

Évidence de la cristallisation fractionnée au niveau d'une ride médio-océanique : Co, Ni, Cr, FAMOUS, leg 37 du DSDP *

par HENRI BOUGAULT **

Mots clés. — Concentration, Co, Ni, Cr, Basalte, Tholéiitique, Dorsale, Cristallisation fractionnée, DSDP-IPOD (Leg 37), Expédition croisière (FAMOUS), Dorsale Atlantique Nord.

Résumé. — Les concentrations d'éléments à fort coefficient de partage, Co, Ni, Cr ne varient pas ou peu dans la phase solide et la phase liquide au fur et à mesure du processus de fusion partielle. Pour le nickel et le cobalt, ces concentrations sont indépendantes de la nature du solide initial et du modèle de fusion choisi. Quantitativement, la valeur théorique de la concentration de ces éléments dans le liquide correspond à la concentration trouvée sur des échantillons tholéiitiques non différenciés.

De ce fait, les larges variations des concentrations en chrome et nickel dans les tholéiites océaniques reflètent le phénomène de cristallisation fractionnée. Le cobalt d'une part, nickel et chrome de l'autre fournissent des contraintes vis-à-vis de la proportion des minéraux principaux qui cristallisent. —

Abstract. — The concentrations of high partition coefficient elements Co, Ni, Cr do not vary or vary little in the solid phase and the liquid phase as partial melting proceeds. For nickel and cobalt concentrations do not depend on the nature of the solid and the model of partial melting chosen. Quantitatively, the calculated value of the concentrations of these elements in the liquid agrees with the concentrations found for undifferentiated tholeiitic samples.

In so far, large variations of chromium and nickel found in oceanic tholeiites evidence the fractional crystallization process. Cobalt on one hand, nickel and chromium on the other give constraint in regard of the proportions of principal minerals crystallizing. —

INTRODUCTION.

Trois phénomènes principaux interviennent dans la genèse d'un liquide basaltique : la nature du solide avant fusion, la fusion partielle et la cristallisation fractionnée. La composition d'un basalte, majeurs, mineurs ou éléments trace dépend des paramètres relatifs aux trois phénomènes mentionnés ci-dessus. Si la concentration de certains éléments varie peu vis-à-vis de deux d'entre eux (par exemple nature du solide initial, et fusion partielle) mais varie beaucoup en fonction du troisième (cristallisation fractionnée), l'étude de ces éléments doit permettre de « tracer » préférentiellement un seul phénomène (cristallisation fractionnée). On se propose de montrer que Cr et Ni permettent de « tracer » le phénomène cristallisation fractionnée au niveau d'une dorsale médio-océanique.

ASPECT THÉORIQUE.

Il a déjà été montré par Treuil et Joron [1975] que les éléments à faible coefficient de partage

peuvent tracer le phénomène cristallisation fractionnée.

$$\frac{CL}{CL_0} = \frac{1}{F}$$

CL : concentration de l'élément dans le liquide ;
CL₀ : concentration dans le liquide initial ;
F : fraction de liquide.

Différents échantillons peuvent être classés qualitativement et quantitativement les uns par rapport aux autres du point de vue cristallisation fractionnée, à condition que ces échantillons dérivent d'un même liquide ou de liquides produits par même taux de fusion (même CL₀). Il convient en effet de remarquer que pour les éléments à faible coefficient

* Contribution n° 554 du Dept. scientifique, Centre océanologique de Bretagne.

** Centre océanologique de Bretagne, B.P. 337, 29273 Brest.

Note présentée oralement le 6 décembre 1976, manuscrit définitif remis en décembre 1977.

de partage, CL_0 varie largement avec le taux de fusion partielle et avec la nature du solide initial [Joron *et al.*, 1976]. Pour ces raisons, et bien que donnant des informations très utiles vis-à-vis de la cristallisation fractionnée, les éléments à faible coefficients de partage sont en définitive très utilisés pour apprécier taux de fusion partielle et nature du solide avant fusion.

