

Morphologie sous-marine particulière liée à des circulations hydrothermales sur la ride des Loyauté (Nouvelle-Calédonie, SW Pacifique)

par JEAN-RENÉ VANNEY*, MICHEL RIO**, MICHEL ROUX***, HUBERT GUÉRIN*** et l'équipe CALSUB****

Mots clés. – Géomorphologie sous-marine, Submersible, Hydrothermalisme, Ride volcanique, Nouvelle-Calédonie, Sud-Ouest Pacifique.

Résumé. – Une morphologie de fonds sous-marins bathyaux comportant des indurations liées à des dépôts ferro-manganésifères inclus dans des sédiments hémipélagiques peu ou pas cimentés a été découverte sur une ride volcanique tertiaire au large de la Nouvelle-Calédonie (SW Pacifique). Elle semble être en relation avec des circulations hydrothermales au travers de la couverture sédimentaire pendant l'activité volcanique miocène de la ride des Loyauté.

Submarine geomorphology associated to thermal seeps on the Loyalty ridge (New-Caledonia, SW Pacific)

Key words. – Submarine geomorphology, Submersible, Hydrothermalism, Volcanic ridge, New Caledonia, Southwestern Pacific.

Abstract. – We report the discovery during CALSUB cruise of submarine features, including series of pillars and microtables closely related to Fe-Mn deposits entrapped into a soft or weakly cemented hemipelagic ooze, from a Tertiary volcanic ridge setting off New Caledonia. Such features seems to be closely related to hydrothermal circulation through calcareous sedimentation, as a consequence of the volcanic activity of Loyalty ridge during the Miocene time.

I. – INTRODUCTION ET LOCALISATION (fig. 1)

Lors de la campagne CALSUB qui visait à étudier l'environnement bathyal (faunes et sédiments) au large de la Nouvelle-Calédonie (Pacifique sud-occidental), plusieurs plongées effectuées avec la soucoupe Cyana sur la ride des Loyauté ont permis la découverte fortuite de formes de relief très originales liées à des croûtes ferro-manganésifères.

Les îles Loyauté sont des atolls soulevés au niveau du bombement qui affecte la plaque australienne avant son plongement vers la fosse des Nouvelles-Hébrides [Dubois *et al.*, 1974]. Ils sont ancrés sur une chaîne volcanique qui semble avoir été active de l'Eocène à la fin du Miocène [Baubron *et al.*, 1976; Rigolot, 1989]. L'axe des Loyauté (fig. 2) fait un angle de 20° à 30° avec l'axe de la fosse des Nouvelles-Hébrides et les trois îles représentent trois stades d'évolution d'un atoll soulevé à l'approche d'une fosse de subduction [Bourrouilh-Le Jan, 1972; Carrière, 1987].

Nos observations se situent sur les flancs du haut-fond qui relie Lifou et Ouvéa au niveau du récif Jouan, ainsi que sur son prolongement dans la baie de Santal à l'ouest de Lifou (fig. 3) à des profondeurs comprises entre 400 et 900 m. Le soubassement volcanique n'y affleure que rarement car il est enrobé dans sa couverture sédimentaire oligo-miocène indurée au moins en surface [Rio *et al.*, 1991;

Vanney, 1991]. Les sites les plus spectaculaires ont été découverts lors des plongées 14 et 15 de part et d'autre du seuil interinsulaire entre Ouvéa et Lifou.

II. – DESCRIPTION MORPHOLOGIQUE (fig. 4)

La topographie en dômes, à l'aspect de carapace carbonatée, est composée de bossellements ovales (a) ou allongés en barres (b) (pl. I : 1), de hauteur métrique à décimétrique, aisément reconnaissables à leurs contremarches de couleur bitumée où affleure la structure massive qui forme, en apparence, l'armature des dômes. La forme de ces derniers, grossièrement semi-sphérique, est décorée par :

— des cuvettes (décimétriques à métriques), en forme de chaudron parfois, ouvertes en toutes positions, sur les sommets comme sur les flancs des dômes (c);

— des gibbosités noirâtres (moins de 0,50 m) à surface scoriacée (d);

— des gradins décimétriques, à profil raide (e1) ou émoussé (e), qui ceinturent les dômes. La marche la plus basse (position externe) peut être attaquée par des ravins peu profonds, étroits (moins du mètre dans toutes les dimensions) qui entament en rentrant les flancs du dôme (f);

— les fissures (g) en lignes brisées, parfois ouvertes, ont leurs lèvres comme fardées de ferromanganèse (pl. I : 5);

* G.E.M.C.O., Univ. P. et M. Curie, case 119, 4 Place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, et URA 718 CNRS.

** Centre des Sciences de la Terre, Univ. Lyon 1, 69622 Villeurbanne cedex, et URA 11 CNRS.

*** Lab. Sciences de la Terre, Univ. Reims, BP 347, 51062 Reims cedex, et URA 157 CNRS.

**** Philippe Bouchet, Jean-Paul Bourseau, Christian Gaillard, René Grandperrin, Alain Guille, Bernard Laurin, Claude Monnot, Bertrand Richer de Forges, Michel Rio, Michel Roux, Michel Segonzac, Jean Vacelet et Helmut Zibrowius, GDR Ecoprophyce du CNRS.

