Paragenèses minérales liées à des interactions basalte-sédiment- eau de mer (Sites 465 et 456 des Legs 65 et 60 du D.S.D.P.)

Alain Desprairies, Célestine Jehanno

► To cite this version:

Alain Desprairies, Célestine Jehanno. Paragenèses minérales liées à des interactions basalte- sédiment- eau de mer (Sites 465 et 456 des Legs 65 et 60 du D.S.D.P.). Sciences Géologiques Bulletin, 1983, 36 (2), pp.93-110. 10.3406/sgeol.1983.1630 . hal-03513933

HAL Id: hal-03513933

<https://hal.science/hal-03513933>

Submitted on 6 Jan 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Paragenèses minérales liées à des interactions basalte— sédiment— eau de mer (Sites 465 et 456 des Legs 65 et 60 du D.S.D.P.)

Alain Desprairies, Célestine Jehanno

Abstract

According to the data of deep-sea drillings, the «baking » of sediments at contact with basaltic units has been occasionally mentioned. In the studied samples, transformation of sediment leads to porosity reduction and authigenesis of zeolites (analcite, mordenite, wairakite) and clay minerals (saponite, mixed layer chlorite-smectite, chlorite). The effect of the thermal alteration is similar in sediments and underlying basalts : in both cases the mineral assemblages are contemporaneous and related to moderate-temperature fluids (90 °C to 250 °C).

Résumé

Les forages océaniques profonds ont mis plusieurs fois en évidence l'évolution, par un phénomène de «cuisson », de sédiments au contact d'unités basaltiques. Dans les deux exemples présentés, la transformation du sédiment se manifeste par son induration et le développement d'une paragenèse à zéolites (analcime, mordenite, wairakite) et à phyllosilicates (smectite magnésienne, interstratifiés chlorite-smectite, chlorite). L'intensité et la spécificité de ces transformations sont à mettre en rapport avec les altérations rencontrées dans les basaltes supportant les sédiments. Dans les deux faciès, les paragenèses sont contemporaines et caractéristiques de fluides de «moyenne température » (90 °C à 250 °C).

Citer ce document / Cite this document :

Desprairies Alain, Jehanno Célestine. Paragenèses minérales liées à des interactions basalte— sédiment— eau de mer (Sites 465 et 456 des Legs 65 et 60 du D.S.D.P.). In: Sciences Géologiques. Bulletin, tome 36, n°2-3, 1983. Interaction des basaltes et de l'eau de mer à basse température. pp. 93-110;

doi : <https://doi.org/10.3406/sgeol.1983.1630>

https://www.persee.fr/doc/sgeol_0302-2692_1983_num_36_2_1630

Fichier pdf généré le 15/06/2018

PARAGENÈSES MINÉRALES LIÉES A DES INTERACTIONS BASALTE—SÉDIMENT—EAU DE MER (SITES 465 ET 456 DES LEGS 65 ET 60 DU D.S.D.P.)

Alain DESPRAIRIES* et Célestine JEHANNO**

RÉSUMÉ — Les forages océaniques profonds ont mis plusieurs fois en évidence l'évolution, par un phénomène de « cuisson », de sédiments au contact d'unités basaltiques. Dans les deux exemples présentés, la transformation du sédiment se manifeste par son induration et le développement d'une paragenèse à zéolites (analcime, mordenite, waïrakite) et à phyllosilicates (smectite magnésienne, interstratifiés chlorite-smectite, chlorite). L'intensité et la spécificité de ces transformations sont à mettre en rapport avec les altérations rencontrées dans les basaltes supportant les sédiments. Dans les deux faciès, les paragenèses sont contemporaines et caractéristiques de fluides de « moyenne température » (90 °C à 250 °C).

Altération, Hydrothermalisme, Basalte, Sédiment, Zéolites, Argiles

Dans les séries prélevées par les forages océaniques profonds, il a parfois été signalé une forte induration des sédiments déposés sur la croûte océanique ou situés entre des sills basaltiques (Legs 48-60-65 du Deep Sea Drilling Project). Des transformations minéralogiques liées à ce phénomène ont déjà été décrites dans les « Initial Reports » du D.S.D.P. (NATLAND et HEKINIAN, 1981 ; RANGIN *et al.*, 1983). Nous avons voulu étudier plus particulièrement la cristallogénèse des différents minéraux résultant de ces transformations et relier les paragenèses observées, tant dans le basalte que dans les sédiments, à des paramètres physico-chimiques (température, solutions altérantes).

I — TECHNIQUES D'ANALYSE

Les techniques d'analyse ont été choisies en tenant compte des faibles quantités d'échantillons dont nous disposions.

— Les déterminations minéralogiques sont faites, à partir de la diffraction des rayons X, sur la roche totale finement broyée et sur les fractions argileuses ($< 2 \mu\text{m}$, $< 0,5 \mu\text{m}$, $< 0,1 \mu\text{m}$). Les quantités approximatives des différents minéraux sont obtenues à partir de l'amplitude relative des pics principaux pour la calcite, le quartz, les feldspaths, les zéolites, la pyrite, et à partir de l'aire relative des pics de réflexion 001 pour les minéraux argileux. Le degré de cristallinité des argiles est estimé à partir de la largeur à mi-hauteur du pic 001.

— Les analyses chimiques de ces mêmes échantillons, présentés, après compactage, sous forme de pastilles de 3 mm de diamètre et de moins de 0,5 mm d'épaisseur, sont faites à l'aide d'un spectromètre à dispersion d'énergie couplé à un microscope électronique à balayage (MEB/EDX).

* Laboratoire de Géochimie des Roches sédimentaires, ERA du CNRS n° 765, Université de Paris XI, 91405 Orsay.

** Centre des Faibles Radioactivités, Laboratoire mixte CNRS-CEA, 91190 Gif-sur-Yvette.

— Des sections polies, réalisées à partir de fragments indurés ou de minéraux triés inclus dans une résine, sont observées au MEB/EDX. Les analyses chimiques des minéraux sont obtenues avec cet ensemble ou, dans certains cas, à l'aide d'une microsonde CAMECA. L'étude morphologique est faite sur des fragments nettoyés aux ultrasons et montés sur adhésif.

— Tous les échantillons préparés pour l'analyse chimique et l'observation morphologique étaient recouverts d'une couche de carbone de quelques centaines d'angströms d'épaisseur. Prenant en compte la diversité des préparations et le rapport signal sur bruit de notre système d'analyse, nous estimons l'erreur relative inférieure à 5 % pour les éléments de teneur en poids supérieure à 10 %, à 10 % pour les teneurs comprises entre 5 et 10 %, et de 20 % pour les teneurs inférieures à 5 %. Enfin les résultats sont exprimés en oxydes dont la somme des poids est normalisée à 100. Le poids de l'eau de structure et des ions hydroxyles n'est donc pas déterminé.