Pour montrer que nickel et chrome tracent préférentiellement le phénomène cristallisation fractionnée, il est nécessaire de montrer dans un premier temps que leurs concentrations dans les liquides initiaux (avant cristallisation fractionnée) dépendent peu de la fusion partielle et de la nature du solide initial. Pour ce faire, on considérera deux modèles différents de fusion partielle :

a) l'ensemble du liquide produit reste en équilibre avec le solide en fusion [Shaw, 1970].

$$\frac{CL_0}{CS_0} = \frac{1}{D_0 + F(1 - P)}$$

CL_0 : concentration dans le liquide, considérée comme concentration initiale avant le processus de cristallisation fractionnée ; CS_0 : concentration du solide ; F : fraction de liquide produit ; D_0 : coefficient de partage global du solide initial ; P : coefficient de partage global de la fraction du solide qui fond ;

$$D_0 = \sum X_i P_i$$

$$P = \sum X F_i P_i$$

X_i : proportion initiale du minéral i ; P_i : coefficient de partage du minéral i ; $X F_i$: proportion du minéral i dans la fraction de solide qui fond.,

b) le liquide est séparé au fur et à mesure qu'il est produit ; le solide est en équilibre avec l'élément de liquide

$$\frac{[CL_0]}{CS_0} = \frac{1}{D_0} \left[1 - \frac{PF}{D_0} \right]^{\frac{1}{P} - 1}$$

$[CL_0]$ étant la concentration de l'élément liquide produit. Si CL_0 est la concentration moyenne de l'ensemble du liquide regroupé dans une chambre magmatique,

$$\frac{CL_0}{CS_0} = \frac{1}{F} \left[1 - \left(1 - \frac{PF}{D_0} \right)^{\frac{1}{P}} \right]$$

A titre d'exemples, pour tester la variation possible du rapport $\frac{CL_0}{CS_0}$, deux compositions différentes A et B du solide initial ont été choisies [Allègre *et al.*, 1973] ; la proportion initiale des minéraux est présentée tableau I, ainsi que la proportion des minéraux qui fondent et les coefficients de partage

		OL	OPX	CPX	PLAG	GRT	SP
		coefficients de partage					
Cr		1	7.3	13	0.02	7	220
Ni		12.6	6.1	4.4	0.06	0.1	19.6
Co		3	2.08	1.32	0.1	2.2	5.1
		proportions des minéraux					
A	X_i	0.5	0.25	0.2	0.00	0.00	0.05
	$X F_i$	0.05	0.05	0.8	-	-	0.10
étape 1	X_i	0.55	0.30	0.12	0.00	0.01	0.02
	$X F_i$	0.05	0.05	0.7	-	0.1	0.1
B	F = 0.1 : disparition du grenat						
	X_i	0.54	0.29	0.05	0.00	0.00	0.01
étape 2	$X F_i$	0.055	0.055	0.77	-	-	0.11

TABLE I. — Coefficients de partage et proportions des minéraux suivant hypothèses A et B (avec grenat).

X_i : proportion du minéral i initiale ; $X F_i$: proportion du minéral i dans la phase solide qui fond.

du Cr, Ni et Co. Les rapports $\frac{CL_0}{CS_0}$ et $\frac{CS}{CS_0}$, CS étant la concentration du solide résiduel, en fonction de F suivant les modèles *a* et *b* et pour les deux compositions initiales du solide A et B sont représentés figure 1 (*a*, *b*, *c*).

Entre 0 et 25 % de fusion partielle, on constate :

Cobalt : $\frac{CL}{CL_0}$ varie entre 0,39 et 0,43 quelle que soit la nature du solide initial et le modèle de fusion choisi.

Nickel : $\frac{CL}{CS_0}$ varie entre 0,103 et 0,120 pratiquement indépendamment de la nature du solide initial et du modèle choisi.

Chrome : on note une différence notable pour une composition initiale donnée entre modèle *a* et *b* (0,22 et 0,44 pour la composition avec grenat B à 25 % de fusion partielle) ; on note également une différence importante entre composition A et B pour un modèle donné (ex. : 0,064 et 0,12 pour le modèle de fusion *a* à 1 % de fusion partielle). On ne peut donc pas comme pour le cobalt et le nickel supposer le chrome indépendant *i*) de la nature du solide avant fusion, *ii*) du type de modèle de fusion choisi et *iii*) du taux de fusion partielle. On pourra néanmoins considérer la concentration du chrome peu dépendante de F à la condition de supposer que la