Manuscrit déposé le 26 février 1991, accepté le 13 janvier 1992.

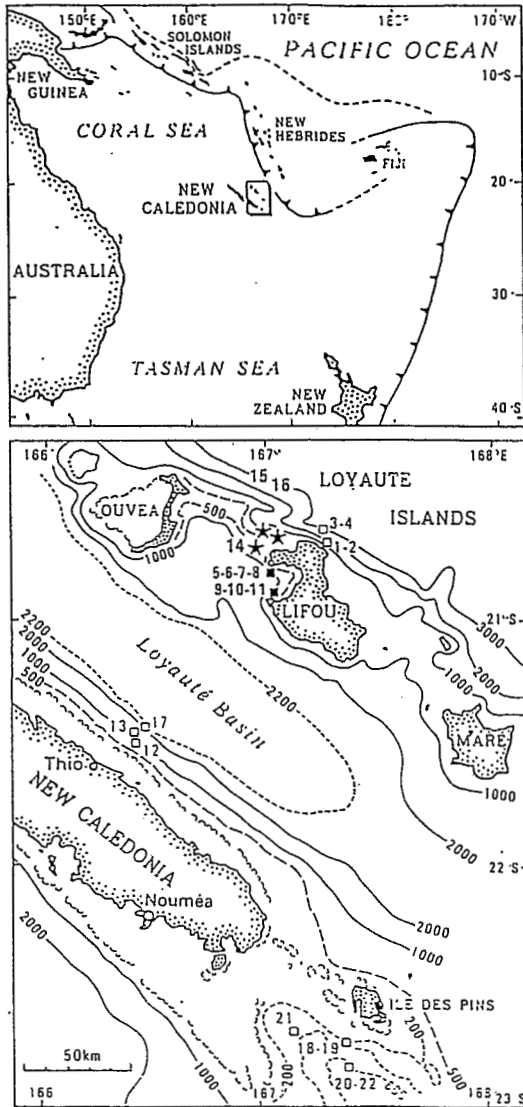


FIG. 1. — Principales structures tectoniques du SW Pacifique (haut) et localisation des plongées de la campagne CALSUB (bas). En noir, les plongées exploitées dans cet article; les étoiles indiquent les principaux sites hydrothermaux.

FIG. 1. — Major structural features of the southwestern Pacific (upper) and location of the CALSUB dives with hydrothermal reliefs (lower).

— de petites alvéoles, à bords dentelés ou multilobés, et des sortes de cupules en forme de coups d'angle (h).

Les piliers ou pinacles forment, incontestablement, les reliefs les plus curieux de l'ensemble. A notre connaissance, ces formes colonnaires qui évoquent, d'assez loin souvent, celles connues à terre sous les noms divers de «demoiselles», «nonnes», «cheminées de fées», n'ont encore jamais été décrites sous la mer, et dans une telle structure. Plusieurs conformations ont été reconnues :

— sur le flanc des tertres font saillies des sortes de consoles noirâtres ferro-manganiques (dimensions métriques) au pied parfois encorbellé (i) (pl. I : 2);

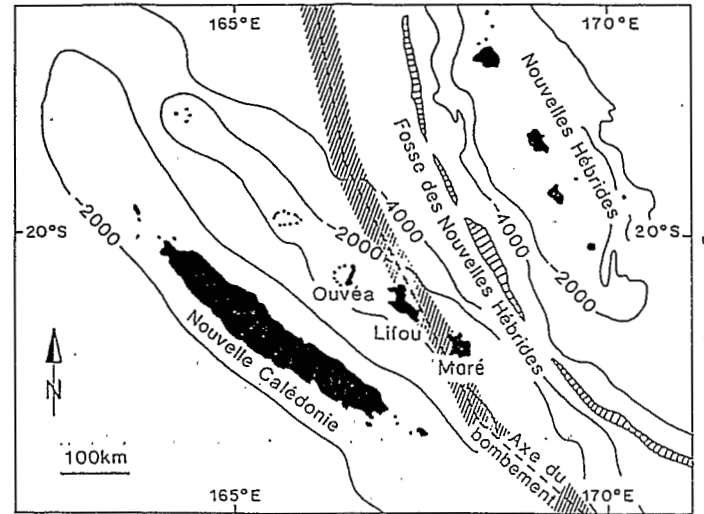


FIG. 2. — Carte montrant l'orientation de la ride des Loyauté par rapport à la fosse des Nouvelles Hébrides et au bombement lithosphérique d'avant-fosse [d'après Carrière, 1987].

FIG. 2. — Map showing the orientation of the Loyauté ridge compared with the New Hebrides trench and the foredeep lithospheric bulging [after Carrière, 1987].

