIE -.

Physiquement, la surface de l'échantillon irradié est définie (collimation etc...); on peut donc intégrer l'équation 14 suivant la profondeur  $x$ , en prenant soin de changer la constante  $K$  en constante  $K_s$  qui tient compte de l'intégration suivant la surface.

$$I = - \frac{K_s I_0 \tau}{M\rho} \int_0^x e^{-M\rho x} d(-M\rho x)$$

$$I = \frac{K_s I_0 \tau}{M\rho} [1 - e^{-M\rho x}] \quad (15)$$

L'intensité  $I_\infty$  correspondant à l'épaisseur infinie est :

$$I_\infty = \frac{K_s I_0 \tau}{M\rho} \quad (16)$$

$$\frac{I}{I_{\infty}} = 1 - e^{-M\rho x}$$

en prenant le premier terme du développement limité de l'exponentielle,

$$\log_e \frac{I_{\infty} - I}{I_{\infty}} = -M\rho x$$

en posant

$$\epsilon = \frac{I_{\infty} - I}{I_{\infty}},$$

$$x = - \frac{\log_e \epsilon}{M\rho} \quad (17)$$

*Il est important de remarquer* que l'épaisseur infinie vis à vis de la fluorescence X est différente de l'épaisseur infinie vis à vis de la simple absorption d'un rayonnement par un matériau d'épaisseur  $x$ .  $M$  est la somme de deux termes tenant compte du rayonnement primaire et du rayonnement émis ainsi que de la géométrie du spectromètre, tandis que dans le cas de la simple absorption par un matériau d'épaisseur  $x$ ,  $M$  se limiterait au coefficient d'absorption massique du matériau, correspondant à l'un ou l'autre des termes suivant la longueur d'onde considérée.

A titre d'exemple et pour fixer un ordre de grandeur d'une "épaisseur infinie", considérons l'émission  $K\alpha$  du Nb. (0,748 Å). Il est facile de trouver dans une table les coefficients d'absorption massique relatifs aux éléments majeurs ( $S_i$ , Al, ...) pour la longueur d'onde émise; le choix des coefficients d'absorption pour le rayonnement primaire dépend de la définition du rayonnement monochromatique "longueur d'onde équivalente" nécessairement inférieure à 0,748 Å. Pour simplifier, et seulement pour trouver un ordre de grandeur, on choisit les coefficients d'absorption relatifs à 0,7 Å, aussi bien pour le rayonnement primaire que pour le rayonnement émis. Pour un échantillon préparé sous forme de "pastille" (10% de cire pour assurer la cohésion), en prenant  $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$ , la valeur de  $M$  pour un basalte est de l'ordre de  $20 \text{ cm}^2/\text{g}$  et pour un granite de l'ordre de  $13,3 \text{ cm}^2/\text{g}$  (en employant les relations 8 et 13). En estimant que l'échantillon est d'épaisseur infinie à 1% près ( $\epsilon = 10^{-2}$ ), et en prenant  $\rho = 2.6$  on trouve pour un basalte :  $x = 1,2 \text{ mm}$ , pour un granite :  $1,7 \text{ mm}$ . (relation 17).

Pour des éléments de numéro atomique inférieurs à celui de Niobium (en considérant les émissions K),  $M$  est nécessairement plus grand, donc l'épaisseur infinie plus petite. On peut donc dire qu'une "pastille" d'une épaisseur de l'ordre de 2 mm permettra l'analyse des éléments de numéro atomique inférieur ou égal à celui du Niobium (raies K).

L'intensité de fluorescence émise par un échantillon d'épaisseur infinie est donnée par la relation 16. En remplaçant  $\tau$ , concentration de l'élément exprimée par unité de volume ( $\text{ML}^{-3}$ ), par la proportion en masse de l'élément dans l'échantillon (exprimée en % ou en ppm)

improprement appelée concentration  $c$ , ( $c = \tau/\rho$ ), l'intensité de fluorescence pour un échantillon d'épaisseur infinie s'écrit :

$$I = \frac{K_s I_0 c}{M} \quad \text{ou,}$$

en regroupant  $K_s$  et  $I_0$  par une seule constante  $A$

$$I = \frac{A c}{M} \quad (18)$$

### 3-E- FILM MINCE -.

En considérant  $x$  petit (film mince), on assimile  $e^{-M\rho x}$  aux deux premiers termes du développement limité dans la relation 15, on obtient :

$$I = K_s I_0 \tau x$$

Cette technique, quand elle est utilisable permet de s'affranchir complètement de "l'effet de matrice". (Chung et al 1974, Gunn 1955, Price and Angell 1968, Rhodin 1955, Rose 1964).

## 4- ANALYSE DES ELEMENTS MAJEURS

-----

La relation fondamentale qui existe entre l'intensité de fluorescence d'une raie émise par un élément d'un échantillon et sa concentration exprimée en g d'élément (ou d'oxide) par gramme d'échantillon (ou en %) ou en  $\mu\text{g/g}$  (ppm) est :

$$I = \frac{A c}{M} \quad (18)$$

$c$  : concentration définie ci-dessus,

$M$  : effet de matrice : dans la plupart des spectromètres  $\theta_1 \neq \theta_2$  (cf. § 3. C- Intensité de fluorescence); on limitera l'expression de  $M$  à :

$$M = \sum (\mu/\rho)_{pi} c_i + \sum (\mu/\rho)_{ei} c_i$$

$c_i$  étant la "concentration" (proportion en fait) de l'élément  $i$ ,  $(\mu/\rho)_{pi}$  le coefficient d'absorption par l'élément  $i$  du rayonnement primaire,  $(\mu/\rho)_{ei}$  le coefficient d'absorption par l'élément  $i$  du rayonnement émis ( $\lambda$  considérée). Le terme  $\sin \theta_1 = \sin \theta_2$  est intégré dans la constante  $A$ .

$A$  : constante tenant compte de la géométrie de l'instrument (voir remarque sur  $M$ ).

Analyser les éléments majeurs directement à partir d'une poudre (ou d'une "pastille") pose deux problèmes :

- les coefficients d'absorption des éléments concernés sont grands (numéros atomiques faibles); l'épaisseur de la couche intéressée par le rayonnement X (primaire ou émis) est faible. De ce fait, il existe pour certains éléments un problème d'homogénéité vis à vis de la taille des grains qui peuvent être de nature différente; la différence de dureté entre les minéraux introduit des différences de dimension des grains au broyage (Bernstein 1963, Brindley 1945, Claisse et Sanson 1972, Claisse 1962, Gunn 1960, Hunter and Rhodes 1972, Quintin 1969).

- Il est difficile de calculer la longueur d'onde équivalente au spectre primaire vis à vis de l'excitation pour trouver dans une table les coefficients  $(\mu/\rho)_{pi}$  relatifs à l'absorption du rayonnement primaire.

On note également que le choix d'une longueur d'onde équivalente est difficile du fait des nombreuses discontinuités d'absorption existantes (fig.6). En raison de ces discontinuités, suivant la valeur de cette longueur d'onde, on peut inverser l'importance relative des coefficients d'absorption d'un élément vis à vis d'un autre.

Certaines méthodes, semi-empiriques, permettent pour l'analyse d'un type d'échantillons donnés, d'établir des "coefficients d'Influence" (Claisse et Quintin 1967, Lachance and Tail 1966, Vié Le Sage 1975).

Ces deux problèmes évoqués ci-dessus sont résolus par la préparation de l'échantillon fourni à l'analyse sous forme d'un verre; ce type de préparation permet "homogénéisation" et "effet tampon" du point de vue effet de matrice. (Fabbi 1972, Harvey et al 1973, Ingamells 1970, Norrish and Hutton 1969, Rinaldi and Aguzzi 1967, Rose Adler and Flanagan 1962, Stephenson 1969, Tertian 1968, Welday et al 1964, Wittman et al 1974).

L'échantillon soumis à l'analyse étant préparé sous la forme d'un verre, l'intensité de fluorescence d'un élément s'écrit :

$$I = \frac{AXc}{XM + (1 - X) M_f}$$

X étant la proportion d'échantillon dans le verre et  $M_f$  l'effet de matrice du fondant (ou coefficient d'absorption du fondant); en choisissant convenablement X et  $M_f$ , les variations de XM suivant les types de roches (péridotite, basalte, granite, ...) sont petites par rapport à  $XM + (1 - X) M_f$ ; l'effet de matrice de la préparation est "tamponné" vis à vis de la nature de l'échantillon à analyser. Il existe alors une relation linéaire simple entre intensité et concentration de l'élément analysé.

Suivant les ordres de grandeur relatifs de X et de  $M_f$ , on distingue la méthode dite des "grandes dilutions" (X petit) et la méthode dite à "l'alourdisseur" ( $M_f$  grand).

A ce principe se rattache une méthode qui, après mise en solution de l'échantillon, consiste à fixer les éléments sur une résine. En plus de l'effet de dilution qui assure un effet tampon vis à vis de l'effet de matrice, il peut être noté que, les particules de résine étant disposées en "couche mince" sur un support (cf. § 3. E- Films minces), cette méthode est vraisemblablement la moins sensible aux effets de matrice. (Govindaraju 1973).

Tableau VI.1

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
valeur moyenne 4 laboratoires	50,0	14,55	10,38	9,1	11,34	0,24	1,16	0,12
2.σ	± 0,5	± 0,2	± 0,2	± 0,2	± 0,2	± 0,04	± 0,06	± 0,5
déterminations à bord	49,7	14,5	10,4	9,0	11,3	0,26	1,18	0,15

Comparaison des déterminations fluorescence X à bord (leg 37) et moyennes des analyses de quatre laboratoires.

Tableau VI.2

Echantillon	CaO		TiO <sub>2</sub>		K <sub>2</sub> O	
	a	b	a	b	a	b
7-2, 5-10	11,8	11,8	1,19	1,19	0,41	0,42
40-3, 90-93	13,95	14,07	0,53	0,53	0,11	0,11
12-2, 60-65	13,57	13,43	0,92	0,92	0,20	0,19
40-2 8	11,86	11,97	1,22	1,23	0,30	0,30
22-1 16	12,30	12,29	1,24	1,24	0,41	0,41
31-1 3	12,81	12,79	1,03	1,02	0,36	0,37
20-2 7	12,65	12,65	1,05	1,06	0,20	0,20

Reproductibilité de mesure : a et b, deux mesures effectuées à bord du Glomar Challenger (leg 37) à un mois d'intervalle

Il convient également de mentionner la méthode dite de "double dilution" qui, à partir de deux solutions (deux verres) de proportions échantillons-solvant (fondant) différentes permet également de s'affranchir de l'effet de matrice (Tertian et Geninasca 1972, Tertian 1969 a, Tertian 1969 b).

Ces différentes méthodes sont pratiquement équivalentes d'un point de vue précision : pour les éléments majeurs, la précision relative est de l'ordre de 1%; pour les éléments mineurs (MnO, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), la précision absolue est de l'ordre de  $\pm 2$  unités sur le deuxième chiffre après la virgule. Le total des éléments majeurs est compris dans 95% des cas entre 98,5 et 100,5%. On ne donnera pas ici de "droites d'étalonnage" qui ne constitueraient qu'une information redondante par rapport aux informations données ci-dessus.

Le tableau 1 présente la comparaison entre les résultats obtenus par quatre laboratoires différents (valeurs moyennes et  $2\sigma$  associés) et les résultats obtenus à bord du Glomar Challenger pendant le leg 37 du D.S.D.P. (H. Bougault 1977).