II — LE SITE 485 DU LEG 65 DU D.S.D.P.

1. Situation et échantillonnage

Fig. 1 — Leg 65. Situation et profil du site 485.

Le forage du Site 485 est situé par 3000 m de fond à l'entrée du golfe de Californie, non loin de la faille transformante de Tamayo et à 20 km à l'Ouest de l'axe de la ride Est-Pacifique (fig. 1). La sédimentation

hémipélagique est principalement constituée de boues terrigènes d'âge Plio-Quaternaire. A partir de 150 m s'intercalent huit « unités basaltiques » (sills ou coulées massives) séparées par 8 à 20 m de sédiments (fig. 2). Au contact du basalte, le sédiment est parfois induré sur une épaisseur pouvant atteindre 20 cm. Au cours du forage, la récupération du matériel « cuit » ne fut bonne, à une exception près, que pour les sédiments juste au-dessus des basaltes. On ne peut donc pas affirmer qu'il n'existe pas de transformation des sédiments situés juste au-dessous des coulées basaltiques.

Fig. 2 — Leg 65. Colonne lithostratigraphique de la partie inférieure du forage 485 montrant l'alternance des unités basaltiques (U 1 à 8) et sédimentaires (SU 1 à 7), et la localisation des échantillons étudiés.

Pour suivre les transformations minéralogiques et chimiques des sédiments interbasaltiques, nous avons choisi dans six séquences un échantillon meuble « de référence » situé loin de l'influence du basalte, un échantillon induré et, chaque fois que c'était dans la mesure du possible, le basalte au contact du sédiment.

2. Les assemblages minéralogiques dans les sédiments

a) Les échantillons de référence

La composition minéralogique totale des échantillons de référence est uniforme : quartz, feldspath, calcite, pyrite pour les minéraux en grains ; pour la fraction argileuse, de faible cristallinité, des smectites (beidellite ferrifère) prépondérantes par rapport aux illites et chlorites. Parfois apparaît un peu de clinoptilolite (tabl. I).

Tableau I
Leg 65. Site 485. Composition minéralogique de la fraction $\leq 2\mu\text{m}$ des sédiments

		% Minéraux argileux				% Smectites		Zéolites	
Echantillons		I.	C.	C.M.	Sm	Al.Fe	Fe.Mg	Cl.	An.
REF.		10	5	-	85	100	-	P.tr.	-
a	11-2, 74-76	5	5	-	90	100	tr.	P	-
b	11-3, 33-35	10	5	-	85	100	-	A	-
a	23-1, 3-5	5	10	-	85	100	tr.	-	-
b	23-1, 35-38	5	5	40	50	100	tr.	-	tr.
a	26-2, 3-6	5	10	-	85	100	-	-	-
b	26-1, 50-52	5	10	-	85	100	-	-	-
a	34-1, 28-30	5	5	-	90	100	-	-	-
b	34-1, 52-54	5	10	tr	85	30	70	-	P
a	36-1, 133-135	5	5	-	90	100	-	-	-
b'	36-3, 61-62	10	5	-	85	100	-	-	-
b	36-3, 65-67	10	10	tr	80	60	40	-	-
a	38-1, 18-20	5	5	-	90	100	tr	-	-
b	38-1, 74-76	10	10	40	40	40	60	-	A

RÉF. : moyenne des analyses de 15 échantillons situés loin de l'influence des unités basaltiques.

a et b : sédiments placés entre les coulées basaltiques, au-delà de leur influence (a) et à leur contact (b).

I. : illite ; C. : chlorite ; C.M. : interstratifiés chlorite-smectite ; Sm : smectites ; Cl. : clinoptilolite ; An. : analcime ; tr : traces ; P : présent ; A : abondant.

Le pourcentage des minéraux argileux est estimé d'après les aires relatives de leurs réflexions principales. Celui des smectites aluminos-ferriques (beidellite Al-Fe) et ferro-magnésiennes (saponite Fe-Mg) est calculé à partir des bandes (06,33).

b) Les échantillons indurés

Dans les sédiments indurés on constate, soit l'absence de modification des cortèges minéralogiques et une augmentation de la cristallinité des smectites dont la composition chimique reste identique à celle des échantillons de référence, soit l'authigénèse de smectites trioctaédriques (saponites), d'interstratifiés chlorite-smectite et d'analcime à côté des minéraux détritiques.

Les analyses chimiques de la fraction argileuse $< 0,5 \mu\text{m}$, dont l'illite et la chlorite ont été éliminées par centrifugation, mettent en évidence la présence ou non de minéraux magnésiens néoformés (tabl. II). Cependant la beidellite-Fe trouvée dans les échantillons de référence n'est pas éliminée et cela se traduit sur les diagrammes de poudre par la présence de deux bandes (06,33) (DESPRAIRIES, 1983). L'analyse chimique et la formule structurale déduite sont donc celles d'un mélange : une beidellite-Fe détritique et une saponite Mg-Fe authigène par exemple pour l'échantillon 38-1, 74-76, une beidellite-Fe et un interstratifié chlorite-smectite souvent régulier (corrensite) pour l'échantillon 34-1, 52-54. En fait, une composition chimique des minéraux argileux authigènes a été fournie par l'analyse ponctuelle au MEB/EDX sur des paquets de monocristaux. C'est le cas notamment pour l'échantillon 34-1, 52-54 où apparaissent les étapes de l'interstratification (tabl. III).

Tableau II

97

Leg 65. Site 485. Analyses chimiques totales et formules structurales des smectites et des interstratifiés chlorite-smectite • composant la fraction $\leq 0,5 \mu\text{m}$ des sédiments (cf. légende tableau I)