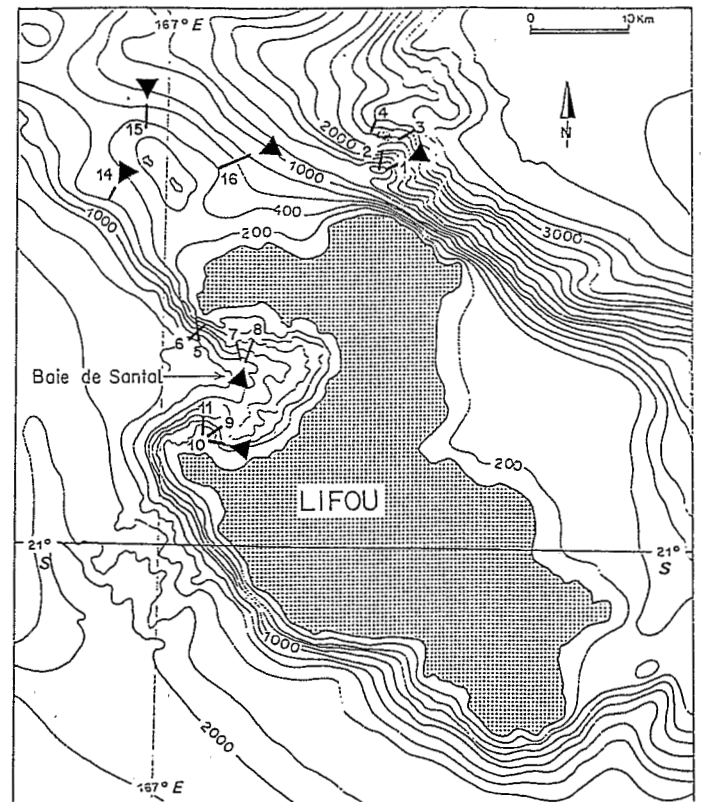


FIG. 3. — Localisation des plongées CALSUB autour de Lifou et sur le seuil Ouvéa-Lifou. Triangles noirs : plongées utilisées dans le texte.

FIG. 3. — Location of the CALSUB dives around Lifou and on interinsular ridge Ouvéa-Lifou. Black triangles : dives used in the text.