Le tableau 2 présente un test de reproductibilité de mesure, effectué sur différents échantillons à un mois d'intervalle.

#### 5- ANALYSE DES ELEMENTS TRACES

-----

La relation qui existe entre intensité de fluorescence I d'une raie émise par un élément d'un échantillon et sa concentration exprimée en ppm est :

$$I = \frac{Ac}{M} \quad (18)$$

Comme indiqué dans le paragraphe 4 "Analyse des éléments majeurs", le facteur géométrique de l'instrument, en supposant  $\theta_1 = \theta_2$  (cf. § 3. C- Intensité de fluorescence), est intégré dans la constante A. M, effet de matrice se limite dans ces conditions à :

$$M = \sum (\mu/\rho)_{pi} c_i + \sum (\mu/\rho)_{ei} c_i \quad (19)$$

$c_i$  étant la concentration de l'élément i,  $(\mu/\rho)_{pi}$ , le coefficient d'absorption du rayonnement primaire par l'élément i et  $(\mu/\rho)_{ei}$ , le coefficient d'absorption du rayonnement émis (de longueur d'onde  $\lambda$ ) par l'élément i.

On notera qu'il n'est pas possible pour les éléments traces d'utiliser la solution "tampon" vis à vis de l'effet de matrice utilisé pour l'analyse des éléments majeurs; une telle solution équivaldrait à diminuer dans des proportions trop grandes les intensités relatives aux éléments en faible concentration, élèverait les limites de détection et diminuerait la sensibilité. Les mesures de concentration d'éléments traces ne pourront donc s'effectuer soit sur des verres préparés, -mais avec des dilutions relativement faibles-, soit à partir des poudres elles-mêmes. Dans ces conditions, une mesure précise de la concentration d'un élément trace ne pourra

être réalisée qu'à la condition d'évaluer M avec précision, que ce soit à l'aide d'une mesure ou d'un calcul.

Une deuxième contrainte (négligeable dans le cas de l'analyse des éléments majeurs) dont il faudra éventuellement tenir compte, correspond à la notion de "blanc instrumental", c'est-à-dire à la possibilité qu'a l'instrument lui-même de contribuer à donner des photons X à la longueur d'onde correspondant à l'élément analysé.

Enfin, une troisième contrainte qui limite la possibilité d'analyse des éléments, quand on considère des numéros atomiques de plus en plus élevés, concerne l'efficacité d'excitation. Seule la partie du spectre émis par le tube correspondant à des longueurs d'onde inférieures à la discontinuité d'absorption du rayonnement analysé est efficace (§ 3. A- Spectrométrie de fluorescence X, excitation); plus le numéro atomique de l'élément analysé croît, plus la longueur d'onde correspondant à la discontinuité d'absorption est petite et plus la partie du spectre efficace est réduite. De ce fait, suivant la puissance des tubes et les anticathodes utilisées, l'analyse des éléments à partir d'un certain numéro atomique se trouve limitée aux raies L moins intenses que les raies K.

#### 5-A- EFFET DE MATRICE

Mesurer ou calculer M? En tout premier lieu, il convient de constater qu'il n'est pas nécessaire de connaître la valeur *absolue* de M; on cherche en effet pour déduire la concentration d'une intensité à connaître A dans la relation 18. Si M est connu à une constante de proportionnalité près, cette constante sera incluse dans A au moment de l'étalonnage.

La première méthode consiste à analyser un type de roche en se servant d'un étalonnage (détermination de A) à partir de standards du même type (faible variation de M). Tenant compte du fait, qu'en passant d'un granite à un basalte, M varie d'un facteur 2, M peut varier de 10 à 20% d'un échantillon à l'autre pour un même type de roche (granite par exemple). En conséquence, la précision d'une telle méthode est nécessairement limitée

Le deuxième type de méthode consiste à déterminer M par une mesure; l'intensité  $i$  d'un pic Compton ou celle d'un fond continu est liée à l'effet de matrice par une relation du type :

$$i = \frac{K}{M} + K' \quad (K, K' \text{ constantes})$$

(Andermann and Kemp 1958, Champion et al 1966, Clark and Mitchell 1972, Cullen 1962, Delong and Mc. Cullough 1973, Feather and Willis 1976, Goldman and Anderson 1965, Hower 1959, Hatton and Norrish 1977, Johson and Stuu 1958, Kalman and Heller 1962, Léoni and Saitta 1977, Nesbitt et al 1976, Price and Angell 1968, Reynolds 1963, Reynolds 1967, Sherman 1955, Verdurmen 1977, Walker 1973, Webber and Newbury 1971, Wilband 1975, Wyrobish 1977).

Cette méthode donne de bons résultats; elle nécessite un choix très sérieux de la (ou des) longueur(s) d'onde Compton ou fond et nécessite une préparation de l'échantillon très reproductible (cf. § 5. D- Une mesure de concentration à partir d'une simple mesure de l'intensité d'un pic brut). Cette méthode est très intéressante lorsqu'on ne s'intéresse qu'aux éléments traces considérés puisqu'elle ne nécessite pas de connaître la composition de l'échantillon (éléments majeurs).

Le troisième type de méthode repose sur le calcul de l'effet de matrice à partir de la composition de l'échantillon. Si la composition de l'échantillon est connue, cette méthode ne nécessite pas de mesures additionnelles spécifiques à l'évaluation de M. C'est cette méthode - par le calcul - qui a été développée au laboratoire, méthode qui a priori, suivant Fairbairn and Hurley (1971), est la plus satisfaisante. Strasheir and Brandt 1968, ont utilisé cette méthode - à partir du calcul - pour des préparations avec dilution de l'échantillon : notre objectif est de travailler directement sur poudre.

L'effet de matrice M est la somme de deux termes, l'un relatif au rayonnement primaire, l'autre au rayonnement émis,

$$M = (\mu/\rho)_{pi} c_i + (\mu/\rho)_{ei} c_i \quad (19)$$

étant entendu que les paramètres caractéristiques de la géométrie de l'instrument sont intégrés dans la constante A de la relation (18).

Connaissant la longueur d'onde du rayonnement absorbé par l'échantillon (exemple : raie émise par un élément de l'échantillon), il est possible de trouver dans une table les coefficients d'absorption massique correspondants  $(\mu/\rho)_{ei}$ . Par contre, trouver les coefficients  $(\mu/\rho)_{pi}$  relatifs au rayonnement primaire est une opération beaucoup plus délicate du fait que ce rayonnement primaire est polychromatique; cette opération revient à définir la longueur d'onde du rayonnement monochromatique  $\lambda_p$  qui provoquerait la même intensité de fluorescence que le rayonnement polychromatique du tube. On se propose de montrer que dans la grande majorité des cas (analyse d'éléments traces) la connaissance de cette "longueur d'onde équivalente" n'est pas nécessaire au calcul d'effet de matrice.

Soit  $\lambda$  la longueur d'onde "K" émise considérée à laquelle correspond la discontinuité d'absorption "K"  $\lambda_{AE}$ . Les éléments peuvent être classés en deux catégories suivant que  $\lambda$  se situe de part ou d'autre de la discontinuité d'absorption du Fe, Fe  $K_{AE}$ . (Hower 1959, Quintin 1970, Reynolds 1963).

$\lambda_{AE}$  est plus grande que Fe  $K_{AE}$ ; ce cas ne concerne que Sc, V, Cr et Co.

$\lambda_{AE}$  est plus petite que Fe  $K_{AE}$ ; ce cas concerne tous les autres éléments pourvu qu'une raie K de ces éléments puisse être excitée.

Dans ce dernier cas, cas le plus général, le domaine des longueurs d'onde capable d'exciter un élément se trouve nécessairement en dehors du domaine des discontinuités d'absorp-

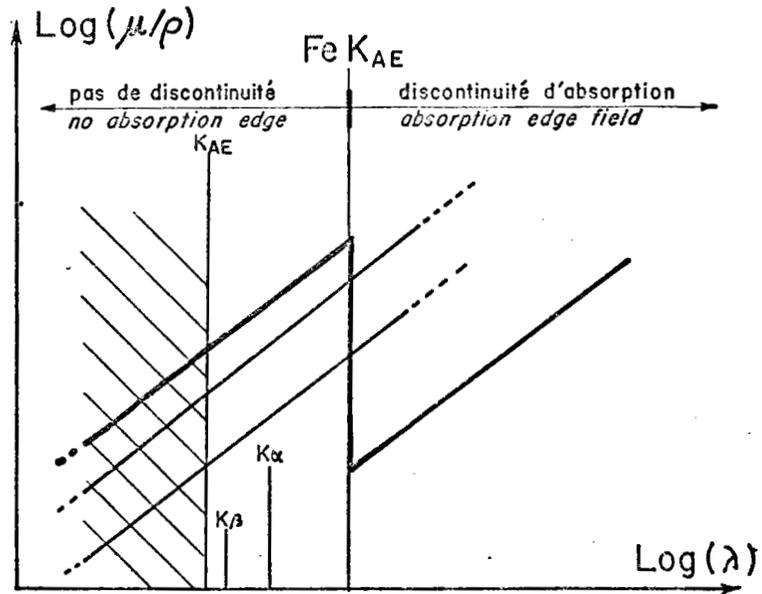


Figure VI.13: Zones de non discontinuité ou de discontinuité d'absorption des éléments majeurs des roches séparées par  $\text{Fe K}_{\text{AE}}$ .

tion des éléments majeurs (fig.13). Un élément trace de numéro atomique  $Z > 27$  possède une discontinuité d'absorption K, nécessairement inférieure à  $Fe_{K_{AE}}$ ; les photons X capables d'exciter cet élément, ont des longueurs d'onde nécessairement inférieures à  $\lambda_{AE}$ . Dans ces conditions, quelle que soit la longueur d'onde équivalente à  $\lambda_p$ , les coefficients d'absorption par les éléments majeurs  $i$  du rayonnement primaire, peuvent s'écrire (§ 2. B- Variation du coefficient d'absorption  $\mu/\rho$  en fonction de la longueur d'onde) :

$$(\mu/\rho)_{pi} = \delta_i \lambda_p^Y$$

sans qu'il y ait changement de  $\delta_i$  qui correspondrait à une discontinuité d'absorption. Pour le rayonnement émis par l'élément de numéro atomique  $Z > 27$ , on peut écrire de même :

$$(\mu/\rho)_{zi} = \delta_i \lambda_z^Y$$

L'effet de matrice M, fonction du rayonnement primaire ( $\lambda_p$ ), du rayonnement émis ( $\lambda_z$ ) et des éléments majeurs ( $i$ ),  $M(\lambda_p, \lambda_z, i)$  s'écrit donc :

$$M(\lambda_p, \lambda_z, i) = \lambda_p^Y \sum \delta_i c_i + \lambda_z^Y \sum \delta_i c_i$$

$$M(\lambda_p, \lambda_z, i) = \lambda_p^Y + \lambda_z^Y [\sum \delta_i c_i]$$

Considérant la relation qui lie intensité et concentration

$$I = \frac{Ac}{M},$$

on a vu (début du § 5.) qu'il suffisait d'estimer M à une constante de proportionnalité près, constante qui sera intégrée dans A au moment de l'étalonnage. En considérant une raie K, quel que soit l'élément-trace analysé, de numéro atomique supérieur à 27, le terme  $\lambda_p^Y + \lambda_z^Y$  est une constante. Il s'en suit que le coefficient d'effet de matrice peut tout simplement être apprécié par le terme  $\sum \delta_i c_i$ . Quelle que soit la valeur de la longueur d'onde équivalente  $\lambda_p$ , on peut écrire :  $\lambda_p^Y = K \lambda_z^Y$ . On en déduit :

$$M(\lambda_p, \lambda_z, i) = (1 + K) \lambda_z^Y \sum \delta_i c_i = M(\lambda_z, i)$$

ce qui peut s'exprimer par le théorème suivant :

**THEOREME 1 :** Considérant un élément trace dont les longueurs d'onde des émissions K et de la discontinuité d'absorption K sont inférieures à la discontinuité d'absorption K de l'élément majeur de numéro atomique le plus élevé présent dans l'échantillon, l'effet de matrice de l'échantillon relatif à cet élément trace peut être déterminé à une constante de proportionnalité près sans tenir compte du rayonnement primaire.