composition chimique	Ech. Elt.		11-2, 74-76	11-3, 33-35	23-1, 3-5	23-1, 35-38	23-1,● 35-38	26-2, 3-6	26-1, 50-52	34-1, 28-30	34-1,● 52-54	36-1, 133-135	36-3, 61-62	36-3, 65-67	38-1, 18-20	38-1, 74-76
			a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
	SiO ₂		66,6	68,0	60,5	59,7	42,5	62,4	58,7	60,9	49,7	64,7	63,6	60,2	61,0	51,6
	Al ₂ O ₃		20,0	17,1	22,6	22,9	21,2	23,9	25,0	24,4	15,6	23,5	24,3	23,7	25,6	23,9
	Fe ₂ O ₃		6,4	6,8	8,4	7,3	22,3	5,7	9,1	6,2	17,1	5,3	4,9	7,0	5,4	12,2
	MgO		0,9	0,5	1,4	4,0	13,0	3,7	1,3	3,9	13,7	2,4	3,0	2,2	3,5	4,8
	Na ₂ O		4,6	5,1	5,6	4,3	-	-	3,8	-	-	2,3	2,3	4,2	-	5,9
	K ₂ O		1,1	1,2	1,2	1,3	0,9	1,1	1,4	1,2	0,8	1,3	1,6	2,1	1,2	1,3
	TiO ₂		0,3	0,5	0,3	0,4	-	0,4	0,7	0,4	0,3	0,5	0,2	0,6	0,4	-
	CaO		0,1	0,1	-	0,1	0,1	2,8	-	3,0	2,8	-	0,1	-	2,9	0,3
formule structurale	Te	Si	4,01	4,12	3,72	3,67	2,79	3,76	3,62	3,68	3,21	3,88	3,81	3,70	3,68	3,28
		Al	-	-	0,28	0,33	1,21	0,24	0,38	0,32	0,79	0,12	0,19	0,30	0,32	0,72
	Oc	Al	1,42	1,26	1,36	1,32	0,43	1,45	1,43	1,42	0,40	1,54	1,53	1,41	1,50	1,06
		Fe ³⁺	0,29	0,31	0,39	0,33	1,10	0,26	0,42	0,29	0,83	0,24	0,22	0,33	0,24	0,59
		Mg	0,08	0,04	0,13	0,36	0,70	0,33	0,12	0,35	1,15	0,21	0,27	0,20	0,31	0,45
	Int	Mg	-	-	-	-	0,57	-	-	-	0,17	-	-	-	-	-
		Ca	0,01	0,01	-	0,01	0,01	0,18	-	0,19	0,19	-	0,01	-	0,19	0,02
		Na	0,54	0,60	0,66	0,51	-	-	0,46	-	-	0,27	0,26	0,50	-	0,72
		K	0,08	0,10	0,10	0,11	0,07	0,09	0,11	0,09	0,06	0,10	0,12	0,16	0,09	0,10

Tableau III

Leg. 65. Site 485. Echantillon 34-1, 52-54. Analyses ponctuelles au spectromètre à dispersion d'énergie des divers types de smectite (1) et d'interstratifiés chlorite-smectite (2-3) de néogène

Composition chimique	Ech.→ ↓Elt.		1	2	3
	Na ₂ O		2,6	1,4	0,2
	MgO		11,6	15,2	20,9
	Al ₂ O ₃		16,8	14,9	12,0
	SiO ₂		54,4	44,9	44,7
	K ₂ O		1,9	4,0	-
	CaO		0,6	0,6	0,5
	TiO ₂		0,3	1,9	-
	Fe ₂ O ₃		11,8	17,1	21,7
Formule structurale	Te	Si	3,45	3,04	2,95
		Al	0,55	0,96	0,93
	Oc	Al	0,70	0,23	-
		Fe ³⁺	0,56	0,87	1,08
	Int	Mg	1,10	1,35	1,38
		Mg	-	0,18	0,67
		Ca	0,04	0,04	0,03
		Na	0,32	0,19	-
		K	0,15	0,34	0,02

Les argiles magnésiennes disposées en grandes lattes sont bien visibles au MEB. Par contre les cristaux d'analcime très petits (quelques microns) et sans forme précise n'ont pu être repérés que par l'analyse chimique qui indique d'ailleurs une forte teneur en silice. Le rapport Si/Al dans les formules structurales calculées sur 96 oxygènes se situe entre 2,6 et 2,7 (tabl. IV).

Tableau IV
Leg 65. Site 485.
Analyses chimiques et formules structurales des analcimes calculées sur 96 oxygènes
(Sm : erreur standard de la moyenne $\bar{X}$)

	34-1,52-54		38-1,74-76		36-2,65-67
	$\bar{X}$ (10)	Sm	$\bar{X}$ (7)	Sm	(1)
SiO ₂	66,4	0,40	66,2	0,50	67,5
Al ₂ O ₃	20,9	0,20	21,8	0,65	19,6
Fe ₂ O ₃	-	-	-	-	0,9
CaO	1,2	0,20	0,5	0,10	0,5
Na ₂ O	11,2	0,30	11,3	0,80	11,3
K ₂ O	0,3	0,10	0,2	0,05	0,2
Si	35		35		35,7
Al	13		13,5		12,2
Fe	-		-		0,2
Ca	0,7		0,25		0,25
Na	11,5		11,5		11,55
K	0,2		0,2		0,2
Si/Al	2,69		2,59		2,93

3. Bilan chimique de la transformation des sédiments

a) Les éléments majeurs

Pour chaque terme des séquences, nous avons effectué une analyse globale, après un lavage de l'échantillon pour le débarrasser du NaCl. La « cuisson » implique une variation de porosité qui nous interdit d'utiliser la méthode isovolumique (MILLOT et BONIFAS, 1955) pour le calcul des bilans chimiques. Les pourcentages de gains et de pertes d'oxydes des échantillons indurés par rapport aux échantillons de référence ont été estimés en supposant un élément constant, en l'occurrence l'aluminium. L'aluminium est généralement considéré, avec le titane et le fer, comme un des éléments les moins « mobiles » au cours des altérations (HONNOREZ, 1980 ; NOACK, 1981). Pour le titane, en très faible teneur dans les sédiments, les erreurs analytiques sont importantes. Pour le fer, la présence de pyrite rend les bilans peu sûrs. Aussi avons nous retenu l'aluminium.

L'absence d'évolution minéralogique du sédiment total dans certains niveaux indurés est confirmée par leur bilan chimique à peu près nul (tabl. V).

Dans d'autres niveaux, la néoformation des smectites trioctaédriques et des interstratifiés chlorite-smectite est mise en évidence par un net gain en Mg, celle d'analcime par la forte augmentation en Na (tabl. VI). Des changements peu significatifs sont notés pour Si et K. Fe et Ca ont des bilans variables, positifs et négatifs.

Tableau V
Leg 65. Site 485.

Bilan chimique de la transformation des sédiments à l'approche des basaltes

Ech. Elt.	11-2, 74-76 a	11-3, 33-35 b	b/a	26-2, 3-6 a	26-1, 50-52 b	b/a
Na ₂ O	1,8	2,0	+ 20	1,3	1,5	+ 10
MgO	2,7	2,2	- 10	2,8	3,0	+ 5
Al ₂ O ₃	17,6	16,1	0	19,8	20,2	0
SiO ₂	64,8	66,2	+ 10	64,4	63,1	- 5
K ₂ O	3,6	3,6	+ 10	3,8	3,8	- 5
CaO	3,3	3,8	+ 30	2,7	2,4	- 15
TiO ₂	0,9	0,6	- 20	0,7	0,8	+ 20
Fe ₂ O ₃	5,3	5,5	+ 15	4,5	5,2	+ 15

a : échantillon meuble de référence pour l'unité concernée.

b : échantillon durci, sans évolution minéralogique, au contact du basalte.

b/a : pourcentage de gain et perte d'oxydes, à aluminium constant, entre les échantillons.