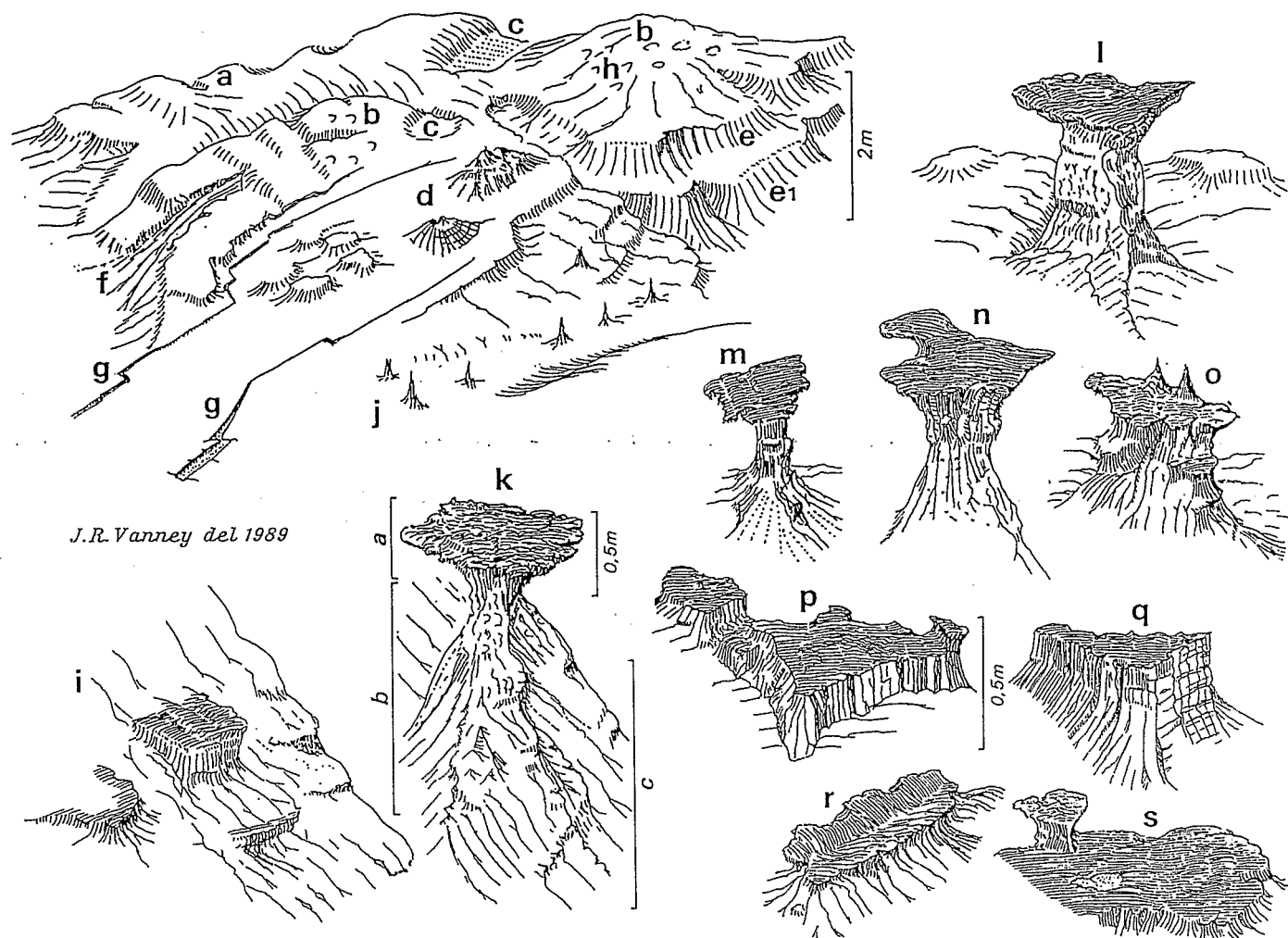


FIG. 4. — Les dômes hydrothermaux et les roches champignons. Lettres : voir texte. Fig. K : a, b, c : « chapeau », « corps », et « pied ».
 FIG. 4. — *Hydrothermal dumps and mushrooms-rocks. For the letters, see text. Fig. K : a, b, c : "hat", "body", and "foot".*

— entre les tertres et sur le premier gradin, des pitons bas qui sortent du sol comme des racines calcinées dans un brûlis (j) ;

— plus loin, les formes adoptent un développement plus nettement colonnaire ou tabulaire.

Au premier genre, on pourrait appliquer l'appellation de « roches-champignons » à cause de la frappante similitude de forme (pl. I : 3 et 4). On pourrait dire « canonique » (k), une roche haute entre 1 et 2 m, composée :

— d'un « chapeau », fragment horizontal, à la surface scoriacée ou chicoteuse, aux bords dentelés et ciselés ;

— d'un « corps », support étroit formant taille, constitué d'un matériel plus clair, ajouré parfois. Une montée hydrothermale forme peut-être le squelette de ce corps, comme le montant d'un mannequin en assure la solidité ;

— et d'un « pied », embase parfois fourchue, enracinée dans une topographie doucement onduleuse ou inclinée, parfois semée de débris épars.

A côté de cette roche-champignon idéale, coexistent des variétés contrefaites, aux formes assez différentes pouvant évoquer un lutrin aussi bien qu'une enclume (l à o).

Une dernière catégorie suggère, par son faible commandement et son aspect tabulaire, la figure d'une souche aux bords ébréchés ou déchiquetés (p à s). Leur position par rapport aux roches-champignons et aux tertres donne à penser que les « souches » procèdent du dégagement et de l'isolement de la forme (i), ou du démantèlement de (k) dont il ne reste que le pied.

Pour la compréhension de ce remarquable ensemble, il convient d'apporter les précisions suivantes :

— les dômes ont été observés où affleure le substrat carbonaté oligo-miocène dans la chaîne des Loyauté ;

— les mouvements d'échange entre les bassins des Loyauté et des Nouvelles-Hébrides y entretiennent actuellement un régime de non-dépôt, sinon d'érosion ;

— les roches-champignons et les souches paraissent des formes dégagées par la retaille d'un flanc de dôme. Les

plongées 14 et 15 (fig. 3) montrent clairement le passage latéral des unes aux autres;

— la position même des piliers et des roches-champignons met peut-être sur la voie d'une explication (fig. 5). Leur dégagement pourrait être attribué à un entraînement lent des niveaux de marnes interstratifiées entre les formations indurées. Le poids et la masse de celles-ci, composant leurs effets avec la poussée des niveaux plastiques sous-jacents, produiraient l'effraction latérale des dômes, l'individualisation des piliers ou des tables, puis le dégagement des roches-champignons par le déblai de leur gangue sédimentaire.

III. — MINÉRALOGIE ET CHIMIE DES CROÛTES FERRO-MANGANÉSIFÈRES

Les indurations ferro-manganésifères, bien que parfois d'apparence vaguement stratiforme, recoupent fréquemment la stratification et tapissent des fractures. L'observation en lame mince révèle plusieurs phases d'encroûtement. Ainsi, les prélèvements effectués lors des plongées 14 et 15, respectivement par 538 m et 570 m, sur les formes d'érosion en champignon montrent toujours des croûtes laminées noires, cohérentes, épaisses de quelques millimètres (faciès