Considérant l'émission d'un élément trace Z' satisfaisant aux mêmes conditions que Z, on peut écrire :  $\lambda_{z'}^Y = K' \lambda_z^Y$ . On en déduit :

$$M(\lambda_{z'}^Y, i) = K' (1 + K) \lambda_z^Y \sum \delta_i c_i$$

Tableau VI.3

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	MnO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
$\mu/\rho$ Sr K $\alpha$ 0.875 Å	6.71	6.20	49.73	54.95	5.59	36.65	26.21	4.81	25.26	27.01	10.09
$\frac{(\mu/\rho) \text{ Ni K}\alpha}{(\mu/\rho) \text{ Sr K}\alpha}$	6.54	6.34	6.33	6.33	6.48	6.34	6.19	6.54	6.24	5.96	6.15

Coefficient d'absorption massique ( $\mu/\rho$ ) des oxydes d'éléments majeurs calculé pour Sr K $\alpha$  et rapports des  $\mu/\rho$  des oxydes calculés pour Ni K $\alpha$  et Sr K $\alpha$ .

Tableau VI.4

	MAR1	ARP1	319	315	275	$\frac{1}{2}$ GA $\frac{1}{2}$ BR	$\frac{1}{2}$ GA $\frac{1}{2}$ PCC1
Sr : recomd ou dil. isotopique	109.6		199.2	325.6	32.2	827.5	152.5
Sr ; ( $\mu/\rho$ ) : Sr K $\alpha$	106.9	109.1	188.2	323.6	25.9	847.7	148.8
Sr ; ( $\mu/\rho$ ) : Ni K $\alpha$	105.5	107.9	188.8	324.1	24.9	849.4	150.1
Rb : recomd ou dil. isotopique	4.8		362.5	316	243.8	110	87.5
Rb ; ( $\mu/\rho$ ) : Sr K $\alpha$	3.3		363.3	310.2	250.2	113.2	86.2

Résultats d'analyses de Sr et Rb, Sr : trois résultats sont proposés ; valeur recommandée ou résultat d'analyse par dilution isotopique,  $\mu/\rho$  Sr K $\alpha$  signifiant que l'effet de matrice a été calculé en se servant des coefficients d'absorption relatifs à Sr K $\alpha$ ,  $\mu/\rho$  Ni K $\alpha$  signifiant que l'effet de matrice pour l'analyse du Sr a été calculé en se servant des coefficients d'absorption relatifs à Sr K $\alpha$ .

ou

$$M(\lambda_{z'}, i) = K' M(\lambda_z, i)$$

qui peut s'exprimer par le théorème suivant :

THEOREME 2 : Considérant deux éléments traces  $z$  et  $z'$  dont les longueurs d'onde des émissions  $K$  et des discontinuités d'absorption  $K$  sont inférieures à la discontinuité d'absorption  $K$  de l'élément majeur de numéro atomique le plus élevé présent dans l'échantillon, l'effet de matrice de l'échantillon calculé pour  $z$  ne diffère de l'effet de matrice relatif à  $z'$  que par une constante de proportionnalité.

L'illustration de ces deux théorèmes est donnée par les tableaux 3 et 4. Le tableau 3 représente les coefficients d'absorption calculés pour Sr  $K\alpha$  et les rapports coefficients d'absorption calculés pour Sr  $K\alpha$  / coefficients d'absorption calculés pour Ni  $K\alpha$ . Ces rapports sont pratiquement constants et indépendants de l'élément absorbant.

Le tableau 4 présente les résultats obtenus pour Sr sur des échantillons qui ne sont pas des standards internationaux; il s'agit de mélanges de standards ( $\frac{1}{2}$  GA  $\frac{1}{2}$  PCC1) ou d'échantillons qui ont fait l'objet de mesures par dilution isotopique; on constate le peu de variation des résultats suivant le choix de la longueur qui a servi à calculer les coefficients d'absorption. Les valeurs de Rb ont été obtenues en se servant des coefficients d'absorption calculés pour Sr  $K$ .

Dans les conditions définies ci-dessus (raie  $K$  d'un élément trace de numéro atomique supérieur à 27), le calcul de l'effet de matrice à une constante de proportionnalité près est donc indépendant de la longueur d'onde de la raie  $K$  considérée. Dans ces conditions, il est possible d'appliquer la relation 12 (§ 2. C- Variation du coefficient d'absorption  $\mu/\rho$  en fonction du numéro atomique  $z$ . Cas particulier des roches pour  $\lambda < Fe K_{AE}$ .

$$(\mu/\rho)_i = \beta z_i^\alpha$$

$i$  : désigne l'élément majeur  $i$ ,  $z_i$  est le numéro atomique de l'élément majeur  $i$ .

L'expression donnant l'intensité de fluorescence de l'élément trace peut donc s'écrire :

$$I = \frac{Ac}{M} = \frac{Ac}{\sum \beta z_i^\alpha c_i} = \frac{Ac}{\beta \sum z_i^\alpha c_i}$$

En faisant entrer  $\beta$  dans la constante  $A$ , ce qui correspond toujours à déterminer  $M$  à une constante près, on obtient :

$$I = \frac{Ac}{\sum z_i^\alpha c_i} \quad (20)$$

C'est la relation générale qui permet d'exprimer l'intensité de fluorescence d'un élément trace de numéro atomique supérieur à 27, dans une roche. Les concentrations d'éléments majeurs étant généralement données sous forme d'oxydes, on peut calculer le coefficient d'absorption correspondant à un oxyde :

$$M\mu_i = (1 - p) 8^\alpha + pz_i^\alpha \quad (21)$$

Tableau VI.5

	$\alpha = 2,65$	$\alpha = 2,81$
SiO <sub>2</sub>	640,95	953,22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	590,19	870,06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4004,44	6657,77
FeO	4422,92	7361,15
MnO	3978,26	6579,17
MgO	579,07	847,45
CaO	2074,34	3304,90
Na <sub>2</sub> O	490,44	710,10
K <sub>2</sub> O	2073,78	3284,05
TiO <sub>2</sub>	2262,80	3652,63
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	710,22	1066,49

Tableau des "coefficients d'absorption" calculés pour les oxydes suivant la relation  $Mu_i = (1 - p)8^\alpha + p Z_i^\alpha$ , p étant la proportion de métal dans l'oxyde.

Tableau VI.6

	$\alpha = 2,65$	$\alpha = 2,81$	(1/2)
	(1)	(2)	
AGV1	975,8	1517	64
BR	1308	2074	63
BcR1	1244	1969	63
W1	1191	1876	63
DTS1	926,7	1437	64
G2	814,5	1243	66
GSP1	891,1	1371	65
PCC1	896,2	1389	65
DRN	1099	1725	64
GH	754,4	1141	66
GA	820,2	1253	65

Effets de matrice  $M = \sum Z_i^\alpha c_i$  calculés pour  $\alpha = 2,65$  et  $\alpha = 2,81$ .

Tableau VI.7

	Recmd	Rb		Recmd	Nb	
		$\alpha = 2,65$	$\alpha = 2,81$		$\alpha = 2,65$	$\alpha = 2,81$
AGV1	67	57.2	67.9	15	14.6	14.7
BR	45	45.2	44.8	114	114	115
BcR1	46	46.6	46.5	14.5	14.9	14.2
W1	21	21.8	20.9	8.5	9.0	8.3
DTS1	0	-0.6	-1.2	0	0	0.3
G2	169	170	171	11	10.1	10.7
GSP1	254	253	255			
PCC1	0	.1	-0.4	0	0.8	1.4
DRN	75	73.2	74.2	9	8.2	7.9
GH	390	390	389	85	85	84
GA				11	11.1	11.6
$r^2$		.99994	.99993		.99979	.99963
$\sigma$		.33	.34		.19	.25

Influence du choix de la valeur de  $\alpha$  sur l'étalonnage.

p étant la proportion de métal dans l'oxyde.

Les coefficients  $M\mu_i$  pour les différents oxydes des éléments majeurs sont présentés tableau 5, pour  $\alpha = 2,65$  et  $\alpha = 2,81$ .

Le tableau 6 présente les coefficients d'absorption relatifs aux standards internationaux, calculés pour  $\alpha = 2,65$  et  $\alpha = 2,81$ .

On a constaté (§ 3. C- Intensité de fluorescence) que le "fit"  $(\mu/\rho)^{\frac{1}{\alpha}}$  en fonction du numéro atomique est pratiquement aussi bon pour  $\alpha = 2,65$  ou  $\alpha = 2,81$  (fig. 7 et 8). Cette observation est confirmée par le rapport pratiquement constant qui existe entre effets de matrice calculés avec  $\alpha = 2,65$  et  $\alpha = 2,81$  (tableau 6).

De façon à apprécier l'influence du choix du paramètre  $\alpha$ , la détermination des concentrations des standards pour différents éléments traces a été effectuée suivant deux étalonnages en prenant  $\alpha = 2,65$  et  $\alpha = 2,81$ . Deux exemples sont donnés tableau 7; dispersion moyenne  $\sigma$  les points autour de la droite d'étalonnage  $IM = f(c)$ , et coefficient de corrélation  $r^2$  sont équivalents dans les deux cas ( $\alpha = 2,65$  et  $\alpha = 2,81$ ). Les variations sur les concentrations des standards trouvées ne portent que sur un ordre de grandeur de 1ppm.

On peut donc considérer que le choix de la valeur de  $\alpha$  entre 2,65 et 2,81 n'est pas critique et que le calcul d'effet de matrice proposé  $M = \sum_1^{\alpha} c_i$  permet la mesure des concentrations au ppm près :

$$M = \sum_1^{\alpha} c_i, \quad \alpha \in [2,65, 2,81]$$

#### 5-B- INTERFERENCES INSTRUMENTALES -.

On a vu (§ 3. B- Spectre obtenu après excitation de l'échantillon) que le spectre après excitation de l'échantillon était constitué de deux ensembles; l'un est caractéristique de l'échantillon (raies), l'autre est une image du spectre du tube obtenu après chocs élastiques ou inélastiques des photons, soit sur l'échantillon, soit sur différentes parties de l'instrument (fond continu, pics de l'anticathode, pics Compton).

L'intensité relative à la raie analysée peut donc être considérée comme étant la somme de trois termes :

i)  $I_s$  correspond à l'intensité émise par l'échantillon, c'est l'intensité dont il a été question dans tous les paragraphes précédents.

ii)  $I_f$  est l'intensité qui correspond au fond continu.

iii)  $I'$  qui peut correspondre à l'intensité d'une raie de l'anticathode relative soit à l'élément de l'anticathode ou à une impureté de l'anticathode. On peut également ajouter que  $I'$  peut comprendre toute émission parasite due à l'instrument.

Si  $I_f$  peut être estimé par mesure du fond à droite et à gauche du pic considéré, il n'en va pas de même pour  $I'$ . Il est donc nécessaire de trouver une méthode capable d'estimer le "blanc instrumental" qui ne correspond pas au fond continu du tube.