Tableau VI

Leg 65. Site 485. Bilan chimique de la transformation des sédiments à l'approche des basaltes

Ech. Elt.	36-1, 133-135 a	36-3, 61-62 b	36-3, 65-67 b'	b/a	b'/a	38-1, 18-20 a	38-1, 74-76 b	b/a	23-1, 3-5 a	23-1, 35-38 b	b/a	34-1, 28-30	34-1, 52-54	b/a
Na ₂ O	1,5	1,7	1,4	+30	0	1,0	2,4	+150	0,1	1,3	+1500	0,1	1,5	+1500
MgO	3,2	3,4	3,4	+15	+10	1,7	2,3	+ 30	1,6	1,9	+ 40	2,3	3,9	+ 100
Al ₂ O ₃	19,5	18,3	18,7	0	0	18,3	18,7	0	18,5	15,9	0	19,0	16,6	0
SiO ₂	62,7	59,0	59,7	0	0	61,2	63,1	0	63,1	62,3	+ 15	63,2	59,3	+ 10
K ₂ O	3,8	4,3	3,8	+20	+ 5	5,0	5,2	0	4,1	4,1	+ 20	4,8	4,0	- 5
CaO	4,0	8,7	8,2	+150	+100	4,6	0,8	- 80	4,4	4,6	+ 20	2,4	5,3	+ 150
TiO ₂	0,8	0,6	0,7	-30	-10	0,9	0,8	- 5	0,8	1,2	+ 75	1,0	0,7	- 20
Fe ₂ O ₃	4,5	4,0	4,1	-10	- 5	7,3	6,7	- 10	7,4	8,7	+ 35	7,2	8,7	+ 40

a : échantillon meuble de référence pour l'unité concernée.

b, b' : échantillons durcis, et ayant subi des transformations minéralogiques au contact des basaltes.

b/a, b'/a : pourcentage de gain et perte d'oxydes, à aluminium constant, entre les échantillons.

b) Les éléments traces

Entre les différents termes des séquences, les teneurs en éléments traces (V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Li, Sr, Rb) ne sont pas ou peu modifiées. Il en est de même pour les terres rares dont les courbes de distribution, caractéristiques de boues terrigènes, restent identiques (tabl. VII, fig. 3). Cette inertie des terres rares au cours de la cuisson des sédiments avait déjà été notée dans le matériel du Site 446 du Leg 58 (CHAMLEY et BONNOT-COURTOIS, 1981) et semble se poursuivre jusqu'aux greenstones (MENZIES *et al.*, 1979).

Tableau VII

Leg 65. Site 485. Teneurs en terres rares dans la fraction argileuse de sédiments non transformés (échantillons 1-2-3 à beidellite ferrifère) et « cuits » au contact des basaltes (échantillon 4 à interstratifié chlorite-smectite, 5-6 à saponite ferro-magnésienne)

N° échantillon	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	TOTAL	La/Yb
1) 5-3, 20-22	13,7	22,2	10,2	2,48	0,44	0,38	2,07	0,33	50	6,6
2) 23-1,3-5	5,0	8,3	4,3	1,15	0,18	0,19	0,93	0,15	20	5,4
3) 36-3,61-62	9,7	16	6,8	1,48	0,26	0,26	1,74	0,28	36	5,6
4) 23-1,35-38	21,3	32,2	18,7	3,27	0,69	0,36	2,19	0,35	79	9,7
5) 23-1,35-38	8,4	10,1	7,4	1,44	0,21	0,29	1,79	0,26	30	4,7
6) 38-1,74-76	12,6	27,5	15,3	3,44	0,55	0,47	2,09	0,37	62	6

— Figure 3 —

Distribution des terres rares dans la fraction argileuse de sédiments non transformés (échantillons 1-2-3) et « cuits » au contact des basaltes (échantillons 4-5-6) (cf. tabl. VII).

3. L'altération des basaltes

L'altération des basaltes est nette sur les premiers centimètres du bord supérieur des coulées. Les produits d'altération sont des smectites à la fois trioctaédriques et dioctaédriques de type « proto-céladonite » (RANGIN *et al.*, 1983). Les bilans entre les bordures vitrifiées et les verres frais à composition tholéiitique indiquent (tabl. VIII) : un net enrichissement en Fe, Mg, K, une stabilité de Si, un appauvrissement en Na et Ca.

Tableau VIII
Leg 65. Site 485. Bilan chimique de l'altération des basaltes

Ech. Elt.	36-3,65-67					38-2,2-3			
	a	b	c	d	d/a	a	b	d	d/a
Na ₂ O	4,2	6,1	0,3	0,1	-95	3,4	3,7	0,1	-95
MgO	2,3	2,4	6,6	10,0	+450	3,7	5,0	11,4	+300
Al ₂ O ₃	25,7	20,6	22,6	20,8	-	23,8	23,8	17,7	-
SiO ₂	51,5	59,3	51,3	46,2	+10	53,4	52,5	43,1	+10
K ₂ O	0,1	0,5	0,3	3,5	+4000	0,1	0,9	6,6	+8500
CaO	7,8	2,0	1,4	0,7	-90	6,3	5,1	0,8	-80
TiO ₂	2,8	2,0	5,0	3,6	+60	2,7	2,3	2	0
FeO	5,7	7,1	12,5	15,1	+200	6,5	6,7	18,3	+300

a : verre frais.

b, c : étapes de la transformation des verres.

d : palagonite.

d/a : pourcentage de gain et perte d'oxydes, à aluminium constant, de la palagonite par rapport au verre frais.

Les résultats expérimentaux de l'altération des basaltes par l'eau de mer à différentes températures (HAJASH, 1975 ; HUMPHRIS et THOMPSON, 1978 ; MOTT et HOLLAND, 1978 ; SEYFRIED et BISCHOFF, 1979) et des observations sur les produits néoformés (HONNOREZ, 1980) permettent d'interpréter ces bilans comme la superposition, ou la gradation, de deux phases distinctes : (1) une altération à « moyenne » température, responsable de l'augmentation du Mg (smectites trioctaédriques) et de la diminution du Ca, avec conditions réductrices exprimées par la présence de pyrite dans les fractures ou les vésicules du basalte ; (2) une altération « basse » température, de type « palagonite », manifeste par l'enrichissement en K (« proto-céladonite ») et peut-être la perte en Na, en conditions plutôt oxydantes (présence d'oxy-hydroxydes de Fe).

