

Le cadre géologique d'un site hydrothermal actif : la campagne STARMER 1 du submersible *Nautile* dans le Bassin Nord-Fidjien

Jean-Marie AUZENDE, Tetsuo URABE, Christine DEPLUS, Jean-Philippe EISSEN, Daniel GRIMAUD, Philippe HUCHON, Junishiro ISHIBASHI, Masato JOSHIMA, Yves LAGABRIELLE, Catherine MÉVEL, Jiro NAKA, Étienne RUELLAN, Takeo TANAKA et Manabu TANAHASHI

Résumé — Dans le cadre du projet de coopération franco-japonais STARMER, le *Nautile* et son navire support *Le Nadir* ont exploré deux secteurs de la dorsale active du bassin Nord Fidjien (SW Pacifique), à proximité de la triple jonction de 16°40'S. Dans le premier secteur, situé à l'extrémité septentrionale de la portion de dorsale de direction N15, il a pu être mis en évidence l'étroite relation entre fracturation et présence d'émissions hydrothermales. Un site actif « La Dame Blanche », caractérisé par une cheminée constituée exclusivement d'anhydrite émettant un fluide transparent, de chlorinité très faible et de température maximale de 285°C, a été étudié. Des colonies animales vivantes composées essentiellement de gastéropodes, de cirripèdes et de moules ont été observées. Le deuxième site, exploré dans le graben situé à l'extrémité occidentale de la zone de fracture nord-fidjienne, montre une activité volcanique ralentie relayée par une importante activité fissurale. Le mur Nord du graben fournit une coupe continue de la partie supérieure de la croûte océanique (coulées massives, complexe filonien et laves en coussin).

Geological setting of an active hydrothermal site: preliminary results of the STARMER 1 cruise of the submersible *Nautile* in the North-Fiji Basin

Abstract — In the frame of the STARMER French-Japanese joint project, the *Nautile* and her mothership *Le Nadir* have explored two areas of the active North-Fiji Basin axis (SW Pacific) near the 16°40'S triple junction. In the first area, located at the northern end of the N15 ridge, the close relationship between fracturation and hydrothermalism has been evidenced. An active site "the White Lady" has been studied. It is characterized by an anhydrite made chimney and by transparent, low chlorinity, and 285°C temperature fluids. Alive animals colonies constituted essentially by gastropodes, cirripeds and mussels have been observed. The second site, in the graben at the western end of the North Fiji fracture zone, shows an extinct volcanic activity relayed by active fissuration. The northern wall of the graben exhibits a continuous section of the upper part of the oceanic crust (massive flows, dyke complex and pillows).

Abridged English Version — The objective of the STARMER 1 cruise was the geological and geochemical study of the active spreading ridge and associated hydrothermalism in the North Fiji Basin (NFB hereafter) ([1], [2], [3]). This operation of the *Nautile* and its mothership *Nadir* was the third cruise of the french-japanese STARMER project, consisting of two cruises of the *R/V Kaiyo* in 1987 and 1988 [4]. All the data (Seabeam bathymetry, magnetics, dredges, multiprobes, TV, photos and sonar deep tows) acquired during these cruises were used for the selection of the diving sites.

The first site is located in the axial graben on top of the dome forming the northern tip of the N15E spreading axis [5] whose depth is anomalously shallow (1,900 m). Here, one active hydrothermal site was discovered during *Kaiyo 88* cruise.

The second site is located in the large depression of the triple junction with the North Fiji Fracture zone (NFFZ hereafter). This depression is interpreted as a pull apart basin linked to the left lateral motion along the NFFZ [6]. It is limited north and south by 1,000 m high, N60 trending cliffs, and occupied in the center by a N60 double ridge thought to be a neovolcanic axis propagating toward the NE.

Note présentée par Jean AUBOUIN.

RESULT OF THE STARMER 1 CRUISE. — The structural map (*Fig. 1*) was established from observations made during 6 dives in the axial graben between 16°58' S and 17° S. This part of the spreading axis is formed by a series of N15E trending horst and graben. The central graben, 200 m wide and 20 to 40 m deep, is flanked by two small horts and two lateral grabens, a few tens of meters wide and 10 to 20 m deep. Tectonic features are mainly N15E trending normal faults and open fractures. Most of them occur in the central graben and on its border scarps. Excepted the fault scarps, all the area is covered with a thin pelagic sediment layer which shows that volcanism was not active recently.

Extincted hydrothermal sites occur all along the graben. They consist in fossil chimneys, oxydes straining and dead shells. In the center of an extinct hydrothermal area at 16°59' S, an active chimney has been discovered and named the "White Lady" because it consists of a 3 m high accumulation of anhydrite. Three main vents expell a transparent "moired" water with very few solid particles. Its temperature is 285°C. Abundant animal colonies, including mostly gasteropodes, crabs, galatheans and cirripeds, are located around minor vents at the base of the chimney.