Peuvent intervenir dans  $I'$  :

$I_f$  émission correspondante à une impureté présente dans le liant ou le fondant utilisé pour la préparation de l'échantillon,

$I_c$  émission correspondant à une émission de l'anticathode du tube,

$I_i$  émissions parasites provenant de différentes parties de l'instrument.

L'intensité  $I_f$  correspondant au liant ou au fondant dépend au même titre que l'intensité émise par l'échantillon à analyser de l'effet de matrice de la préparation; elle peut donc s'exprimer par :

$$I_f = \frac{f}{M}$$

$f$  étant une constante dépendant de la concentration de l'élément analysé dans le liant ou le fondant.

L'intensité  $I_c$  correspondant à une émission de l'anticathode est la somme de deux termes; l'un correspond aux chocs élastiques ou inélastiques sur différentes parties de l'instrument, surtout le porte échantillon; ce terme est constant :  $t_1$ . Le deuxième terme correspond aux chocs élastiques ou inélastiques sur l'échantillon lui-même. Pour le formuler, on peut refaire le même calcul que paragraphe 3. C, à la seule différence près qu'il n'y a pas émission X dans l'élément de volume situé à la profondeur  $x$ , mais simplement changement de direction du photon incident, soit par choc élastique, soit par choc inélastique. Pour un échantillon d'épaisseur infinie, on peut donc écrire :

$$t' = \frac{t'_2}{\frac{(\mu/\rho)_e + (\mu/\rho)_e}{\sin.\theta_1} + \frac{(\mu/\rho)_e}{\sin.\theta_2}} + \frac{t''_2}{K \frac{(\mu/\rho)_e + (\mu/\rho)_e}{\sin.\theta_1} + \frac{(\mu/\rho)_e}{\sin.\theta_2}}$$

Le premier terme correspond à un choc élastique : le coefficient d'absorption relatif au rayonnement primaire est le même que le coefficient d'absorption relatif au rayonnement dévié, lui-même égal à  $(\mu/\rho)_e$  coefficient d'absorption relatif à la raie émise étudiée. Le deuxième terme correspond à un choc inélastique; le coefficient  $K$  tient compte de la différence de longueur d'onde entre rayonnement incident et rayonnement dévié (0,0243 Å dans les spectrométries classiques, § 3. B).

$t'$  peut donc se mettre sous la forme :

$$t' = \frac{t'_2}{2M} + \frac{t''_2}{(K+1)M} = \frac{t_2}{M}$$

$M$  étant l'effet de matrice défini § 3. C- Intensité de fluorescence.

$I_i$ , intensité émise par l'instrument est une constante. Soit  $I$  l'intensité nette mesurée (intensité brute déduite du fond  $I_f$ ),

$$I = I_s + I'$$

$$I = \frac{Ac}{M} + \frac{f}{M} + t_1 + \frac{t_2}{M} + I_i$$

$I$  peut se mettre sous la forme

$$I = \frac{Ac}{M} + \frac{B}{M} + I_0 \quad (22)$$

en regroupant convenablement les constantes.

Ce résultat montre que l' "blanc instrumental" intervenant dans la mesure du pic net est la somme de deux termes, l'un dépendant de l'échantillon  $\frac{B}{M}$ , l'autre indépendant  $I_0$ . Il n'est donc pas possible en fluorescence X, dans le cas général, de tenir compte d'un "blanc instrumental" par la simple mesure d'un échantillon "blanc" vis à vis de l'élément mesuré.

En raisonnant en terme d'intensité corrigée, la relation 22 peut se mettre sous la forme :

$$(I - I_0) M = Ac + B \quad (23)$$

L'étalonnage  $I = f(c)$  à partir de standards connus, suppose donc la détermination de trois paramètres  $A$ ,  $B$  et  $I_0$ .

On retrouve dans la démonstration qui vient d'être faite ( $I' = \frac{B}{M} + I_0$ ) la justification de l'emploi d'un étalon interne ou bien de l'emploi de l'intensité d'un pic Compton pour mesurer l'effet de matrice  $M$ . En effet, cette relation regroupe la possibilité de l'émission par la préparation (c'est le cas de l'impureté supposée dans le liant ou le fondant) et la mesure de l'intensité d'une raie provenant du tube après chocs élastiques ou inélastiques. Ces deux possibilités permettent de mesurer  $M$  (début du § A).

La détermination des trois paramètres  $A$ ,  $B$  et  $I_0$  à partir d'un ensemble de  $n$  standards (j) peut se faire suivant deux méthodes mathématiques équivalentes, une méthode itérative et une méthode des moindres carrés appliquée à trois paramètres.

La première méthode (Bougault et al 1977) consiste à donner à  $I_0$  une valeur initiale  $N_i$  et à calculer la dispersion moyenne des points autour de la droite d'équation :

$$(I - N_i) M = A_i c + B_i$$

obtenues par les moindres carrés (détermination de  $A_i$  et de  $B_i$ ).

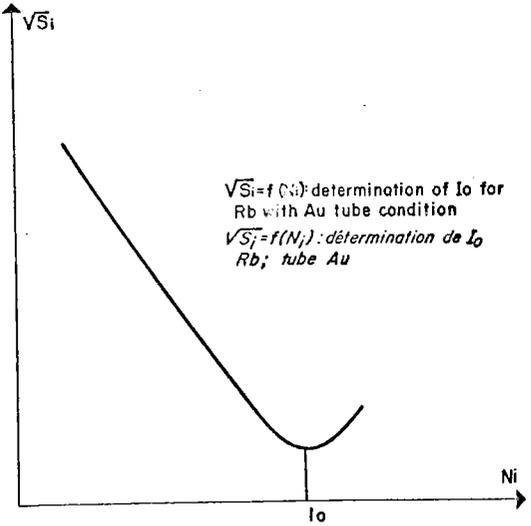


Figure VI.14: Exemple de détermination de  $I_0$  par recherche du minimum de  $S_i$  (voir texte)

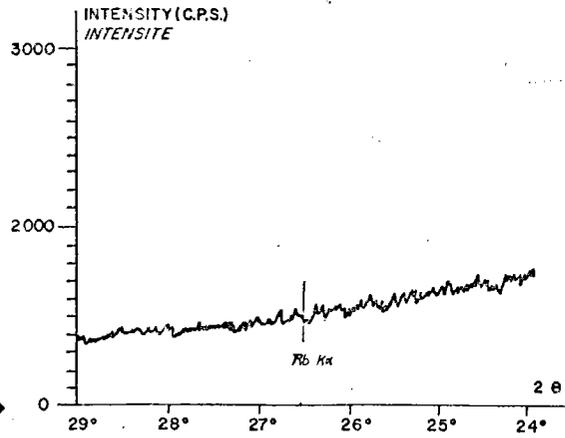


Figure VI.16: Absence d'interférence instrumentale pour l'analyse de Rb K en utilisant un tube Mo.

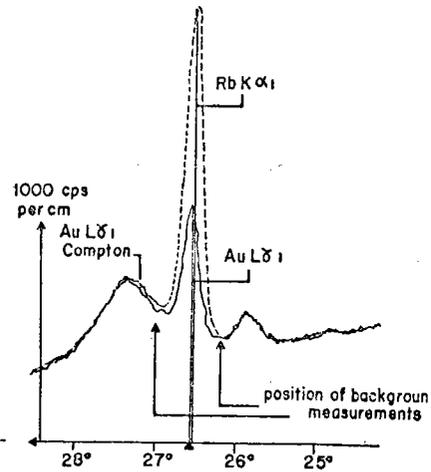


Figure VI.15: Interférence instrumentale de la raie Au L $\delta_1$  du tube avec la raie Rb K  $\alpha_1$  émise par l'échantillon

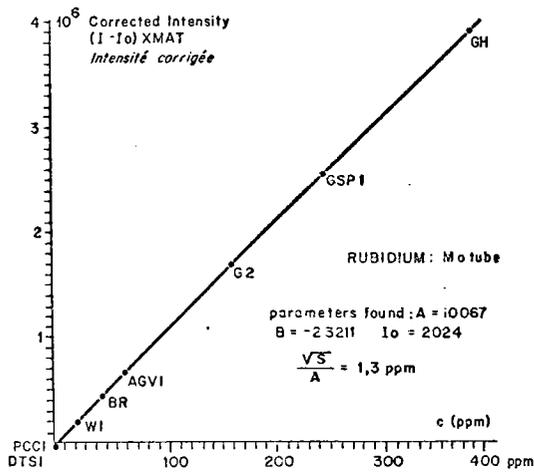


Figure VI.18: Analyse de Rb: excitation tube Mo.

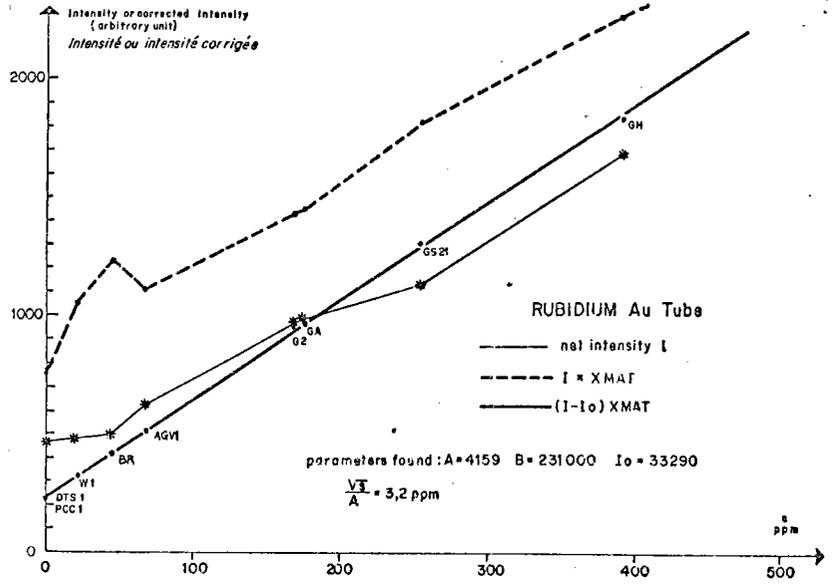


Figure VI.17: Analyse de Rb: excitation tube Au.

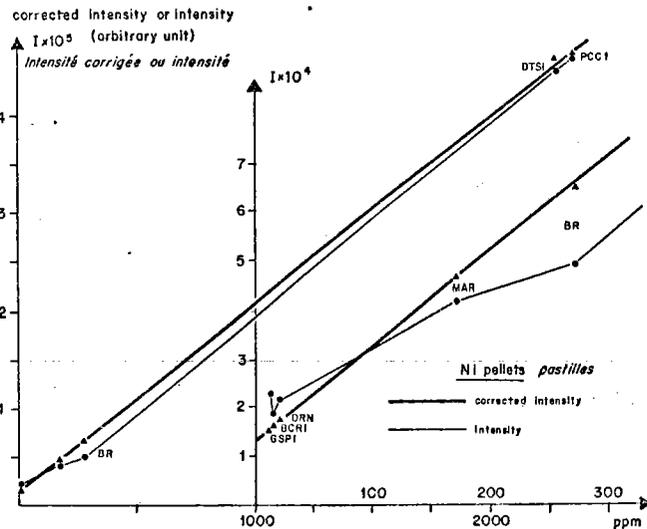


Figure VI.19: Analyse de Ni.