5. Discussion

Les éléments constitutifs des minéraux authigènes sont à la fois hérités de la roche-mère i.e., le sédiment (Si, Al) et des solutions altérantes i.e., l'eau de mer (Na, Mg).

En se référant aux travaux sur les altérations expérimentales (MOTT et HOLLAND, 1978 ; HAJASH, 1975) et aux caractéristiques d'une aire géothermique — l'Islande — où les conditions de pression lithostatique sont comparables à celles du Site 465 (KRISTMANNSDOTTIR, 1976 ; KRISTMANNSDOTTIR et TOMASSON, 1978), on prend pour domaines de stabilité des minéraux néoformés : 90 à 300 °C pour l'analcime, < 200 °C pour les smectites trioctaédriques, 200 à 300 °C pour les interstratifiés chlorite-smectite.

Il semble donc possible d'évaluer, d'après les paragenèses, une phase d'altération de « moyenne » température développée simultanément dans les sédiments et les basaltes sous-jacents. On considère qu'au cours de cette phase, les solutions interstitielles du sédiment n'ont pas été enrichies en Mg et Na à partir de l'hydrolyse des basaltes, alors qu'une telle source pour ces éléments peut être effective dans les altérations à « basse » température (GIESKES et LAWRENCE, 1981). Par ailleurs cette dernière, caractérisée par un enrichissement en K des produits néoformés, est visible dans les basaltes mais non dans les sédiments immédiatement sus-jacents.

III — LE SITE 456 DU LEG 60

1. Situation et échantillonnage

Le Site 456 est situé à quelques kilomètres de la zone active du bassin des Mariannes (fig. 4). Deux forages (456 et 456 A) implantés par 3591 m de fond, à quelques centaines de mètres l'un de l'autre, ont traversé respectivement 135 m et 120 m de boues terrigènes et carbonatées à éléments volcanoclastiques, d'âge Pléistocène, avant d'atteindre le soubassement constitué de basaltes en pillows (fig. 5). Dans le trou 456, les sédiments sus-jacents aux basaltes sont indurés sur une épaisseur d'environ 35 m. Le phénomène est donc d'une ampleur toute autre que pour le matériel du Site 485 du Leg 65.

2. Les assemblages minéralogiques dans les sédiments

Les boues terrigènes situées au-dessus de la zone indurée sont composées d'un assemblage constant de minéraux argileux détritiques : illite, chlorite, smectites Al-Fe. En se rapprochant des basaltes, cette phase argileuse se réduit progressivement à des chlorites auxquelles s'ajoutent d'autres minéraux authigènes, essentiellement des zéolites mais aussi une paragenèse de quartz-apatite-épidote. La zonation minéralogique est la suivante (tabl. IX et X).

Tableau IX

Leg 60. Site 456. Composition minéralogique de la fraction argileuse des sédiments et principales phases authigènes associées

	I	C	I.M	Sm	Sm % Al-Fe Fe-Mg		Cl	An	Mor	Waïr	Q	Cal	Ap	Ep
REF.	30	25	tr	45	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
456 12-2, 43-45	10	10	-	80	20	80	A	A	-	-	-	-	-	-
456A 10-3, 73-75	-	90	10	-	-	-	-	-	-	-	P	-	-	-
456 14	-	80	20	tr	-	tr	-	-	A	-	P	P	-	-
456 16	-	80	20	-	-	-	-	-	-	A	A	A	P	P

I : illite ; C : chlorite ; I.M : interstratifié illite-smectite ; Sm : smectite, de type beidellite ferrifère (Al-Fe) ou saponite ferro-magnésienne (Fe-Mg) ; Cl : clinoptilolite ; An : analcime ; Mor : mordénite ; Waïr : waïrakite ; Q : quartz ; Cal : calcite ; Ap : apatite ; Ep : épidote ; tr : trace ; P : présent ; A : abondant.

REF. : moyenne des analyses de 4 échantillons non transformés.

Tableau X

Leg 60. Site 456. Analyses ponctuelles des minéraux argileux par spectrométrie à dispersion d'énergie

COMPOSITION CHIMIQUE	456 12-2,43-45			456A 10-3,73-75		14-1, 37-39		14-1, 69-71		456 14-CC		16-1, 10-13		16-1, 78-83	
		Sm	Sm.C	Sm.C	C.Sm	C	C.Sm	Sm	C	Sm	C.Sm	C.Sm	C	C.Sm	
	SiO ₂	45,6	44,4	44,2	39,1	34,3	38,0	55,8	35,6	46,9	37,8	42,5	34,3	40,6	
	Al ₂ O ₃	8,2	12,6	9,6	20,6	22,6	18,2	14,8	20,0	19,0	19,6	17,9	20,8	17,7	
	Fe ₂ O ₃	23,8	26,5	29	22,1	-	24,5	14,4	-	14,8	22,2	19,1	-	-	
	FeO	-	-	-	-	20,7	-	-	22,8	-	-	-	20,9	21,5	
	MnO	-	0,4	0,4	0,6	0,5	0,4	-	0,2	-	0,1	0,4	0,6	0,6	
	MgO	11,3	12,5	13,7	14,6	21,5	17,2	6,6	20,0	10,1	17,1	18,5	20,9	17,6	
	CaO	4,0	2,2	0,9	0,8	0,2	1,2	1,8	0,4	4,3	0,6	1,2	2,4	-	
	Na ₂ O	1,8	0,5	1,0	2,2	0,1	0,2	5,1	0,7	1,2	0,7	0,4	0,1	1,4	
K ₂ O	1,7	0,9	1,2	-	0,1	0,3	0,4	0,1	3,3	1,0	-	-	0,6		
TiO ₂	3,6	-	-	-	-	-	1,1	0,2	0,4	0,9	-	-	-		
FORMULE STRUCTURALE	Te	Si	3,21	3,00	3,01	2,61	3,02	2,56	3,59	3,18	3,09	2,55	2,78	3,05	2,66
		Al	0,68	1,00	0,77	1,39	0,98	1,44	0,41	0,82	0,91	1,45	1,22	0,95	1,34
		Fe ³⁺	0,11	-	0,22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Oc	Al	-	-	-	0,23	1,37	-	0,71	1,28	0,57	0,11	0,17	1,24	0,03
		Fe ³⁺	1,15	1,34	1,27	0,11	-	1,24	0,69	-	0,73	1,13	0,94	-	1,18
		Fe ²⁺	-	-	-	-	1,53	-	-	1,70	-	-	-	1,56	-
		Mn	-	0,02	0,02	0,03	0,04	0,02	-	0,02	-	0,01	0,02	0,05	0,03
	Mg	1,18	0,97	1,08	0,96	2,83	1,12	0,64	2,67	0,99	1,13	1,31	2,76	1,15	
	Int	Mg	-	0,28	0,31	0,49	-	0,60	-	-	-	0,59	0,50	-	0,57
		Ca	0,30	0,15	0,06	0,06	0,02	0,09	0,12	0,03	0,30	0,04	0,09	0,23	-
Na		0,24	0,06	0,13	0,28	0,01	0,02	0,64	0,12	0,16	0,09	0,05	0,02	0,16	
K		0,15	0,07	0,11	-	0,01	0,02	0,04	0,01	0,28	0,08	-	-	0,04	

Composition chimique et formules structurales sur 11 oxygènes des smectites (Sm) et des interstratifiés smectite-chlorite (Sm.C) et chlorite-smectite (C.Sm) ; sur 14 oxygènes des chlorites (C).