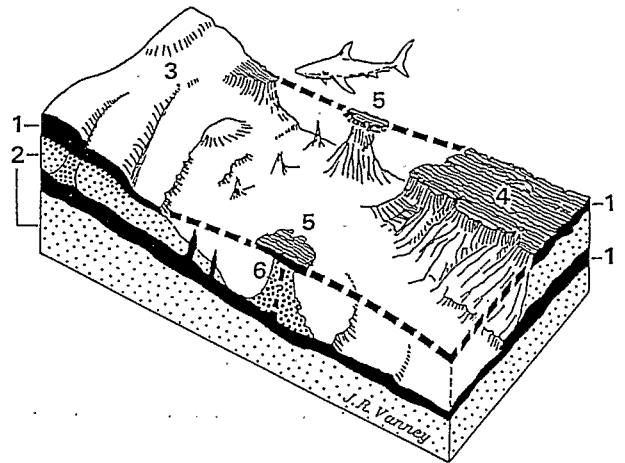


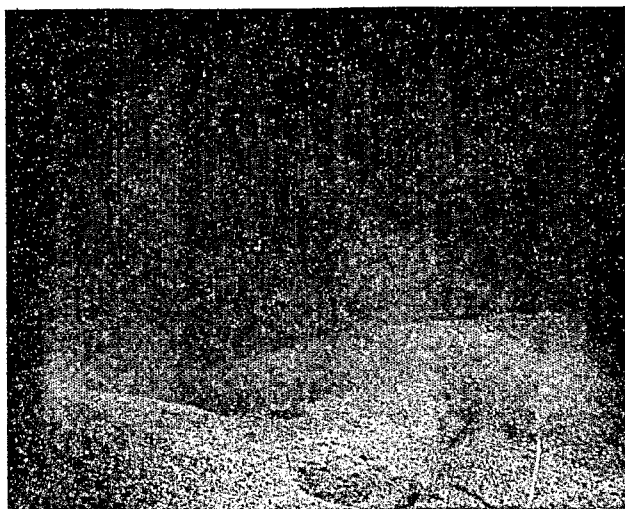
FIG. 5. — Les piliers hydrothermaux : interprétation proposée.
1 : cuirassement hydrothermal; 2 : hémipelagites à fixation hydrothermale diffuse; 3 : flancs et gradins du dôme; 4 : souches; 5 : roches-champignons; 6 : colonne d'induration.

FIG. 5. — Hydrothermal pillars : proposed interpretation.
1 : hydrothermal crust; 2 : discrete, poor incrustated hemipelagites; 3 : flank and steps of a dome; 4 : "stumps"; 5 : pillars; 6 : indurated shaft. The shark (two metres long) gives the scale.

PLANCHE I — PLATE I

1. — Collines (grès) armées par des niveaux hydrothermaux. Cuvettes circulaires ou allongées (amplitude : du décimètre au mètre). Forme (c) de la fig. 4. Localisation : versant méridional du seuil Ouvéa-Lifou. Profondeur : 507 m. Plongée 14 ; observateur : B. Richer de Forges.
1. — *Hilly sandstone consolidated with hydrothermal layers. Rounded or elongated depression (decimetre to metre deep). Feature c on text-fig. 4. Location : southern slope of the interinsular ridge Ouvéa-Lifou. Depth : 507 m. Dive 14. Observer : B. Richer de Forges.*
2. — « Consoles » dégagées dans les niveaux hydrothermaux affleurant sur le flanc d'un dôme. Forme (i) de la figure 4. A l'arrière-plan : début d'une série de consoles étagées. Au premier plan : sommet d'une « roche-champignon ». Localisation : versant septentrional du seuil Ouvéa-Lifou. Profondeur : 533 m. Plongée 15 ; observateur : A. Guille.
2. — *"Console-table" shaped from hydrothermal layers outcropping on a dome flank. Feature i on text-fig. 4. In background : edge of a series of stepped "consoles". In foreground : top of a mushroom-rock. Location : northern slope of the interinsular ridge Ouvéa-Lifou. Depth : 533 m. Dive 15. Observer : A. Guille.*
3. — Groupe de « roches-champignons ». Formes (k-o) de la figure 4. Hauteur : 0,30 à 0,50 m. Remarquer la diversité des « chapeaux », la surface scoriacée des « corps », l'enracinement des « pieds » dans un niveau hydrothermal formant plancher. Même plongée que figure 1. Profondeur : 567 m.
3. — *Mushroom-rock group. Features k through o on text-fig. 4. Elevation : 0.30-0.50m. Note : the diversity of the "huts", the scoriaced surface of the "bodies", the "feet" rooted on indurated floor. Same dive as figure 1. Depth : 567 m.*
4. — « Roche-champignon » isolée. La vue plongeante montre le « chapeau », formé de niveaux étagés, colonisé par divers invertébrés. Hauteur : environ 0,50 m. Profondeur : 550 m. Même plongée.
4. — *Isolated mushroom-rock. The view from above shows a composite "hut" covered by invertebrate fauna. Elevation : about 0.50 m. Depth : 550 m. Same dive.*
5. — Groupe de « souches ». Formes (p) et (q) de la figure 4. Reliefs hydrothermaux en forme de table basse (le bidon et la pince donnent l'échelle). Noter le passage à de petites roches-champignons (à droite) et la fissure surlignée par des dépôts ferro-manganésifères. Profondeur : 559 m. Même plongée.
5. — *Cluster of "stumps". Features p and q on text-fig. 4. Hydrothermal reliefs shaped in low tables (can and manipulator give the scale). Note : transition to small mushroom-rocks (on the right) and the Fe-Mn incrustated cracks. Depth : 559 m. Same dive.*
6. — Tertre hydrothermal résiduel. Coupole irrégulière, surbaissée, lissée par les processus élémentaires ou cursitaires. Localisation : corne sud de la baie de Santal à l'W de Lifou. Profondeur : 540 m. Plongée 10 ; observateur : C. Monniot.
6. — *Hydrothermal residual. Irregular, lowered cupola, smoothed by elementary or current processes. Location : southern rim of bay of Santal, west of Lifou. Depth 540 m. Dive 10. Observer : C. Monniot.*