Cette dispersion  $S_i$  s'écrit :

$$S_i = \frac{\sum_{j=1}^n [(I_j - N_i) M_j - A_i c_j - B_i]^2}{n - 1}$$

$j$  correspond à un standard,  $i$  à une itération.

On recherche le minimum de  $S_i$  en fonction de  $N_i$  (exemple : fig.14).

La deuxième méthode (moindres carrés pour trois paramètres) est formulée en écrivant que la dispersion quadratique des points autour de la droite est minimum par rapport à  $I_0$ ,  $A$  et  $B$  (Quiselit 1978).

$$S = \sum [(I_j - I_0) M_j - A c_j - B]^2$$

$$\frac{\partial S}{\partial I_0} = \frac{\partial S}{\partial A} = \frac{\partial S}{\partial B} = 0$$

On obtient le système de trois équations à trois inconnues suivant :

$$A \sum M_j c_j + B \sum M_j + I_0 \sum M_j^2 = \sum I_j M_j^2$$

$$A \sum c_j^2 + B \sum c_j + I_0 \sum M_j c_j = \sum c_j M_j I_j$$

$$A \sum c_j + B n + I_0 \sum M_j = \sum M_j I_j$$

La démonstration de la validité de la relation 23 peut être faite par l'analyse du Rubidium, en utilisant un tube à anticathode d'or, puis un tube à anticathode de molybdène. La figure 15 montre l'interférence de la raie  $L\gamma_1$  de l'or vis à vis de la raie  $K\alpha$  du Rb. La figure 16 montre qu'il n'y a pas d'interférence dans le cas du tube molybdène. Les résultats pour les deux séries de mesures (tube or et tube molybdène) sont présentés figures 17 et 18. Dans le cas de l'utilisation du tube or, les paramètres  $B$  et  $I_0$  qui correspondent à l'interférence instrumentale sont élevés. Dans le cas du tube molybdène, ces paramètres sont faibles : la droite d'étalonnage passe par l'origine à 2 ppm près. L'ordre de grandeur de la dispersion des points autour de la droite d'étalonnage est le même dans les deux cas (tube Au : 3,2 ppm, tube Mo : 1,3 ppm).

L'interférence équivalente produite par le tube or peut être calculée à partir de la valeur des paramètres  $I_0$  et  $B$ ; elle est de l'ordre de 200 ppm. On peut donc considérer que la validité de la relation 23 est établie; la validité de cette relation a pour corollaire la possibilité d'analyse d'éléments en présence d'interférence instrumentale sans perte sensible de précision. L'analyse du nickel correspond à un cas classique où l'application de cette relation est indispensable; il existe en effet pour cet élément des émissions parasites dues soit à des impuretés dans les tubes, soit à des émissions secondaires. La figure 19 montre l'alignement

Tableau VI.8

	valeurs recommandées	valeurs trouvées
GH	3-4	3
G2	4-6	5
GA	6-7	6,5
GSP1	9-12,5	9
BCR1	14-16	18
AGV1	17-18	19,5
DRN	16-22	24
W1	76	77,5
BR	260-276	273
DTS1	2269	2378
PCC1	2339	2339

Nickel : détermination sur poudre pastillée.

Tableau VI.9

Echantillon	Pastille	Perle
ARP 7-6	122,6	121,6
ARP 10-15	227,5	229,0
ARP 10-16	245,7	247
ARP 12-19	140,8	140,6
ARP 13-4	249,5	252,8
CYP 30-33	148,5	158,9
CYP 30-35	256,2	255,5

Nickel : comparaison de résultats obtenus sur pastille et sur perle.

intensité corrigée  $(I - I_0)M$  en fonction de concentration entre 0 et 2300 ppm. Le tableau 8 présente une comparaison entre valeurs recommandées (Flanagan 1973, Abbey 1975, Abbey 1978) et valeurs trouvées au laboratoire pour les standards internationaux "classiques" à partir de mesures sur pastilles. Le tableau 9 présente une comparaison entre résultats obtenus à partir de pastilles et résultats obtenus à partir de perles au borate de lithium (1g. d'échantillon, 5g. de borate).

#### 5-C- INTERFERENCES SPECTRALES ET PHENOMENE DE SUREXCITATION -.

On réserve ici le nom d'interférence "spectrale" à la superposition de deux raies émises par l'échantillon (dans le paragraphe précédent l'interférence de l'or  $Ly_1$  sur le Rubidium  $K\alpha$  est une interférence spectrale, mais produite par l'instrument). Il est alors nécessaire d'ajouter un terme à l'expression 22 :

$$I = \frac{Ac}{M} + \frac{A'c'}{M} + \frac{B}{M} + I_0 \quad (25)$$

ou,

$$(I - I_0)M = Ac + A'c' + B \quad (26)$$

$c'$  étant la concentration de l'élément interférent et  $A'$  la constante relative à l'élément interférent. Dans le cas général, quatre constantes doivent donc être déterminées à l'aide de standards de concentration  $c$  et  $c'$  connues :  $A$ ,  $A'$ ,  $I_0$  et  $B$ . En fait, dans les cas habituels, on ne cumule pas interférence instrumentale et interférence spectrale; sans interférence instrumentale, la relation se limite à :

$$IM = Ac + A'c'$$

C'est le cas de l'analyse de l'Yttrium (interférence de la raie  $K\beta$  du Rubidium), du Zirconium (interférence de la raie  $K\beta$  du Strontium).

Dans le cas de l'analyse des éléments traces de numéros atomiques inférieurs à 26, Sc V et Cr, le phénomène de surexcitation peut intervenir.

On entend par surexcitation, le phénomène d'excitation par des photons d'énergie suffisante émis par un élément présent dans l'échantillon. C'est dans le cas des roches pour les éléments précités, la possibilité d'excitation de ces éléments par les photons correspondant aux raies  $K\alpha$  et  $K\beta$  du Fer présent dans l'échantillon. A cette excitation correspond le terme suivant :

$$A'' \text{ Fe } \frac{c}{M}$$

Il convient de remarquer que dans ce cas M ne peut pas s'exprimer par la relation simple  $M = \sum z_i c_i$  (§ 5- A. Effet de matrice : Théorème 1 et Théorème 2) puisque les éléments Sc, V et Cr ne satisfont pas à la condition requise pour l'application de cette relation.

Le cobalt a sa discontinuité d'absorption K d'un côté de la discontinuité d'absorption du Fe et ses émissions K de l'autre. Pour estimer l'effet de matrice relatifs aux éléments de numéro atomique inférieur ou égal à 27, on utilise alors les coefficients d'absorption massique d'une table. Il est également possible d'utiliser les relations indiquées par Hower (1959) Nesbitt et al (1976), Reynolds (1967), Ryland (1964) ou Walker (1973) qui tiennent compte de la discontinuité d'absorption du Fer.

La relation complète, tenant compte des possibilités d'interférence instrumentale, d'interférence spectrale et du phénomène de surexcitation, peut donc s'exprimer par :

$$(I - I_0)M = Ac + A'' Fe c + A'c' + B \quad (27)$$

Fe , concentration en Fer de l'échantillon.

Interférence instrumentale  $I_0$ , B

Interférence spectrale par un élément de concentration  $c'$  :  $A'c'$

Phénomène de surexcitation  $A'' Fe c$

Cette relation générale est la plupart du temps simplifiée, l'ensemble des interférences n'intervenant pas simultanément.

#### 5-D- DETERMINATION D'UNE CONCENTRATION A PARTIR DE LA MESURE DE L'INTENSITE BRUTE D'UN PIC -.

Sous cette rubrique, on entend montrer qu'il est possible dans certains cas de mesurer avec une bonne précision la concentration de certains éléments par la simple mesure de l'intensité brute d'un pic sans mesures et donc sans déduction du fond continu.

De la même façon qu'il a été montré (§ 5- B. Interférences instrumentales) qu'une interférence instrumentale au niveau d'une raie pouvait s'exprimer par l'expression :

$$I' = \frac{B}{M} + I_0$$

comprenant un terme dépendant de l'échantillon  $\frac{B}{M}$  et un terme constant  $I_0$ , il est possible de démontrer que le fond continu obéit à la même loi. Les phénomènes donnant lieu à l'observation du fond continu (§ 3- B. Spectre obtenu après excitation de l'échantillon) sont en effet de même nature : chocs élastiques et chocs inélastiques. L'expression correspondant au fond continu peut donc s'exprimer par :

$$I_f = \frac{B_f}{M} + I_{of}$$

Tableau VI.10

	I brut	F <sub>1</sub> +F <sub>2</sub>	I net
AGV1	77092	38486	38606
BR	51913	32472	19441
BCR1	52987	31897	21090
W1	43313	32897	10416
DTS1	38458	38623	-165
G2	161362	44552	116810
GSP1	200800	42540	158260
PCC1	39086	38866	220
DRN	72845	35509	37336
GH	339337	50407	288930

Rb : Tube Mo: 50KV 50mA détecteur NaI  
Cristal LiF - Pic: 26°7' F<sub>1</sub>=26°34' F<sub>2</sub>=27°10'  
Temps de comptage : 40 s.

Tableau VI.11

	I brut	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	I net
AGV1	185628	183229	164679	11674
BR	209715	147424	132836	69585
BCR1	154433	154369	137806	8435
W1	155741	159596	142035	4925
DTS1	183736	194452	173730	-355
G2	214877	214315	194729	10355
PCC1	187952	198291	176537	538
DRN	163783	167148	150196	5111
GH	317044	231956	216056	93038
GA	213860	213027	192295	11199

Nb K<sub>α</sub> : tube W : 50 KV, 50 mA détecteur NaI  
Cristal LiF - Pic : 21°47' F<sub>1</sub> = 21°07' F<sub>2</sub> = 21°85'  
Temps de comptage : 100s.

Tableau VI.12

	I brut	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	I net
AGV1	261628	228269	214006	40491
BR	219576	188912	177312	36464
BCR1	212733	191420	180780	26133
W1	206810	198429	187348	13922
DTS1	226071	233615	219995	-734
G2	326466	268724	249649	67280
GSP1	354269	259022	237763	105876
PCC1	234966	242349	228540	-478
DRN	224974	211170	198151	20313
GH	301322	275761	261622	32630
GA	281351	259583	244420	29350

Zr K<sub>β</sub> : Tube W : 50 KV, 50 mA. détecteur NaI  
Cristal LiF - Pic : 20° 17' F<sub>1</sub> : 19° 92' F<sub>2</sub> : 20° 40'  
Temps de comptage : 100s.

Tableau VI.13

	I brut	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	I net
AGV1	410686	177390	146396	248795
BR	397986	158812	122556	257302
BCR1	283244	143600	124660	149114
W1	218633	145218	127733	82158
DTS1	164993	169832	152753	3701
G2	551292	204446	173302	362419
GSP1	708112	188320	162916	532495
PCC1	168921	174428	156702	3356
DRN	276435	160364	137013	127747
GH	347002	203824	182738	153721
GA	363541	198178	172207	178349

Zr K<sub>α</sub> : Tube W : 50 KV, 50 mA détecteur NaI  
Cristal LiF - Pic : 22° 63' F<sub>1</sub> / 22° 30' F<sub>2</sub> / 23° 10'  
Temps de comptage : 100s.

Il a déjà été proposé d'utiliser une telle relation pour mesurer l'effet de matrice (Andermann and Kemp 1958, Champion et al 1966, Feather et Willis 1976, Price and Angell 1968, Wyrobish 1977).