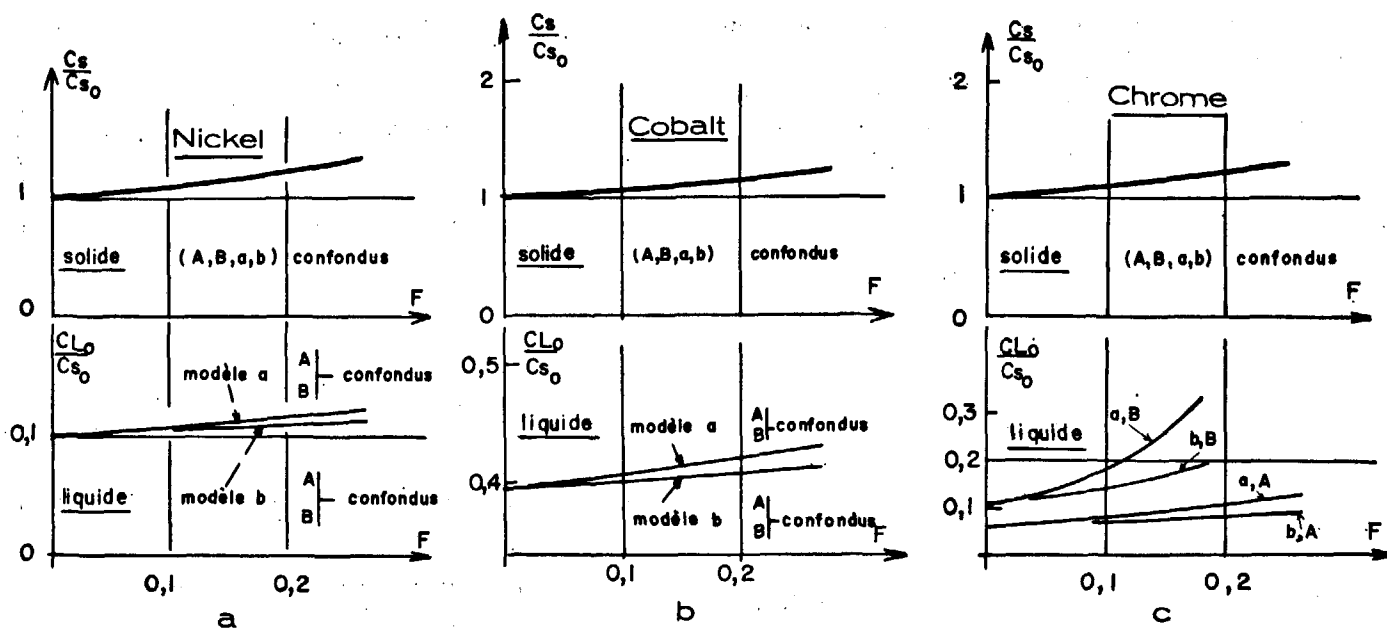


FIG. 1 (a), (b), (c). — Variation du nickel (a), du cobalt (b) et du chrome (c) dans les phases liquides et solides pour les compositions A et B du solide initial et pour les modèles de fusion a et b, au cours de la fusion partielle.

fusion intervient suivant un seul modèle, à partir d'un seul type de solide initial et dans un intervalle de fusion partielle limité (ex. 10 à 15 %).

Ces résultats s'expliquent très bien en considérant la dérivée de l'expression donnant $\frac{CL}{CS_0}$ par rapport à F :

$$\frac{d \frac{CL_0}{CS_0}}{dF} = - \frac{(1 - P)}{[D_0 + F(1 - P)]^2} \quad \text{pour le modèle a}$$

Dans cette expression pour cobalt et nickel, $F(1 - P)$ est petit par rapport à D_0 ; $\frac{CL_0}{CS_0}$ varie donc peu en fonction de F ; de plus, les valeurs de D_0 d'une part et de P d'autre part sont peu dépendantes 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 fusions partielles :

— 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 (ex. : $D_0 = 8,7$ et $P = 32$) et P varie considérablement avec la composition du solide initial notamment 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 partielle, une composition donnée du solide initial et un seul modèle de fusion.

RÉSULTATS, DISCUSSION.

La non-dépendance de la concentration du cobalt, du nickel et en partie seulement du chrome dans le liquide produit par fusion peut être démontrée indirectement en considérant les valeurs des concentrations de ces éléments dans les solides résidus de fusion partielle. La figure 1 (a, b, c) montre la très faible variation des rapports $\frac{CS_0}{CS}$ pour nickel, cobalt et chrome. Ces résultats théoriques obtenus à partir d'hypothèses simples et des valeurs des coefficients de partage sont confirmés par les résultats obtenus pour différentes péridotites (massive, nodules dans des basaltes alcalins, kimberlites) ; les valeurs des concentrations en nickel sont comprises entre 2 000 et 2 200 ppm ; les valeurs en cobalt varient peu autour de 115 ppm [Bougault et Allègre, en préparation] ; les valeurs de chrome sont plus dispersées, mais compatibles avec la théorie déve-

loppée, la concentration de cet élément dépendant largement de la teneur en spinelle.