Tout le fer est exprimé soit en Fe²⁺ soit en Fe³⁺.

a) Trou 456

Carotte 12. Des smectites ferro-magnésiennes (saponites), des interstratifiés smectite-chlorite à forte proportion de feuillets « smectite » coexistent avec les smectites Al-Fe. Y sont associées une clinoptilolite sodique et de l'analcime en beaux cristaux (Si/Al autour de 2,6 dans les formules structurales calculées sur 96 oxygènes) (Pl. I A).

Carotte 14. Les smectites détritiques ont disparu, ainsi que les illites remplacées par des interstratifiés irréguliers illite-smectite ; les interstratifiés chlorite-smectite, trioctaédriques, où dominant maintenant les feuillets chlorite (« chlorite gonflante » sur les diagrammes de RX), se développent à côté d'un peu de chlorite ; des traces de saponite subsistent. La clinoptilolite et l'analcime ont disparu, la mordenite sodique est abondante (Pl. I B et C). De la calcite et du quartz de néogène apparaissent ; on les retrouve dans la carotte 16.

Carotte 16. La chlorite, de type « brunsvigite », et les « chlorites gonflantes » sont les minéraux argileux prédominants à côté d'un peu d'interstratifiés illite-smectite. La waïrakite est abondante (Pl. I D) : les analyses sur sections polies montrent qu'elle est rigoureusement calcique, sauf parfois en surface où la teneur en sodium peut atteindre 3 % (tabl. XI). Plutôt qu'à la série isomorphe analcime-waïrakite étudiée par HARADA et NAGASHIMA (1972), nous pensons avoir affaire à une substitution Na-Ca à basse température sur une faible profondeur (quelques microns). Quartz, apatite, calcite, épidote (tabl. XII) complètent le cortège (Pl. II).

Tableau XI

Leg 60. Site 456. Analyses chimiques et formules structurales des zéolites (72 oxygènes pour la clinoptilolite, 96 pour la mordenite, l'analcime et la waïrakite. Sm : erreur standard de la moyenne $\bar{X}$)

	Clinoptilolite		Analcime		Mordénite		Waïrakite								
	12-2,43-45				14-1,69-71 14-CC		16-1,10-13				16-1,15-16				
	$\bar{X}$ (5)	Sm	$\bar{X}$ (9)	Sm	$\bar{X}$ (6)	Sm	Centre $\bar{X}$ (5)	Sm	Surface $\bar{X}$ (3)		$\bar{X}$ (7)	Sm	Centre $\bar{X}$ (5)	Sm	Bord $\bar{X}$ (2)
SiO ₂	71,9	0,90	66,0	0,4	76,7	0,4	60,95	0,45	60,1	0,3	61,5	0,2	61,35	0,6	63,8
Al ₂ O ₃	18,7	0,10	21,7	0,4	14,0	0,2	24,8	0,5	25,15	0,2	25,35	0,15	24,95	0,25	23,6
Fe ₂ O ₃	0,3	0,10	0,2	0,05	0,95	0,25	0,1	0,05							
MgO	0,9	0,15			0,45	0,15									
CaO	1,8	0,05	0,1	0,05	1,2	0,15	12,75	0,5	7	0,7	12,4	0,2	13,3	0,2	9,5
Na ₂ O	5,2	0,70	12,0	0,2	5,7	0,55	1,4	0,45	7,75	0,85	0,65	0,15	0,4	0,05	3,1
K ₂ O	1,2	0,2			1,0	0,2					0,1	0,05			
Si	27,8		34,75		39,3		32,35		32,1		32,45		33,5		33,55
Al	8,5		13,5		8,45		15,5		15,8		15,8		16		14,65
Fe	0,1		0,05		0,35		0,05								
Mg	0,5				0,35										
Ca	0,75		0,05		0,7		7,25		4,05		7,05		7,75		5,35
Na	3,9		12,3		5,65		1,4		8,05		0,7		0,45		3,1
K	0,6				0,6						0,05				
Si/Al	3,27		2,57		4,65		2,09		2,03		2,05		2,09		2,29

Tableau XII
Analyse ponctuelle
par spectrométrie à dispersion d'énergie
de deux cristaux d'épidote (échantillon 16-1, 10-13)

	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃
1	21,4	38	26,2	23,9
2	22,9	40,1	23,9	13,1

b) Trou 456 A

Une seule carotte (n° 10) a été étudiée pour ce trou. Malgré l'absence des zéolites, l'association du quartz à un ensemble de chlorite - chlorite « gonflante » permet de rapprocher le cortège des minéraux authigènes de celui de la carotte 16 du trou 456, plutôt que de la carotte 12 dont elle devrait être pourtant l'équivalent lithostratigraphique sur la base des données paléontologiques (fig. 4). Ou bien le matériel de départ était différent, ce qui est peu probable à 200 m de distance, ou bien il faut admettre que dans le trou 456 A la cuisson a été plus intense ou le « front » d'induration plus étendu que dans le trou 456.

3. Bilan chimique de la transformation des sédiments

Les analyses chimiques de la phase argileuse des sédiments indurés (tabl. XIII) mettent bien en évidence l'opposition entre les saponites (carotte 12) et les chlorites (carottes 10 - 14) quant aux teneurs en aluminium. Mais cet élément participe aussi à la formation des zéolites peu siliceuses (analcime) ou fortement siliceuses (mordénite) associées respectivement à la saponite et à la chlorite. L'essai de bilan, effectué comme pour le matériel du Leg 65 et pour les mêmes raisons, permet donc de déterminer les gains en éléments nécessaires aux néoformations : Na pour l'analcime, Ca pour la wairakite et la calcite, Fe-Mg pour les argiles magnésiennes, Si pour le quartz.