1



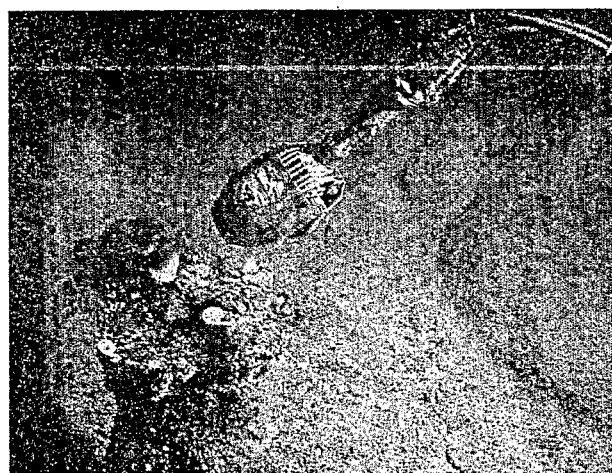
2



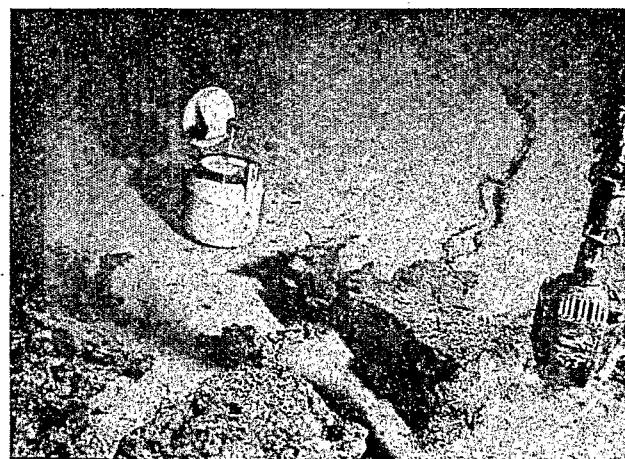
3



4



5



6

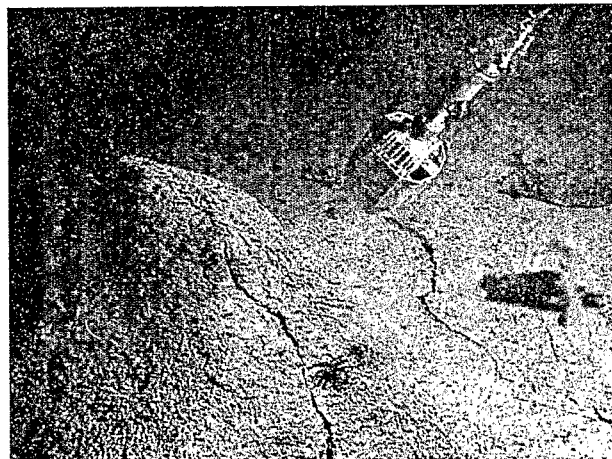


TABLE I. - Composition chimique (%) des encroûtements ferro-manganésifères prélevés au cours de la campagne CALSUB. De A à E : faciès prélevés de manière sélective (mesures : Service central d'analyses du CNRS spectrométrie ICP); G (Ga, Gd et Gbc) : faciès prélevés globalement; voir les explications dans le texte (mesures : H. Guérin, spectrophotométrie). G* : valeurs calculées (moyenne de B et C). Le premier membre du numéro de prélèvement correspond au numéro de plongée.

TABLE I. - Chemical composition (%) of ferromanganese crusts sampled during the CALSUB cruise. From A to E : facies sampled by selective way (measures : service central d'analyses du CNRS, spectrometry ICP); G (Ga, Gd and Gbc) : global sampled facies; explanations in text (measures : H. Guérin, spectrophotometry); G* : computed value (Band C medium). The left-hand size of the number is the dive number.

Prélèvement	01-02		14-06		15-07		20-08	
	D	Gd	A	Ga	B	C	Gbc	E
Cu	0,10	-	0,07	-	0,05	0,005	0,027*	0,005
Ni	0,32	-	0,52	-	0,38	0,05	0,215*	0,02
Co	0,19	-	0,20	-	0,29	0,02	0,155*	0,005
10 (Cu+Ni+Co)	6,1	-	7,9	-	7,2	0,75	3,97*	0,3
Fe	17,16	11,6	14,75	19,4	16,66	6,39	22,9	36,25
Mn	12,93	5,02	10,51	11,46	13,16	1,24	9,78	0,07
Mn/Fe	0,75	0,43	0,71	0,58	0,79	0,19	0,42	0,006
Ni/Fe	0,019	-	0,035	-	0,023	0,008	0,018*	0,0005

A et B, tabl. I) recouvrant parfois une couche centimétrique brun rouille, très compacte, à structure laminée botryoïdale (faciès C, tabl. I). Des faciès similaires ont été décrits à l'est de la Nouvelle-Guinée [Bolton *et al.*, 1988]. Par diffractométrie X, les composants minéraux qui apparaissent sont la calcite, la goëthite, la todorokite et de la birnessite mal cristallisée. Dans de telles croûtes, la faible cristallinité des minéraux manganésifères comme la todorokite et surtout la birnessite [Giovanolli, 1980] semble être la conséquence de la coprécipitation de Fe et Mn [Guérin et Perseil, 1982].