Pour nickel et cobalt, éléments dont les concentrations dans le liquide (et le solide) varient très peu pendant le phénomène de fusion partielle sans influence notable du type de solide initial, deux constatations viennent confirmer la théorie soutenue :

Cobalt : cet élément varie peu également avec la cristallisation fractionnée (voir plus loin ; les concentrations dans les tholéiites océaniques sont comprises entre 40 et 50 ppm). Le rapport trouvé pour $\frac{CL_0}{CS_0}$ est de 0,41 ; en prenant une valeur moyenne pour CS_0 de 115 ppm trouvée dans les péridotites, on obtient pour CL_0 47 ppm.

Nickel : les quelques échantillons pouvant être considérés comme non différenciés par cristallisation fractionnée (FAMOUS : Mont de Vénus) et de ce fait représentatifs d'un liquide produit par fusion partielle ont une concentration de 250 ppm. Le rapport trouvé pour $\frac{CL_0}{CS_0}$ est de 0,115 ; en prenant une valeur moyenne pour CS_0 de 2 100 ppm trouvée dans les péridotites, on obtient pour CL_0 : 241 ppm.

Le même calcul peut être fait pour le chrome ; la valeur 600 ppm observée dans les échantillons non différenciés de la zone FAMOUS est en accord avec la théorie ; on observera toutefois dans ce cas que la démonstration est moins probante quantitativement que pour le nickel et le cobalt, puisque les concentrations de chrome dans le liquide dépendent du type de solide initial et du modèle de fusion choisi.

On peut donc considérer que les résultats expérimentaux aussi bien sur les péridotites (solide-résidu de fusion partielle) que sur les basaltes non différenciés confirment la théorie développée et que les très larges variations de nickel et de chrome observées dans une même zone géographique FAMOUS (tabl. II a, b, c) et leg 37 du DSDP [Bougault, 1977] reflètent dans une très large mesure le phénomène de cristallisation fractionnée.

Le liquide initial ayant une concentration en cobalt, nickel et chrome indépendante du processus de fusion partielle (aux réserves près mentionnées pour le chrome), comment vont évoluer les concentrations de ces éléments au cours du processus de fusion partielle ? Compte tenu des différences importantes entre les valeurs des coefficients de partage entre minéraux (tabl. I), la concentration de ces éléments au cours de la cristallisation dépend largement des proportions des minéraux principaux qui peuvent cristalliser olivine, spinelle, clinopyroxène et plagioclase.

La concentration en cobalt varie peu (50 à 40 ppm) avec la cristallisation fractionnée [pour les mêmes échantillons MgO varie de 11 à moins de 7 %,

Bull. Soc. géol. Fr., 1977, n° 6

	Cr	Co	Ni		Cr	Co	Ni
ARP 73 1 et 4	600	40	260	ARP 74 10-16	625	43	240
ARP 73 2	130	42	78	" 10-16 *	612	46	247
ARP 73 3 (picrite)	640	72	900	" 11-17	473	42	196
ARP 74 7-5	263	115	115	" 11-18	402	39	159
" 7-5 *	255	123	123	" 12-19	410	39	153
" 7-6	264	46	125	" 12-19 *	406	42	141
" 7-6 *	260	46	122	GYP 74 30-32	1 333		381
" 7-7	265		118	" 30-33	376	44	157
" 7-8	362		144	" 30-33 *	453		159
" 7-9	366		142	" 30-34	1 321		392
" 8-10	170	38	87	" 31-35	640	44	253
" 9-12	612	40	238	" 31-35 *	628	44	255
" 9-13	250	37	93	" 31-36	338		91
" 10-14 *	570		255	" 31-36 *	83		61
" 10-15	548	43	226	" 31-39	370		115
" 10-15 *	530	46	229	" 31-40	360		110

TABLE II. (a). — Cr, Co, Ni (ppm). Échantillons FAMOUS prélevés dans le Rift [Arcyana, 1977].

	Cr	Co	Ni		Cr	Co	Ni
GYP 74 19-06	212		87	ARP 74 13-22	167	41	79
" 22-09	466		242	" 13-23	166		77
" 22-10	658		336	" 13-24	166		82
" 23-11	505		258	" 14-26	123		65
" 27-18-1	535		212	" 14-27	122		68
" 27-20	541			" 14-28-F	127	41	72
" 27-21	536		210	" 14-28-A	122	41	73
" 27-26	435		195	" 14-29	119		66
" 29-30	304		127	" 14-31	401		176
" 29-31-C	399		157	" 14-32	430		183
" 29-31-A	404		164	" 14-33	402		177
				" 16-36	511		163
				" 16-37	1407		718
				" 17-40	131		77
				" 17-41	89		64
				" 18-44-B	80		65

2 b)

2 c)

TABLE II. (b et c). — Cr, Co, Ni (ppm). Échantillons FAMOUS.

b) Faille transformante A ; c) Zone d'intersection [Arcyana, 1977].