Basaltic lavas present various morphological aspects typical of oceanic ridges: pillows, tubes and lava lakes, sheeted or massive flows. North of 16°50.30' S, the three grabens progressively disappear in a complex area where more diffuse deformation occurs along N15E and N140E trending faults. The later direction coincides with that of the limit between the triple junction area and the N15E spreading axis. Collapsed lava lakes and pilars characterized this area. In the northermost part of the surveyed area, abundant fossil hydrothermal deposits outcrop. Their thickness locally exceeds 30 m.

The second site of the cruise was the graben located East of the N15 and N160 ridge junction along the North-Fiji fracture zone. Three dives allowed to perform a NS transect from the northern wall of the graben to the central volcanic ridge axis. The northern wall gave a 1,200 m deep continuous section through the upper part of the oceanic crust. The succession observed shows parallel dykes, lava tubes and pillow lavas, as well as massive or prismatic lava flows. In several places along the wall, few meters thick tectonic breccias which are flattened against the wall, are wittness of vertical faulting. Both dives carried out to the South revealed the structural complexity of the bottom of the graben. The graben appears like an alternation of small lows and recent scarps associated with open fissures. The bottom of some circular lows is occupied by collapsed lava lakes. Along some of the scarps, the lava tubes are vertical. This implies that the magma has flowed on preexisting topography. In summary, the observations done in this area suggest that the volcanic activity is scattered through several parallel ridges. Now, the tectonic activity seems to prevail on the whole system.

Seven samples of hydrothermal waters have been collected on the "White Lady" chimney. The curve of sulfide concentration as a function of Cl^- defines the mixing between bottom seawater and the most pure sample (1STS-2). It allows to obtain the characteristics of an hydrothermal pure sample as follows: 1, chlorinity <0.3 mol/l; 2, pH~4.5; 3, relatively large alkalinity; 4, low concentration in silica (<15 nmol/l). These are clearly different compared with hydrothermal waters collected on the EPR and the MAR.

On the first site, 13 on-bottom gravity and 6 heat flow measurements were obtained in the axial graben and along an E-W cross section: 12 hydrothermal deposits samples, 25 basalt and 4 sediment samples as a few animals were also collected. Hydrothermal

deposits consist of pyrite-rich massive sulfides, fragments of the active chimney (anhydrite) and altered sulfides.

La campagne STARMER 1 (10-23 juin 1989) du *N-O Nadir* et du submersible *Nautilé* avait pour objectif l'étude géologique et géochimique directe du système d'accrétion actif et de l'hydrothermalisme associé de la partie centrale de la dorsale du bassin nord fidjien (BNF) ([1], [2], [3]). Cette étude constitue le troisième volet d'un projet de coopération franco-japonais qui lie la « Science and Technology Agency » du côté japonais et l'IFREMER du côté français. Les deux premières campagnes réalisées dans le cadre de cette coopération en 1987 et en 1988 sur le navire japonais *Kaiyo* ont permis une reconnaissance très détaillée de la dorsale du BNF entre 16° et 22°S avec les moyens de l'océanographie moderne (Seabeam, magnétisme, dragage, bathysonde, TV et photographies près du fond, sonar latéral...) [4]. La campagne STARMER 1 a été focalisée sur l'étude *in situ* de deux secteurs sélectionnés à partir des moyens de surface mis en œuvre lors de ces campagnes.

Le premier site est localisé dans le graben axial situé au centre du large dôme marquant l'extrémité septentrionale de la portion de dorsale de direction N 15 entre 16°40' S et 18°10' S [5]. Ce dôme axial présente une topographie anormale puisqu'il s'étale sur 20 km de large et culmine à moins de 1900 m de profondeur. Le graben central l'entaille sur environ 2 km de large et 100 m de profondeur. Lors des campagnes *Kaiyo* 87 et 88 du projet STARMER [4], ce site a été exploré en détail par une série de traicts de photographies et de télévision près du fond. Un site hydrothermal actif a ainsi été découvert; il a servi de cible première pour les plongées du submersible *Nautilé*.

Le deuxième site est localisé dans une vaste dépression à fond plat formant l'extrémité sud-ouest de la branche orientale du point triple de 16°40' S. Cette dépression s'est ouverte à la manière d'un bassin en « pull-apart » lors du mouvement senestre le long de la zone de fracture nord fidjienne en réponse à la phase récente d'ouverture océanique du bassin de Lau plus à l'est ([6], [7]). Cette dépression, de 25 km de large au maximum, est limitée au nord et au sud par des murs abrupts correspondant à des failles verticales à rejeu de grande amplitude (1 000 m environ) d'orientation N 60 et N 45. Dans sa partie axiale, ce bassin est parcouru par une double ride en éventail, de direction générale N 60, représentant probablement un axe néovolcanique se propageant vers le NE sur une vingtaine de kilomètres.