D'après les études sur les nodules et les croûtes ferro-manganésifères, et sur les sédiments métallifères des grands fonds océaniques, plusieurs sources contribueraient à leur formation : le détritisme, l'authigenèse, les organismes, les résidus de dissolution et l'hydrothermalisme. Chacune de ces composantes possède un chimisme qui lui est propre et dont on peut retrouver la signature [Bonatti *et al.*, 1976; Dymond, 1981; Lyle, 1981; Dymond *et al.*, 1984; Ruhlin et Owen, 1986; Chen et Owen, 1989]. Dans le contexte néocalédonien, seuls l'authigenèse et d'éventuels apports hydrothermaux paraissent envisageables. L'authigenèse correspond à des valeurs du rapport Mn/Fe proches de 2 et du rapport Ni/Fe de 0,066, tandis que l'hydrothermalisme fournit des valeurs pour les mêmes rapports respectivement de 0,29 et de 0,001.

Une analyse chimique comparée des faciès A, B, C avec, d'une part l'enduit ferro-manganésifère d'une brèche andésitique prélevée lors de la plongée 1 (fig. 1) sur le flanc nord de Lifou par 1 683 m de profondeur (D, tabl. I) et d'autre part, une surface durcie ferrugineuse (sidérite et goëthite) rouge brique, massive, conforme à la stratification (E, tabl. I) échantillonnée lors de la plongée 20 (fig. 1) au SW de l'île des Pins, a été menée pour Fe, Mn, Ni, Cu, et Co (tabl. I). Par ailleurs, pour Fe et Mn, nous avons prélevé des quantités plus importantes sans distinction de faciès sur chaque échantillon.

Pour les échantillons prélevés ponctuellement, la composition de A, B, et D s'oppose à celle de E, tandis que C se singularise du reste. Les résultats de A, B, et D sont proches d'une situation intermédiaire entre le pôle authige-

nèse et le pôle hydrothermalisme. Une simple combinaison linéaire des rapports Mn/Fe et Ni/Fe permet d'estimer approximativement que l'hydrothermalisme contribuerait pour les deux tiers à la composition de ces faciès. Le faciès C pourrait résulter d'une contribution dominante des fluides hydrothermaux marqués par un fractionnement important du fer et du manganèse; une évolution diagénétique ultérieure en milieu oxydant semble à écarter car ce mécanisme tend à augmenter fortement la valeur du rapport Mn/Fe [Lyle, 1981]. Cette interprétation est confortée par les valeurs du rapport Mn/Fe des échantillons globaux des croûtes des plongées 1, 14 et 15 qui sont intermédiaires entre B et C. Il faut envisager aussi qu'une partie des fluides responsables de ces dépôts ait pu provenir, au travers des sédiments, directement des magmas sous-jacents. Les échantillons globaux (Ga, Gd, Gbc du tableau) ont été prélevés sur des surfaces plus larges; des plages de type C y sont probablement mélangées avec des plages de type A, B ou D; ainsi le rapport Fe/Mn tend à les déplacer vers le pôle hydrothermal par rapport à A, B et D. L'échantillon E, extérieur au contexte volcanique de la ride des Loyauté, fournit un témoin d'origine purement sédimentaire.

Leur composition chimique et leur mode de gisement suggèrent une contribution importante de l'hydrothermalisme à la formation des croûtes ferro-manganésifères de la ride des Loyauté. Notons que des croûtes ferro-manganésifères enrichies en argent et en or ont été signalées sur substrat basaltique altéré sur le flanc NE de la ride des Loyauté [Bolton *et al.*, 1986].

IV. - CONCLUSION

Sur le flanc N du seuil Ouvéa-Lifou (fig. 3), au niveau du récif Jouan (plongée 16), des laves injectées dans une fracture au sein de sédiments lithifiés en gros bancs ont été observées par 840 m de profondeur. Un sill moins massif a été observé au nord de la baie de Santal par 818 m de profondeur (plongée 8). Les affleurements attribuables au soubassement volcanique n'apparaissent qu'à 850-900 m et au-delà.

Il est clair que des intrusions de laves au sein de la sédimentation calcaire oligo-miocène ont pu provoquer des circulations hydrothermales responsables de précipitations ferro-manganésifères sécantes à la stratification ou plus conforme à celle-ci à la faveur de niveaux plus poreux. Les fluides ont pu suivre des diaclases ou des joints de stratification, mais aussi percoler le sédiment en favorisant localement son induration.

Il ne faut pas exclure qu'à ce phénomène s'ajoute la formation d'une carapace en surface du sédiment au contact d'eaux enrichies en sels métalliques, puis son démantèlement par l'action combinée de la tectonique et de l'érosion.

Le déblaiement par l'érosion des sédiments restés meubles ou faiblement lithifiés et l'isolement des zones indurées résistantes pourraient expliquer la formation des roches-champignons. Mais aujourd'hui, celles-ci paraissent parfois émerger de la carapace carbonatée des dômes sans

que l'on puisse distinguer clairement des différences de dureté du substrat.