Arcyana, 1977]. Cette information interdit de considérer la possibilité de cristallisation importante d'olivine ou de spinelle (valeur du coefficient de partage 3 et 5,1) et impose une contrainte à la proportion des minéraux principaux qui cristallisent en écrivant que le coefficient de partage global P est de l'ordre de l'unité :

$$P = (Ol) \times 3 + (Cpx) \times 1,32 + (Plag) \times 0,1 \approx 1$$

En supposant la loi de Rayleigh vérifiée au cours de la cristallisation, on peut écrire la relation générale suivante qui existe entre chrome et nickel.

$$\log(Cr) = \frac{P_{Cr} - 1}{P_{Ni} - 1} \log(Ni) + C$$

dans laquelle :

P_{Cr} : coefficient de partage global du chrome
 P_{Ni} : coefficient de partage global du nickel
 C : constante.

En supposant P_{Cr} et P_{Ni} constants lors du processus, le graphe de $\log(Cr)$ en fonction de $\log(Ni)$ devrait théoriquement être une droite dont la pente est $\frac{P_{Cr} - 1}{P_{Ni} - 1}$. Ce graphe est représenté figure 2.

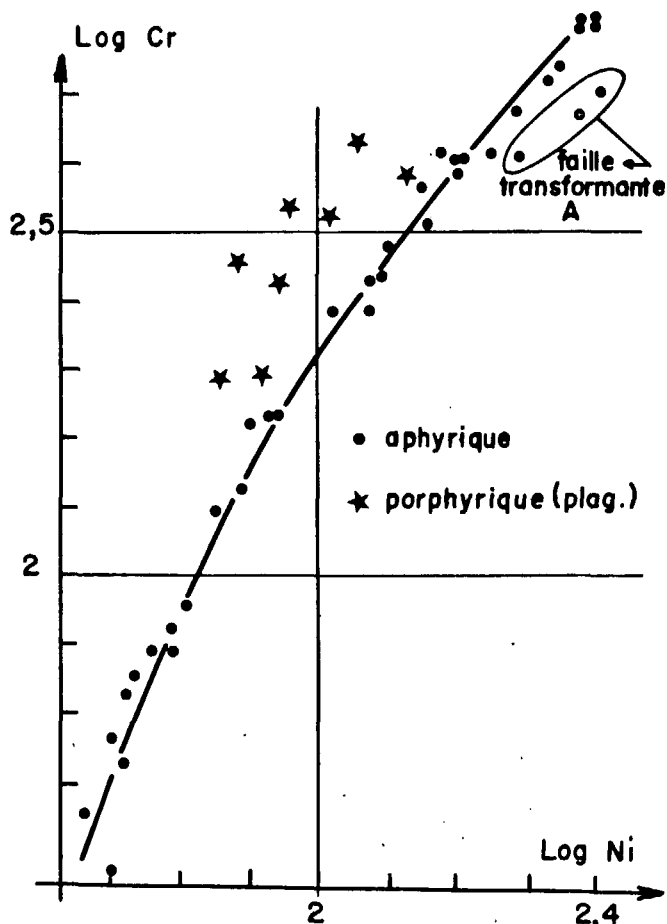


FIG. 2. — $\log Cr = f(\log Ni)$ pour l'ensemble des échantillons de la zone FAMOUS et du leg 37 de DSDP (36° N).

On constate que pour les basaltes aphyriques représentatifs des liquides, la courbe obtenue n'est pas une droite mais une courbe régulière avec une faible dispersion des points. Ce simple fait, régularité et faible dispersion, interdit d'envisager une cristallisation même en faible proportion soit d'olivine seule, soit de clinopyroxène seul, soit de spinelle seul, compte tenu des valeurs élevées des coefficients de partage du nickel et du chrome dans ces minéraux. A titre d'exemple, la cristallisation de 5 % d'olivine seule ferait passer le nickel de 250 ppm à 142 ppm en conservant la même valeur, 600 ppm de chrome. Cette observation confirme la conclusion obtenue à partir du cobalt.