Soit  $J$  l'intensité brute mesurée :

$$J = \frac{Ac}{M} + \frac{B}{M} + I_0 + \frac{B_f}{M} + I_{of}$$

En regroupant convenablement les différents termes, on constate que l'expression liant l'intensité brute à la concentration est de la même forme que celle qui lie l'intensité nette à la concentration, à savoir :

$$(J - I_0)M = Ac + B$$

En d'autres termes, en considérant la mesure du pic brut, le bruit de fond (fond continu) peut être considéré comme une interférence instrumentale

La méthode proposée est analogue dans le raisonnement à celle de Wilband (1975); pour éviter la mesure du bruit de fond sur l'échantillon, cet auteur propose une droite d'étalonnage bruit de fond en fonction de  $1/M$ ,  $M$  étant mesuré par l'intensité de la raie diffusée  $M_0K\alpha$  du tube. La méthode proposée ici évite et la mesure du fond et la mesure d'une raie Compton : elle suppose connue, bien entendu, la composition en éléments majeurs de l'échantillon.

Quelques exemples traités dans le paragraphe suivant montrent les possibilités et les limites d'application de l'analyse à partir de la mesure du pic brut.

#### 5-E- QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATION -.

Les quelques exemples présentés ci-après constituent une illustration de la possibilité de la spectrométrie de fluorescence X pour la mesure des éléments traces : Rb, Nb et Zr. Le Rb a été choisi parce que sa concentration dans les standards internationaux est très bien connue; cet élément a déjà été utilisé (§ 5- B. Interférences instrumentales) pour démontrer la relation  $(I - I_0)M = Ac + B$ ; les différents phénomènes dont il convient de tenir compte ayant été décrits, l'analyse du Rb sert donc en quelque sorte, de test pour l'analyse par spectrométrie de fluorescence X. Les concentrations des deux autres éléments dans les standards internationaux sont moins bien connues : les valeurs recommandées indiquées dans les tableaux sont très proches des valeurs indiquées dans la littérature (Abbey 1975, Abbey 1978, Flanagan 1973); ces valeurs sont les valeurs obtenues au laboratoire, résultats de très nombreux étalonnages effectués sur plusieurs années. Les valeurs "trouvées", résultats de calculs suivant différents critères, concernent une simple série de mesures. Les intensités mesurées sont présentées tableaux 10, 11, 12 et 13 pour Rb, Nb et Zr, ( $K\beta$  et  $K\alpha$ ) respectivement. Le Zirconium a été mesuré à partir de son émission  $K\alpha$ , donc en présence de l'interférence de l'émission de la raie  $K\beta$  du Strontium; il constitue donc l'exemple "interférence spectrale".

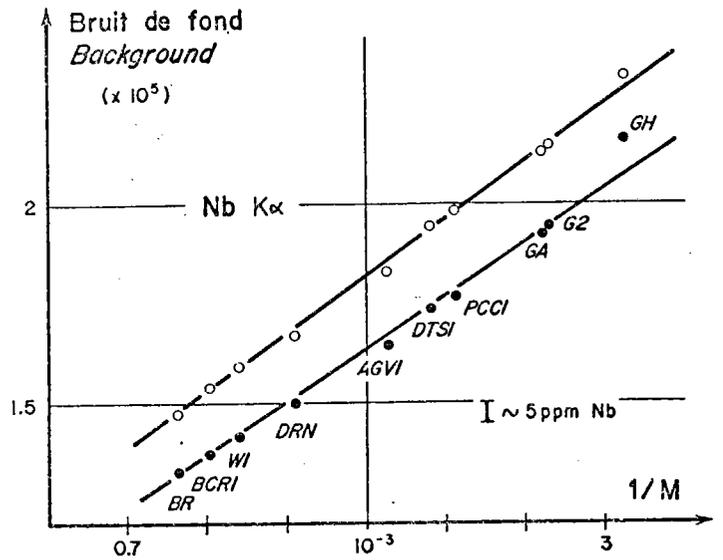
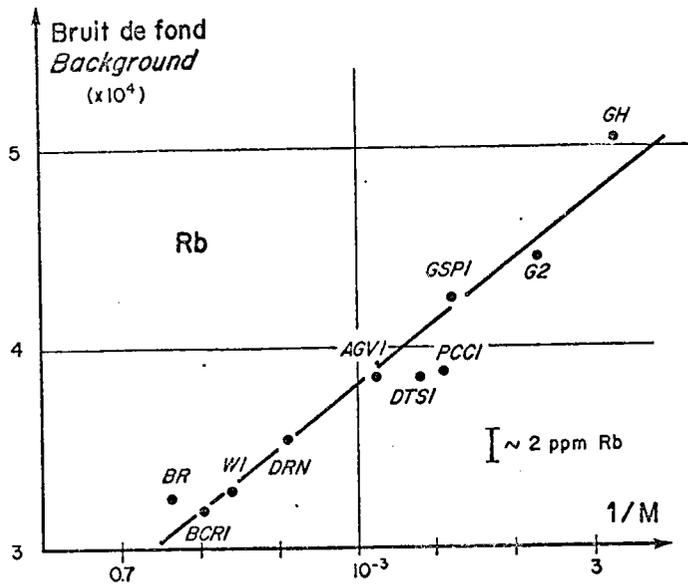


Figure VI.20: Nb; relation bruit de fond  $f(1/M)$ .

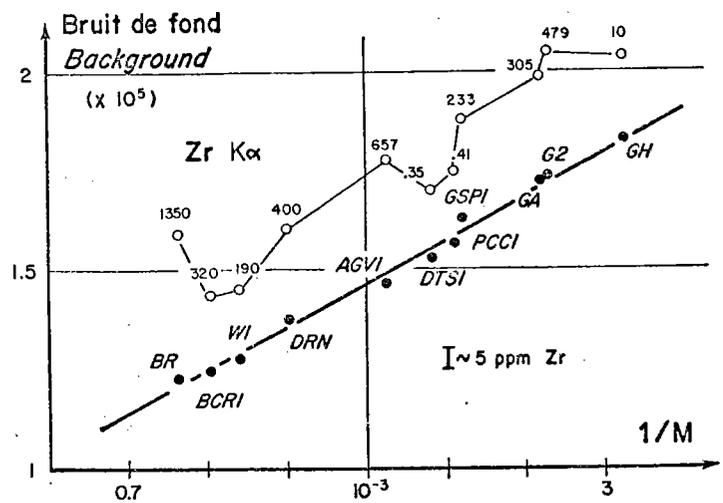
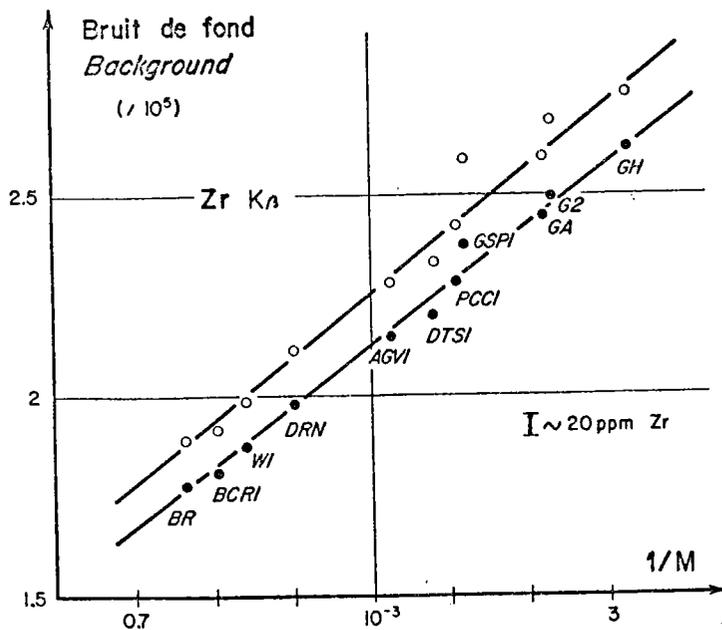


Figure VI.21: Zr ( $K\beta$ ); relation bruit de fond  $f(1/M)$ . Figure VI.22: Zr ( $K\alpha$ ); relation bruit de fond  $f(1/M)$ .

Tableau VI.14

Tableau VI.15

	Recmd	Rb						Recmd	Nb				
		$\alpha = 2.81$		$\sigma < 0.5 \text{ ppm}$					$\alpha = 2.65$		$\sigma < 0.5 \text{ ppm}$		
AGV1	67	67.9	67.5	67.2	67.2	68	AGV1	15	14.6	14.7	14.7	14.7	12.8
BR	45	44.8	46	45.2	45.2	46.8	BR	114	114	113	115	115	114
ECR1	46	46.5	47.4	46.6	46.7	45	BCR1	14.5	14.9	13.6	14.2	13.9	15.3
W1	21	20.9	21.4	21.8	21.9	21.2	W1	8.5	9	7.9	8.3	8.1	9.1
DTS1	0	-1.2	-2	-0.6	-0.6	-0.2	DTS1	0	0	0.3	0.3	0.4	1.9
G2	169	171	170	170	170	171	G2	11	10.1	11	10.7	10.9	10.7
GSP1	254	255	255	253	253	253	PCC1	0	0.8	1.3	1.4	1.4	1.1
PCC1	0	-0.4	-1.4	0.1	0	-0.5	DRN	9	8.2	7.6	7.9	7.7	6.4
DRN	75	74.2	74.5	73.2	73.2	73.4	GH	85	85	87	84	84	88
GH	390	389	389	390	390	391	GA	11	11.1	12	11.6	11.8	11.2

	I <sub>o</sub>	I net				I brut		I <sub>o</sub>	I net				I brut
		$\alpha = 2.81$		$\sigma < 0.5 \text{ ppm}$					$\alpha = 2.65$		$\sigma < 0.5 \text{ ppm}$		
	2382	0	196	0	14265	I <sub>o</sub>	-4250	0	-827	0	42944		
A	848605	844995	557790	557615	570153	A	817107	812477	1270329	1268837	1276650		
B (ppm)	-3.1	1.8	-0.3	3	39.5	B (ppm)	.4	-0.7	.2	-0.79	156.6		
r <sup>2</sup>	.99993	.99990	.99994	.99994	.99989	r <sup>2</sup>	.99979	.99914	.99963	.99960	.9984		
$\sigma$ (ppm)	.34	.42	.33	.33	.43	$\sigma$ (ppm)	.19	.38	.25	.26	.5		

Rb : résultats exprimés en ppm suivant différents modes de calcul.

Nb : résultats exprimés en ppm suivant différents modes de calcul.

Tableau VI.16

Tableau VI.17

	Recmd	Zr Zr K $\beta$					Recmd	Zr			
		$\alpha = 2.65$						$\alpha = 2.65$			
AGV1	220	220.3	220.4	207.4	AGV1	220	220	221	220	Zr Ka $\sigma < 1.5 \text{ ppm}$  Interférence : Sr K $\beta$ $K = \frac{A_{Sr}}{A_{Zr}} = 0.0848$	
BR	265	265.7	264.1	266.6	BR	265	266	267	273		
BCR1	185	184.4	183.1	177.1	BCR1	185	184	185	180		
W1	100	99.2	98.2	104.7	W1	100	98	98	94		
DTS1	3	5.8	6.2	3.3	DTS1	3	8.8	8.7	8		
G2	300	301.0	301.9	302.8	G2	300	295	295	297		
GSP1	512	512.3	512.7	518.2	GSP1	512	516	516	512		
PCC1	7	7.0	7.5	16.9	PCC1	7	8.4	8.2	8.1		
DRN	130	129.4	128.8	134.8	DRN	130	128	128	129		
GH	140	139.8	141	136.1	GH	140	135	134	136		
GA	140	137.1	138	134.1	GA	140	143	143	147		

	I <sub>o</sub>	I net			I brut		I <sub>o</sub>	I net			I brut
		$\alpha = 2.65$		$\sigma < 1.5 \text{ ppm}$				$\alpha = 2.65$		$\sigma < 1.5 \text{ ppm}$	
	-977	0	58608	I <sub>o</sub>	3030	0	52282				
A	187565	1877584	210280	A	893773	895480	914694				
B (ppm)	-4.6	-9.8	735	B (ppm)	-8	-5.8	107				
r <sup>2</sup>	0.99991	.99986	0.9977	r <sup>2</sup>	.99938	.99913	.9989				
$\sigma$ (ppm)	0.43	.54	2.15	$\sigma$	1.13	1.34	1.47				

Zr (K $\beta$ ) : résultats exprimés en ppm suivant différents modes de calcul.Zr (K $\alpha$ ) : résultats exprimés en ppm suivant différents modes de calcul.