Tableau XIII
Leg 60. Site 456

		1							2		
Ech. Elt.		456 12 réf (a)	456 14 (b)	456 16 (c)	b/a	c/a	d/a	réf	456 12	456A 10	456 14
Na ₂ O	1,6	5,5	1,2	0,7	+300	-15	+10	1,6	1,9	-	-
MgO	3,5	4,2	5,3	1,9	+30	+75	+30	5,0	10	7,4	7,9
Al ₂ O ₃	18,3	16,3	15,9	7,4	-	-	-	14,1	7,9	26,2	21,4
SiO ₂	54,3	55,7	57,1	73,5	+15	+20	+250	53,1	44,0	47,8	43,8
K ₂ O	1,4	1,2	2,5	0,1	-5	+100	+90	1,9	0,5	5	6,4
CaO	9,0	3,6	4,1	12,2	-55	-45	+250	9,3	3,2	0,1	2,2
TiO ₂	1,0	1,1	1,2	0,3	+40	+45	-20	0,9	2,7	-	0,7
Fe ₂ O ₃	10,7	12,2	12,5	3,9	+40	+35	-10	14,1	29,4	23,4	17,2
MnO	0,2	0,2	0,2	-	-	-	-	-	0,4	0,1	0,4

1 Bilans chimiques de l'altération des sédiments à l'approche des basaltes.

b-c-d/a : gain et perte d'oxydes, à aluminium constant, des sédiments transformés par rapport à une moyenne de trois échantillons (réf) non transformés.

2 Analyses chimiques de la fraction argileuse $\leq 2 \mu\text{m}$ extraite de ces sédiments.

4. L'altération des basaltes

NATLAND et HEKINIAN (1981) ont décrit les altérations des basaltes du Site 456. De la surface vers le cœur des coulées, ils reconnaissent successivement une zone de réduction et une zone d'oxydation. Dans la zone non oxydée, la mésostase et les clinopyroxènes sont entièrement chloritisés ; les fractures et vésicules de la lave sont remplies de quartz, de chlorite, pyrite, chalcopirite et épidote. Dans la zone oxydée, les smectites et les hydroxydes de fer prédominent. Chaque zone a environ 10 à 15 m d'épaisseur. Les bilans géochimiques

indiquent nettement un enrichissement en Mg et une perte en Ca dans la zone réduite, un gain en K dans la zone oxydée.

5. Discussion

Les paragenèses et les bilans chimiques des sédiments indurés et des basaltes sont comparables, toutes proportions gardées, à ceux des sédiments indurés et des basaltes du Leg 65. Ici encore, alors que les sédiments ont subi une transformation de « moyenne » température, des transformations de « moyenne » et de « basse » température se suivent ou se juxtaposent dans les basaltes.

Les domaines de stabilité des minéraux authigènes trouvés sous des conditions de pression comparables dans les aires géothermiques fossiles d'Islande (TOMASSON et KRISTMANNSDOTTIR, 1972 ; KRISTMANNSDOTTIR, 1976), du Japon (SEKI, 1973), dans le faciès zéolite des basaltes sous-marins (MALLEY, 1981) et dans les produits d'altération expérimentale (LIOU, 1971 ; MENZIES et SEYFRIED, 1979), permettent d'apprécier les températures des solutions altérantes responsables de la zonation des paragenèses.

Ainsi, à la partie supérieure des basaltes et dans les sédiments immédiatement sus-jacents (carotte 16), des températures supérieures à 250 °C peuvent être déduites de la présence de chlorite (stable > 280 °C), d'épidote (> 260 °C) et de wairakite, qui se développe entre 200 °C et 300 °C, non loin de la limite du faciès zéolite et du faciès schiste vert.

Au-dessus (carotte 14), les néoformations auraient eu lieu dans un domaine de température compris entre 200 et 230 °C, étant donné la persistance de traces de saponite (stable < 200 °C), l'abondance des interstratifiés chlorite-smectite (200 - 230 °C) et le maximum de stabilité de la mordénite à 230 °C.

Enfin, le matériel sédimentaire de la carotte 12, renfermant une paragenèse à clinoptilolite, analcime et smectites magnésiennes au début d'interstratification avec des feuillets chlorite, aurait été soumis, comme celui provenant du Leg 65, à des températures comprises entre 90 °C et 200 °C.

IV — CONCLUSION

Dans les deux cas étudiés, les basaltes et les sédiments sus-jacents ont été simultanément altérés à une température comprise entre 90 et 250 °C. Les paragenèses de minéraux néoformés dans les sédiments à la suite de leur cuisson indiquent une décroissance rapide des températures depuis le contact avec le basalte. Les bilans géochimiques font la part des constituants hérités de la roche-mère (Si, Al) et de ceux soutirés des solutions altérantes. Celles-ci peuvent être de l'eau de mer « normale » (apport de Na et Mg) ou « recyclée », après un contact plus ou moins prolongé avec les basaltes.

Ces deux origines possibles des fluides ont été envisagées par les équipes scientifiques participant aux Legs 60 et 65 du D.S.D.P., compte tenu du contexte géodynamique particulier des Sites 456 et 485 : âge récent des dépôts en relation avec une situation proche d'une ride océanique active et, surtout, taux de sédimentation élevé (280 à 625 m/Ma au Site 485).

EINSELE *et al.* (1980) interprètent les unités basaltiques du Leg 65 comme une intrusion de sills dans les sédiments meubles gorgés d'eau. L'interaction du magma avec ces derniers entraîne une forte diminution de la porosité par expulsion des eaux interstitielles portées à haute température et la formation de minéraux « hydrothermaux ». Il est certain que ce processus explique bien l'induration des sédiments, soit avec une recristallisation de minéraux détritiques, soit avec des néoformations.

NATLAND et HEKINIAN (1981) invoquent par contre, pour le matériel du Leg 60, l'influence des fluides hydrothermaux en provenance de la ride d'expansion du bassin des Mariannes, chenalisés latéralement à la partie supérieure du basalte par suite de la couverture sédimentaire imperméable.

Ces décharges hydrothermales, réductrices et chargées de sulfures, seraient de nature semblable à celles trouvées, par exemple, sur la ride Est-Pacifique à 21° N (EDMOND *et al.*, 1979).

Quelle que soit l'hypothèse prise en compte, nous avons vu que les paragenèses sont comparables, bien que d'amplitude différente, et les bilans géochimiques de même signification, tout au moins pour les éléments majeurs. Les éléments traces, dont nous poursuivons l'étude, nous permettront peut-être de préciser l'origine et la nature des solutions altérantes.

REMERCIEMENTS — Les auteurs expriment leurs vifs remerciements au Deep Sea Drilling Project et à MM. Cl. LATOUCHE (Université de Bordeaux I) et J.H. NATLAND (Scripps Institution of Oceanography) pour avoir mis à leur disposition les échantillons des Legs 60 et 65. Ce travail a bénéficié de l'aide financière du Centre National de la Recherche Scientifique (E.R.A. 765 et A.T.P. « Géologie et Géophysique des Océans », 1981).