La genèse de telles morphologies est probablement polyphasée : certaines indurations seraient liées à des circulations hydrothermales, d'autres, postérieures, à l'action des courants quand ils ne sont plus érosifs. Elle reste encore largement énigmatique. Son analyse nécessitera une exploration plus détaillée des relations spatiales entre les divers éléments, accompagnée d'un échantillonnage systématique des encroûtements.

Remerciements. – Les auteurs remercient l'équipage du N/O Suroît et l'équipe de la soucoupe Cyana qui ont assuré le succès de la campagne CALSUB, et MM. J.M. Auzende (IFREMER-Brest), J. Dupont (ORSTOM-Nouméa) et L. Laubier (IFREMER-Paris) pour leurs critiques constructives. Contribution GEMCO n° 573.

Références

- BAUBRON J.C., GUILLON J.H. & RÉCY J. (1976). – Géochronologie par la méthode K/Ar du substrat volcanique de l'île Maré, archipel des Loyauté (Sud-Ouest Pacifique). – *Bull. BRGM*, 2, (4), 165-175.
- BOLTON B.R., BOTH R., EXON N.F., HAMILTON T.F., OSTWALD J. & SMITH J.D. (1988). – Geochemistry and mineralogy of seafloor hydrothermal and hydrogenetic Mn oxide deposits from Manus Basin and Bismark Archipelago region of the southwest Pacific Ocean. – *Mar. Geol.*, 85, 65-87.
- BOLTON B.R., OSTWALD J. & MONZIER M. (1986). – Precious metals in ferromanganese crusts from the south-west Pacific. – *Nature*, 320, 518-520.
- BONATTI E., ZERBI M., KAY R. & RYDELL H.S. (1976). – Metalliferous deposits from the Apennine ophiolites : Mesozoic equivalents of modern deposits from oceanic spreading centre. – *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 86, 83-94.
- BOURROUILH-LE JAN F. (1972). – Diagenèse récifale : calcitisation et dolomitisation. Leur répartition horizontale dans un atoll soulevé : île de Lifou. Territoire de Nouvelle-Calédonie. – *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, 4, 121-148.
- CARRIÈRE D. (1987). – Enregistrement sédimentaire, diagénétique et morphologique d'un bombement lithosphérique sur l'atoll soulevé de Maré, archipel des Loyauté, Nouvelle-Calédonie. – *C.R. Acad. Sci., Paris, II*, 305, 975-980.
- CHEN J.C. & OWEN R.M. (1989). – The hydrothermal component in ferromanganese nodules from the southeast Pacific Ocean. – *Cosmochim. Acta*, 53, 1299-1305.
- DUBOIS J., LAUNAY J. & RÉCY J. (1974). – Uplift movements in New Caledonia – Loyalty islands area and their plate tectonic interpretation. – *Tectonophysics*, 24, 133-150.
- DYMOND J. (1981). – Geochemistry of Nazca plate surface sediments : an evaluation of hydrothermal biogenic, detrital and hydrogenous sources. – *Geol. Soc. Amer., Mem.*, 154, 133-173.
- DYMOND J., LYLE M., FINNEY B., PIPER D.Z., MURPHY K., CONARD R. & PISIAS N. (1984). – Ferromanganese nodules from MANOP sites H, S and R. Control of mineralogical and chemical composition by multiple accretionary processes. – *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48, 931-949.
- GIOVANOLI R. (1980). – Vernadite is random-stacked birnessite. – *Mineralium deposita*, 15, 251-253.
- GUÉRIN H. & PERSEIL E.A. (1982). – Todorokite riche en fer : constituant du wad du gisement de Capo-Becco, île de San Pietro (Sardaigne). – *Per. Mineral.*, Roma, 51, 217-224.
- LYLE M. (1981). – Formation and growth of ferromanganese oxides on the Nazca plate. – *Geol. Soc. Amer., Mem.*, 154, 269-293.
- RIGOLOT P. (1989). – Origine et évolution du « système » ride de Nouvelle-Calédonie/Norfolk (Sud-Ouest Pacifique). – Thèse, Univ. Bretagne occidentale, 319 p.
- RIO M., ROUX M., GUÉRIN H. & l'équipe CALSUB (1991). – Le substrat géologique et les processus sédimentaires sur les pentes bathyales. In : LAMBERT B. & ROUX M., Ed., L'environnement carbonaté bathyal en Nouvelle-Calédonie (programme Envimarges). – *Doc. et Trav. IGAL*, 15, 57-73.
- RUHLIN D. & OWEN R.M. (1986). – The rare earth element geochemistry of hydrothermal sediments from the East Pacific Rise : examination of a seawater scavenging mechanism. – *Geochim. Cosmochim. Acta*, 50, 393-400.
- VANNEY J.R. (1991). – Le modelé des pentes sous-marines observées par submersible lors de la campagne CALSUB. In : LAMBERT B. & ROUX M., Ed., L'environnement carbonaté bathyal en Nouvelle-Calédonie (programme Envimarges). – *Doc. et Trav. IGAL*, 15, 38-55.