Les résultats - en concentrations - obtenus à partir de ces mesures sont présentés tableaux 14 (Rb), 15 (Nb), 16 (Zr, K $\beta$ ) et 17 (Zr, K $\alpha$ ). Pour Rb et Nb, cinq résultats différents à partir des mesures (tableaux 10 et 11) sont proposés, en considérant soit l'intensité nette (pic - fond), soit simplement l'intensité brute (pic) en considérant  $\alpha$  entrant dans la relation donnant l'effet de matrice  $M = \sum_i^{\alpha} c_i$  égal à 2,65 ou 2,81 et en imposant ou non dans le cas "Intensités nettes" le paramètre  $I_0$  de la relation  $(I - I_0)M = Ac + B$  égal à zéro.

Suivant les hypothèses choisies, les paramètres A et B sont indiqués, ainsi que  $r^2$ , coefficient de corrélation et  $\sigma$  dispersion moyenne des points autour de la droite d'étalonnage exprimée en ppm.

Dans le cas des mesures du Zr sur la raie K $\beta$ , on constate que les résultats obtenus à partir de la mesure simple sur pic brut sont moins bons que les résultats obtenus sur pic net ( $\sigma = 2,15$  et  $0,5$  respectivement). Ceci signifierait que la loi liant bruit de fond et effet de matrice :

$$I_f = \frac{B_f}{M} + I_{of}$$

implicitement supposée lors du traitement des mesures par  $(I - I_0)M = Ac + B$  n'est pas suffisamment précise dans ce cas. En fait, si on compare la figure 20 et la figure 21, bruits de fond mesurés pour Nb et Zr (K $\beta$ ) respectivement en fonction de  $1/M$ , on constate que les corrélations sont aussi bonnes dans un cas que dans l'autre. Par contre, les dispersions des points ne correspondent pas dans chaque cas à un équivalent Nb ou Zr exprimé en ppm identique : ceci correspond tout simplement aux efficacités d'excitation des raies K $\alpha$  supérieures à celles des raies K $\beta$ .

La dispersion des points, bruit de fond =  $f(1/M)$ , est très vraisemblablement dûe en grande partie à l'homogénéité cire-échantillon (rayonnement Compton dépendant fortement du numéro atomique). Cette dispersion est d'autant plus critique, pour obtenir une précision de mesure équivalente à une méthode pic net, qu'elle correspond à une concentration de l'élément considéré plus importante (comparaison Fig.20 et 21).

La limitation de l'emploi de la méthode "Pic brut" se situe donc au niveau du rapport  $\sigma_f/A$ ,  $\sigma_f$  : dispersion b.d.f =  $f(1/M)$  sur A : sensibilité intensité / concentration.

Dans le cas des mesures Zr K $\alpha$ , les bruits de fond en fonction de  $1/M$ , sont portés figure 22 : l'un des bruits de fond est sensible à l'interférence de la raie K $\beta$  du Strontium. L'autre bruit de fond montre une corrélation vis à vis de  $1/M$  comparable à ce qui a été montré pour Nb et Zr (K $\beta$ ). La sensibilité (5ppm) mentionnée figure 22 permet de penser que, connaissant la contribution du Sr K $\beta$  sur la raie mesurée, l'utilisation de la méthode "Pic brut" devrait être aussi bonne que la méthode "Pic net". C'est effectivement ce que montre le tableau 17. Ainsi pourvu que la préparation de l'échantillon soumis à l'analyse ait un rapport  $\sigma_f/A$  satisfaisant, il est possible de mesurer la concentration d'un élément trace à l'aide de la méthode "Pic brut" même s'il existe une interférence spectrale.

Tableau VI.18

	Rb			Sr			
	Fluo. X		A.A.	Fluo. X		A.A.	D.I.
	a	b		a	b		
P48			40	887	886	853	876
P112	137	138	132	536	535	530	546
P254	125	126	119	616	616	618	632
P250	136	137	139	287	289	306	297
P255	216	217	204	304	304	305	315
P292	624	618	608	2.2	3	<20	1.5
P293	630	627	625	2.6	4	<20	1.9

Fluo. X : a) méthode pic net - b) méthode pic brut

A.A. : Absorption atomique : données Dupuy - Montpellier

D.I. : Dilution isotopique : données Briquieu - Lancelot -  
Montpellier.

Tableau VI.19

unité	x	Co XRF	Co NAA	Ni XRF	Ni NAA	Zr XRF	Zr NAA
395 A2	6	48.6 ± 1	49.7 ± 0.5	176 ± 4	185 ± 3	116 ± 3	118 ± 11
395A A2	6	49.5 ± 0.8	49.6 ± 0.5	178 ± 5	182 ± 9	110 ± 2	115 ± 15
395A A3	15	42.7 ± 1.5	43.4 ± 0.7	117 ± 4	118 ± 4	126 ± 5	132 ± 9
395A A4	4	46.8 ± 1.3	47.3 ± 0.6	172 ± 6	176 ± 5	111 ± 6	115 ± 4

x : nombre d'échantillons analysés dans l'unité lithologique.

XRF : spectrométrie de fluorescence X COB (Ni et Zr, résultats obtenus à bord du Glomar Challenger).

NAA : activation neutronique P. Sue : Treuil et Joron.

## 5-F- CONCLUSION SUR L'ANALYSE DES ELEMENTS TRACES PAR SPECTROMETRIE DE FLUORESCENCE X -.

Le dernier exemple d'application donné dans le paragraphe précédent, permet de faire le point sur la méthode d'analyse proposée.

- L'effet de matrice : sa détermination précise est un point clé pour déduire une concentration de la mesure d'une intensité. Constatant que l'effet de matrice n'a besoin d'être déterminé qu'à une constante de proportionnalité près, pour les éléments de numéro atomique supérieurs à 27, l'effet de matrice M peut s'exprimer par :

$$M = \sum_i Z_i^\alpha c_i$$

$Z_i$  : numéro atomique de l'élément majeur i,

$c_i$  : concentration de l'élément i,

$\alpha$  : paramètre compris entre 2,65 et 2,81, la valeur choisie n'étant pas critique pour la détermination précise de la concentration de l'élément trace considéré.

- L'interférence instrumentale : la spectrométrie de fluorescence X présente la particularité d'avoir un "blanc instrumental" fonction de deux termes : l'un est une constante, l'autre dépend de l'échantillon par son effet de matrice suivant la relation :

$$(I - I_0)M = Ac + B$$

Cette relation peut être étendue à la détermination d'une concentration à partir de la mesure d'un pic brut (sans déduction de bruit de fond) en interprétant le bruit de fond comme un "blanc instrumental".

Une interférence spectrale, à condition d'en tenir compte par le calcul, ne gêne pas dans l'application de cette relation.

- La précision : pour les concentrations comprises entre 0 et 150 ppm, la précision absolue est comprise entre  $\pm 1$  et  $\pm 3$  ppm; pour les concentrations supérieures à 150 ppm, la précision relative est de l'ordre de 1 à 2%. Le tableau 18 présente les résultats de Rubidium et de Strontium obtenus par deux ou trois méthodes différentes : spectrométrie de fluorescence X (méthodes "pic net" ou "pic brut"), spectrométrie d'absorption atomique et spectrométrie de masse (dilution isotopique). Le tableau 19 présente les résultats d'analyse de quatre unités aphyriques du site 395 D.S.D.P. pour trois éléments obtenus par spectrométrie de fluorescence X et par analyse par activation neutronique.

## BIBLIOGRAPHIE

-----

- ABBEY, S. 1975 - Studies in "Standard samples " of silicate rocks and minerals - Part 4 : 1974. Edition of "Usable" Values, Geological survey of Canada paper 74 41.
- ABBEY, S. 1978 - IV Studies in Standard samples : for use in the general Analys of Silicate rocks and minerals. Part 5 : 1977. Edition of "Usable" Values.
- ANDERMANN, G. and KEMP, J.W. 1958 - Scattered X rays as internal standards in X ray emission spectroscopy. Anal. Cham. 30, 1306 - 1309.
- BERSTEIN, F. (1963) - Particle size and mineralogical effects in mining applications Advan. X ray Anal. 6, 436 -445.
- BOUGAULT, H. 1977 - Major elements : analytical chemistry onboard and preliminary results - In AUMENTO, F. and MELSON, W. Initial reports of the deepsea Drilling Project. vol.37, p.643-652.
- BOUGAULT, H., CAMBON, P. and TOULHOUAT, H; 1977 - X ray spectrometric analysis of trace elements in rocks - Correction for instrumental interferences X ray spectrometry. vol.6, n°2, p.66-72.
- BRINDLEU, G.W. (1945) - The effect of grain or particle size or X ray reflexions from mixed pouders and alloys, considered in relation to the quantitative determination of crystalline substance by X ray methods. Phil. Mag. 36, 347, 359.
- CHAMPION, K.P., TAYLOR, J.C. and WITTEM, R.N. 1960 - Rapid X ray fluorescence determination of traces of strontium in samples of biological and geological origin. Analytical Chemistry, vol.38 n°1, p.109-112.
- CHAPPEL, B.W., COMPSTON, W., ARRIENS, P.A. and VERNON, M.J. 1969 - Rubidium and strontium determination by X ray fluorescence spectrometry and isotope dilution below the part per million level. Geochim., Cosmochim. Acta 33, 1002-1006.
- CLAISSE, F. 1962 - Heterogeneity effects in X ray analysis advances in X ray analysis. Proc.1074 Denver conf. 5 :335.
- CLAISSE, F. and QUINTIN, M. 1967 - Can. Spectrosc. 12, 129.
- CLAISSE, F. et SAMSON, C. 1972 - Effet des hétérogénéités en fluorescence des rayons X. Rapport S 67, 1962, Ministère de Richesses Naturelles - Québec - Canada.

CLARK, N.H. and MITCHELL, R.J. 1972 - Scattered primary radiation as an internal standard in X ray emission spectrometry use in the analysis of copper metallurgical products. X ray spectrometry 2, p. 47-55.

CHUNG, F.H., LENTZ, A.J. and SCOTT, R.W. 1974 - A versatile thin film method for quantitative X ray émission analysis. X ray spectrometry vol.3, p. 172-175.

CULLEN, T.J. 1962 - Coherent scattered radiation internal standardisation in X ray spectrometric Analysis of solutions. Anal. chem. vol.34, n°7, p. 812-814.

DELONG, S.E. and Mc CULLOUGH, D. 1973 - Compton scattered aungten X rays as a measure of mass absorption coefficients in rocks. Am. mineral 58, p. 1073-1075.