Abstract

According to the data of deep-sea drillings, the « baking » of sediments at contact with basaltic units has been occasionally mentioned. In the studied samples, transformation of sediment leads to porosity reduction and authigenesis of zeolites (analcite, mordenite, wairakite) and clay minerals (saponite, mixed layer chlorite-smectite, chlorite). The effect of the thermal alteration is similar in sediments and underlying basalts : in both cases the mineral assemblages are contemporaneous and related to moderate-temperature fluids (90 °C to 250 °C).

Alteration, Hydrothermal, Basalt-sediment, Zeolites, Clays

BIBLIOGRAPHIE

- CHAMLEY H. et BONNOT-COURTOIS C. (1981) — Argiles authigènes et terrigènes de l'Atlantique et du Pacifique NW (Legs 11 et 58, D.S.D.P.) : apport des terres rares. *Oceanol. Acta*, 4, 2, p. 229 - 238.
- DESPRAIRIES A. (1983) — Relation entre le paramètre b des smectites et leur contenu en fer et magnésium. Application à l'étude des sédiments. *Clay Minerals*, 18, p. 165 - 175.
- EDMOND J.M., CRAIG H., GORDON L.I. *et al.* (1979) — Chemistry of hydrothermal waters at 21° N on the East Pacific Rise. *Eos. Trans. Amer. Geophys. Union*, 60, p. 864.
- EINSELE G., GIESKES J.M., CURRAY J., MOORE D.M., AGUAYO E., AUBRY M.P., FORNARI D., GUERRERO J., KASTNER M., KELTS M., LYLE M., MATOBA Y., MOLINA-CRUZ A., NIEMITZ J., RUEDA J., SAUNDERS A., SCHRADER H., SIMONEIT B. et VACQUIER V. (1980) — Intrusion of basaltic sills into highly porous sediments, and resulting hydrothermal activity. *Nature*, 283, p. 441 - 445.
- GIESKE J.M. et LAWRENCE J.R. (1981) — Alteration of volcanic matter in deep sea drilling cores. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 45, p. 1687 - 1703.
- HAJASH A. (1975) — Hydrothermal processes along mid-ocean ridges : an experimental investigation. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 53, p. 205 - 226.
- HARADA K. et NAGASHIMA K. (1972) — New data on the analcime-wairakite series. *Amer. Min.*, 57, p. 924-931.
- HONNOREZ J. (1980) — The aging on the oceanic crust at low temperature. « The Sea », EMILIANI (Ed.), Wiley Interscience, 7, 50 p.
- HUMPHRIS S.E. et THOMPSON G. (1978) — Trace element mobility during hydrothermal alteration of oceanic basalts. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42, p. 127 - 136.

- KRISTMANNSDOTTIR H. (1976) — Types of clay minerals in hydrothermal altered basaltic rocks, Reykjanes, Iceland. *Jökull*, 26, p. 30 - 39.
- KRISTMANNSDOTTIR H. et TOMASSON J. (1978) — Zeolite zones in geothermal areas in Iceland. In : « Natural zeolites, occurrences, properties, use ». L.B. SAND and F. MUMPTON (Ed.), Pergamon Press, p. 199 - 220.
- LIU J.G. (1971) — P-T stabilities of laumontite, wairakite, lawsonite and related minerals in the system $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8\text{-H}_2\text{O}$. *J. Petrol.*, 12, p. 379 - 411.
- MALLEY P. (1981) — Le faciès zéolite des basaltes sous-marins du Çalbalı-Dag (ophiolites d'Antalya, Turquie). Contribution à l'étude du métamorphisme océanique. Thèse 3e cycle, Strasbourg, 197 p.
- MENZIES M. et SEYFRIED W.E. (1979) — Basalt sea water interaction : trace element and strontium isotopic variations in experimentally altered glassy basalt. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 44, p. 463 - 472.
- MENZIES M., SEYFRIED W. et BLANCHARD D. (1979) — Experimental evidence of rare earth element immobility in greenstones. *Nature*, 282, p. 398 - 399.
- MILLOT G. et BONIFAS M. (1955) — Transformations isovolumétriques dans les phénomènes de latéritisation et de bauxitisation. *Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, 8, p. 3 - 10.
- MOTTL J.M. et HOLLAND H.D. (1978) — Chemical exchange during hydrothermal alteration of basalt by seawater. I. Experimental results for major and minor components of seawater. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42, p. 1103 - 1115.
- NATLAND J.H. et HEKINIAN R. (1981) — Hydrothermal alteration of basalts and sediments at Deep Sea Drilling Project Site 456, Mariana Trough. *Initial Reports of D.S.D.P.*, U.S. Gov. Printing Office, Washington, 60, p. 759 - 767.
- NOACK Y. (1981) — La palagonite : caractéristiques, facteurs d'évolution et mode de formation. *Bull. Mineral.*, 104, p. 36 - 46.
- RANGIN C., DESPRAIRIES A., FONTES J.C., JEHANNO C. et VERNHET S. (1983) — Metamorphic processes on sediments at contact with young oceanic crust. East Pacific Rise, Leg 65. *Initial Reports of D.S.D.P.*, U.S. Gov. Printing Office, Washington, 65, p. 375 - 389.
- SEKI Y. (1973) — Distribution and modes of occurrence of wairakites in the Japanese Island arc. *J. Geol. Soc. Japan*, 79, p. 521 - 527.
- SEYFRIED W.E. et BISCHOFF J.L. (1979) — Low temperature basalt alteration by seawater : an experimental study at 70 °C and 150 °C. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43, p. 1937 - 1947.
- TOMASSON J. et KRISTMANNSDOTTIR H. (1972) — High temperature alteration minerals and thermal brines, Reykjanes, Iceland. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 36, p. 123 - 134.

PLANCHE I

Leg 60. Site 456

A — Echantillon 12-2, 43-45

1 : Cristal cubique à faces tronquées d'analcime ; 2 : cristaux tabulaires de clinoptilolite ; 3 : agrégat de smectites magnésiennes.

B — Echantillon 14-1, 69-71

Gerbes de mordenite.

C — Echantillon 14 CC

1 : Agrégat d'interstratifiés chlorite-smectite ; 2 : gerbe fibro-radiée de mordenite.

D — Echantillon 16-1, 15-16

Cristaux isocatétraédriques de wairakite.

Echelle des photos : 10 μm .

PLANCHE II

Leg 60. Site 456

E — Echantillon 16-1, 10-13

1 : Baguettes d'épidote.

F — Echantillon 16-1, 10-13

1 : Cristaux d'apatite ; 2 : cristaux de calcite.

G — Echantillon 16-1, 78-83

Cristaux de quartz authigène.

H — Echantillon 16-1, 78-83

1 : Rosette de chlorite ; 2. : cristaux de quartz.

Echelle des photos : 10 μ m.