La pente de la courbe $\log(Cr) = f(\log[Ni])$ augmente au fur et à mesure de la différenciation, ce qui correspond à une augmentation du rapport Cpx/Ol . Enfin, quantitativement, la pente de la courbe en un point donné fournit une deuxième contrainte relative à la proportion des minéraux qui cristallisent.

Sur la figure 2 sont également portés des points qui correspondent à des basaltes porphyriques à plagioclase. Bien qu'il ne faille appliquer les formules présentées que pour les liquides, on peut constater que les plagioclases, compte tenu de leurs coefficients de partage faibles vis-à-vis de Ni et Cr, ne peuvent avoir qu'un effet de dilution. L'enrichissement en chrome de ces basaltes par rapport aux basaltes aphyriques ne peut pas être attribué quantitativement aux quelques clinopyroxènes qu'ils contiennent. On peut voir dans cette différence entre l'ensemble des basaltes aphyriques d'une part et ces basaltes porphyriques à plagioclase d'autre part une différence importante de taux de fusion partielle (chrome plus élevé); les basaltes porphyriques à plagioclase correspondraient dans ce cas précis à un taux de fusion partielle beaucoup plus important que l'ordre de grandeur de fusion partielle correspondant aux basaltes aphyriques, comme le suggèrent les faibles concentrations d'éléments à faible coefficient de partage (Ti, Ta, Hf, etc.) [Arcyana, 1977; Joron *et al.*, 1976].

Si Ni et Cr montrent sans ambiguïté l'effet de la cristallisation fractionnée, il convient cependant de signaler que même pour l'ensemble des basaltes aphyriques (fig. 2), ce résultat ne signifie pas que tous les échantillons proviennent d'un même liquide ou de liquides produits par même taux de fusion partielle. En tenant compte des éléments majeurs et des éléments à faible coefficient de partage, seuls les échantillons (ARP 73 (1 et 4), ARP 10-16, CYP 31-35, ARP 9-12) pratiquement identiques ARP 10-15, ARP 11-17 et peut-être ARP 7-5, ARP 7-6, ARP 7-7 peuvent dériver d'un liquide initial identique. La dispersion des points autour de la courbe (fig. 2), plus grande que la précision analytique, outre l'influence possible de quelques phénocristaux (bien que ce point ait été testé par l'analyse de verres, tabl. II), peut être due à quelques variations du taux de fusion partielle (Cr) ou à des mélanges possibles de liquides.

CONCLUSION.

Bien que n'ait pas été abordé l'aspect d'estimation quantitative de la cristallisation fractionnée, l'étude des éléments à fort coefficient de partage Co, Ni, Cr montre clairement le processus de cristallisation fractionnée au niveau d'une dorsale médio-océanique. Les résultats obtenus apportent une contrainte vis-à-

vis des minéraux et des proportions de minéraux qui cristallisent.

Il n'est pas possible qu'olivine seule, clinopyroxène seul ou spinelle cristallisent en proportion appréciable.

Il est nécessaire d'envisager la cristallisation simultanée d'olivine Cpx et plagioclase, la proportion d'olivine diminuant au fur et à mesure de la différenciation pour expliquer la pente et la variation de la pente $\log Cr = f(\log Ni)$.

Références

- ALLÈGRE C. J., MONTIGNY R. et BOTTINGA Y. (1973). — Cortège ophiolitique et cortège océanique, géochimie comparée et mode de genèse. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (7), XV, n° 5-6, p. 461-477.
- 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*, in press.
- BOUGAULT H. (1977). — First transition series elements : fractional crystallization and partial melting. Leg 37 Initial Reports of the Deep-Sea Drilling Project.
- BOUGAULT H. et ALLÈGRE C. J. — Transition elements in mantle peridotites : an evidence for primitive chondritic earth and core differentiation processes (en préparation).
- JORON J. L., BOUGAULT H., TREUIL M. et ALLÈGRE C. J. (1976). — Étude géochimique des roches magmatiques de la zone FAMOUS et de l'archipel des Açores. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (7), t. XVIII, n° 4, p. 811-818.
- SHAW D. M. (1970). — Trace elements fractionation during anatexis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 34, p. 237-243.
- TREUIL M. et JORON J. L. (1975). — Utilisation des éléments hygromagmatophiles pour la simplification et la modélisation quantitative des processus magmatiques : exemple de l'Afar et de la dorsale médio-atlantique. *Soc. Ital. Miner. Petrol.*, Milano, vol. XXXI (1), p. 125-174.