FABBI, B.P. 1972 - Arefined fusion X ray fluorexcence technique and determination of major and minor elements in silicate standard. Am. min. 57 : 237.

FAUBAIRN, H.W. and HURLEY, P.M. 1971 - Evaluation of X ray fluorescence and mass spectrometric analyses of Rb and Sr in some silicate standards. Geochim. Cosmochim. acta, vol.35, p. 149-156.

FEATHER, C.E. and WILLIS, J.P. (1976) - A simple method for background and matrix correction of spectral peaks in trace element determination by X ray fluorescence spectrometry. X ray spectrometry 5 : 41-48.

FLANAGAN, F.J. 1973 - Geochim. cosmochim. acta 37, 1189.

GOLMAN, M. and ANDERSON, R.P. 1965 - X ray fluorescence determination of Strontium in biologic materials by Direct matrix-transmittance correction analytical.

GOVINDARAJU, K. 1973 - X ray spectrometric determination of major elements in silicate rock semples, using a thin film technique based on ion exchange dissolution. X ray spectrometry 2, p. 57-62.

GUNN, E.L. (1955) - Anal. chem. 27, 1857.

GUNN, F.L. 1960 - Advances in X ray analysis 4, 382.

HARVEY, P.K., TAYLOR, D.M., HENDRY, R.D. and BANCROFT, F. 1973 - An accurate fusion method for the analysis of rocks and chemically related materials by X ray fluorescence spectrometry. X ray spectrometry, vol.2, p. 33-44.

HOWER, J. (1959) - Matrix corrections in the X ray spectrographie trace element analysis of rocks and minerals. The Am. mineral. vol.44, p. 19-32.

HUNTER, C.B. and RHODES, J.R. 1972 - Particle size effects in X ray emission analysis. Formulae for continuons size distributions. X ray spectrometry 1, p. 107-112.

HUTTON, J.T. and NORRISH, K. 1977 - Plant analyses by X ray spectrometry II elements of atomic number geater than 20. X ray spectrometry vol. 6, N°1, p. 12-17.

INGAMELLS, C.O. (1970) - Lithium metaborate in silicate analysis. Anal. chim. Acta 52, p. 323-334.

JENKINS, R. and DE VRIES, J.L. 1970 - Practical X ray spectrometry . Second edition Philips technical library.

JOHNSON, C.M. and STOUT, P.R. 1958 - Fluorescent X ray spectrometry, interferences from Compton scattering from matrices of low atomic nomber. Anal. chem. 30, 1921.

KALMAN, Z.H., HELLER, L. 1962 - Theoretical study of X ray fluorescent determination of trace of heavy elements in light matrix. Anal. chem. 34, p. 946-951.

LACHANCE, G.R. and TRAILL, R.J. (1966) - Can. spectro. X 11. 43.

LEONI, L. and SAITTA, M. 1977 - Matrix effect corrections by Ag K $\alpha$ . Compton scattered radiation in the analysis of rock samples for trace elements. X ray spectrometry vol.6, p. 181-186.

LEROUX, J., THIN, T.P., 1977 - Tables révisées des coefficients d'absorption massique des Rayons X. Claisse scientific corporation.

NESBIT , R.W., HASTINS, H., STOLZ, G.W. and BRUCE, D.R. (1976) - Matrix corrections in trace elements analysis by X ray fluorescence : an extension of the Compton scattering technique to long wavelenghts. Chem. geol. 18, p. 203-213.

NORRISH, K. and HUTTON, J.T. 1969 - An accurate X ray spectrographic method for the analysis of a wide range of geological samples. Geochimia et cosmochimica acta vol. 33, p. 431-453.

PRICE, N.B. and ANGELL, G.R. 1968 - Determination of minor elements in rocks by thin film X ray fluorescence rechniques. Analytical chemistry T 40, vol. 3, p. 660-663.

QUINTIN, M. 1969 - L'influence de la granulométrie et des localisations minéralogiques dans le dosage par fluorescence X des éléments en traces dans les roches. Colloque Rayons X et Sciences de la terre - Monaco 1969 - p. 32-34.

REYNOLDS, R.C. 1963 - Matrix correction in trace element analysis by X ray fluorescence. Estimation of the mass absorption coefficient by Compton scattering. The American mineralogist vol. 48 p. 1133-1143.

REYNOLDS, R.C. (1967) - Estimation of mass absorption coefficient by Compton scattering : improvements and extensions of the method. Am mineral 52, p. 1493-1502.

RINALDI, F.F. and AGUZZI, P.E. 1967 - A simple technique for casting glass disks for X ray fluorescence analysis. Spectro. chim. Acta vol. 23B.

ROSE, H.J. (1964) - U.S. Geol. Surv. Papers 501A, 198.

ROSE, H.J., ADLER, I. and FLANAGAN, J.F. (1962) - Use of  $\text{La}_2\text{O}_3$  as a heavy absorber in X ray fluorescence analysis of silicate rocks. U.S. Geol. Survey Prof. Papers 450B, p. 80-82.

RYLAND, A.L. 1964 - A general approach to the X ray spectroscopic analysis of samples of low atomic number. Abstr. Amer. chem. Soc. Ann. Meet.

SHERMAN, J. (1955) - Theoretical derivation of fluorescent X ray intensities from mixtures spectrochim. acta 7, p. 283.

STEPHENSON, D.A. 1969 - An improved flux-fusion technique for X ray emission analysis. Anal. chem. vol. 41, n°7.

STRASHEIM, A. and BRANDT, A.P. (1968) - A quantitative fluorescence method for the determination of minor and trace elements in geological samples using a correction technique for the matrix effects. Spectrochim. acta vol. 23B, p. 535-541.

TERTIAN, R. 1968 - Sur la détermination quantitative précise des éléments légers par fluorescence X; une comparaison des méthodes de fusion. Spectrochim. Acta 41, p. 554-556.

TERTIAN, R. (1969) - Quantitative chemical analysis with X ray fluorescence spectrometry an accurate and general mathematical correction method for the interelement effects. Spectrochim. acta 24B, p. 447-471.

TERTIAN, R. 1969 - Sur l'effet de matrice en fluorescence et sa correction dans le cas des milieux homogènes. Revue du G AMS n°1, p. 49.

TERTIAN, R. et GEMINASCA, R. 1972 - Analyse des roches par une méthode de fluorescence X comportant une correction précise pour l'effet interélément. X ray spectrometry. (preprint).

TERTIAN, R. et VIE LE SAGE, R. (1976) - The equivalent wavelength notion : definition, properties, applications. X ray spectrometry vol. 5, p. 73-83.

VERDURMEN, E.A.TH. 1977 - Accuracy of X ray fluorescence spectrometric determination of Rb and Sr concentrations in rock samples. X ray spectrometry vol.6, n°3, p. 117-122.

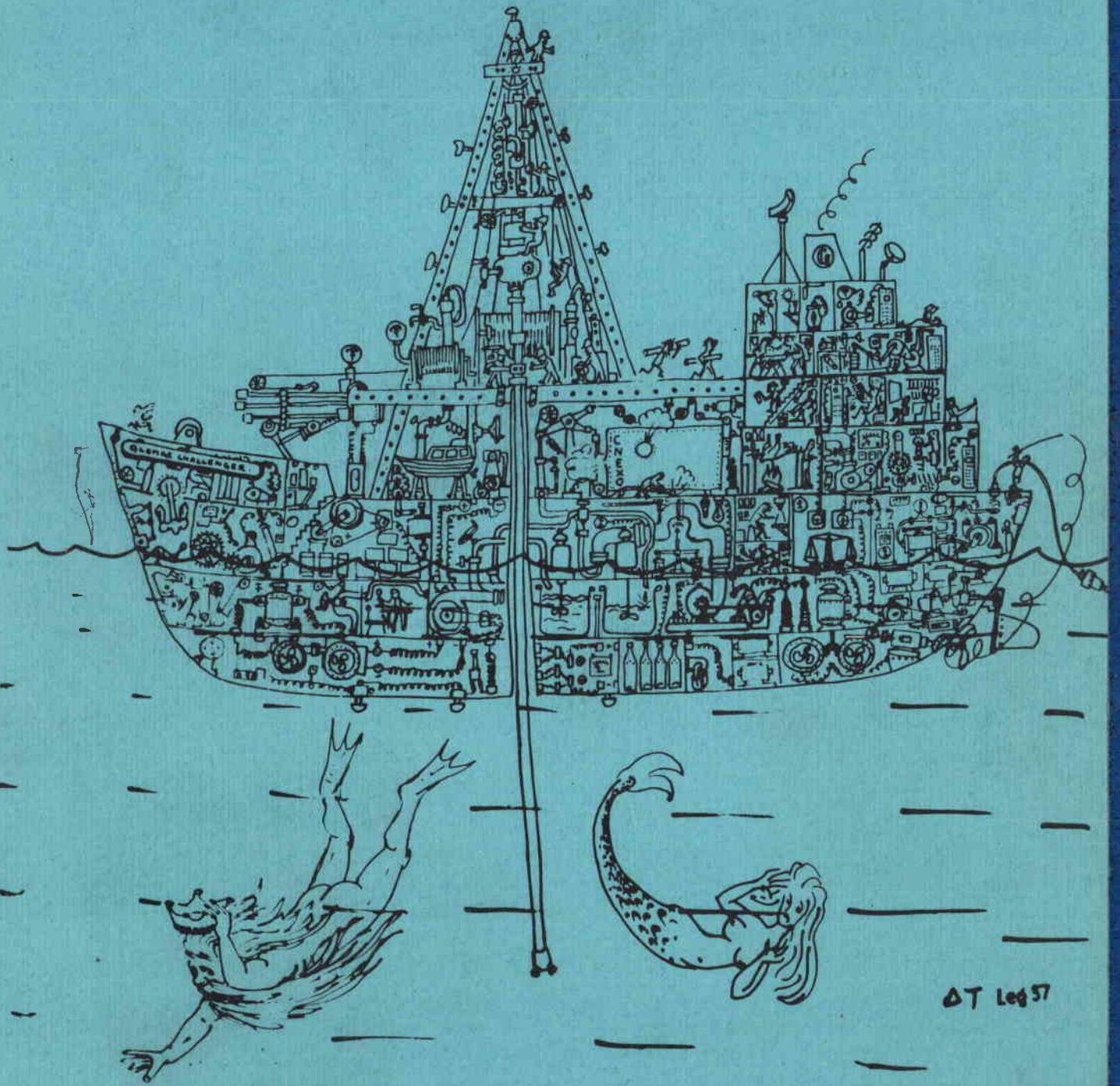
WALKER, D. (1973) - Behavior of X ray mass absorption coefficients near absorption edges : Reynolds' method revisited. Am. mineral 58, p. 1069-1072.

WELDAY, E.E., BAIRD, A.K. Mc INTYRE, D.B. and MADLEM, K.W. 1964 - Dpt. of geol. Pomona college. Claremont, California. Silicate sample preparation for light-element analysis by X ray spectrography. The American mineralogist vol 49, p. 889-903.

WILBAND, J.T. 1975 - Rapid method for background corrections in trace element analysis by X ray fluorescence : an extension of Reynold's method. American mineralogist vol. 60, p. 320-323.

WITTMANN, A. CHMELEFF, J. and HERMANN, H. 1974 - Préparation automatisée de perles pour l'analyse par fluorescence de Rayons X. X ray spectrometry vol. 3, p. 137-142.

WYROBISCH (1977) - Comparaison of two background correction procedures for X ray fluorescence trace element analysis of some standard samples. Geostandards Newsletter vol. 1, p. 107-110.



DT 1957