RÉSULTATS DE LA CAMPAGNE STARMER 1. — Six plongées du *Nautilé* ont été consacrées à l'exploration détaillée du graben axial de la dorsale entre 16°58' S et 17°00' S. Le tracé des plongées a été défini de façon à explorer la partie centrale du graben, supposée être la plus active, et de localiser les événements hydrothermaux.

La carte structurale simplifiée (Fig. 1) a été établie d'après les observations effectuées durant les six plongées. De 17°S à 16°58' S, le domaine axial est constitué par une alternance de horsts et de grabens orientés suivant la direction N 15, c'est-à-dire parallèlement à la direction de la dorsale à cette latitude. Dans le détail, ce système est organisé en deux grabens latéraux de quelques dizaines de mètres de largeur et de 10 à 20 m de profondeur, limités vers l'axe par deux horsts de même proportion encadrant un graben central. Celui-ci, d'une largeur de 200 m remarquablement constante le long de la zone explorée, est une dépression à fond bombé dont la profondeur varie de 20 à 40 m. Les accidents tectoniques observés sont essentiellement des failles normales de direction N 15

correspondant à des escarpements en gradin limitant ces structures et des fissures, également N 15, ouvertes dans le substratum. La largeur de ces fissures varie de quelques centimètres à plusieurs mètres. Elles sont surtout abondantes dans le graben principal et au voisinage immédiat des talus limitant les horsts latéraux. A l'exception des escarpements, la zone est entièrement recouverte d'une fine pellicule sédimentaire en raison de l'absence d'activité volcanique récente.

Des témoins d'une activité hydrothermale aujourd'hui éteinte (placages d'oxydes métalliques, accumulation de coquilles vides de mollusques, cheminées fossiles arasées, ...) sont répartis tout au long du graben principal. A 16°59'S, dans la partie axiale de ce graben, une zone circulaire de dépôts hydrothermaux fossiles de laquelle émergent quelques chicots rougeâtres représentant des cheminées érodées, s'étend sur quelques dizaines de mètres. L'épaisseur de ces dépôts peut atteindre ici 5 à 7 m. C'est au centre de cet édifice ancien que se trouve le site actif de la « Dame Blanche ». Il s'agit d'une cheminée bifide, blanche, de 3 m de hauteur, constituée uniquement d'anhydrite. Cette cheminée émet par 3 fumeurs principaux un liquide moiré transparent, peu chargé en particules, dont la température maximale mesurée à trois reprises est de 285°C. De nombreux petits événements annexes l'entourent à sa base. Autour de ces événements se sont fixées des colonies animales importantes comprenant notamment, des gastéropodes, des lamellibranches, des crabes, des galathées, et des cirripèdes.

Dans ce secteur, les basaltes présentent des morphologies typiques des laves des dorsales océaniques (tubes et coussins, laves fluides, lacs de lave et coulées massives). Les laves fluides ainsi que les lacs de laves caractérisent surtout la partie axiale du graben central. Les tubes et coussins de lave sont abondants le long des escarpements de faille bordant le graben, associés à quelques coulées massives; ils constituent également de petites rides parallèles à l'axe associées à des laves fluides. Des tubes de lave et quelques coulées fluides forment le substratum et les flancs des grabens secondaires.

Au nord de 16°58.30'S, le domaine axial est moins clairement individualisé. Le système à trois grabens parallèles s'estompe pour laisser place à une large zone de structuration plus diffuse, baptisée domaine d'intersection. On y reconnaît deux familles de failles normales et de fissures, d'orientation N 15 et N 140. La première famille correspond au système de direction N 15 caractérisant la dorsale tandis que les structures de la seconde famille sont parallèles à la limite septentrionale de la dorsale N 15.

Dans le domaine d'intersection, le plancher océanique est essentiellement formé de lacs de lave effondrés laissant apparaître les différents niveaux de remplissage et des piliers basaltiques. A l'extrémité septentrionale de la zone explorée, un important champ hydrothermal fossile a été découvert. Sur une zone d'environ 1 km², les dépôts hydrothermaux (sulfures et oxydes) constituent un amas de plusieurs mètres d'épaisseur jalonné par un véritable cimetière de grandes cheminées éteintes (baptisé « site du Père Lachaise ») dont certaines atteignent 20 m de hauteur. Sur le bord NE de ce site hydrothermal fossile,

EXPLICATIONS DE LA PLANCHE I

Fig. 1. — Plan de position des plongées de la campagne STARMER (1 à 6) sur le Site 1. En cartouche : localisation du Bassin Nord-Fidjien. Cercle=Site 1. Carré=Site 2. XY : coupe bathymétrique.

Fig. 1. — Location map of the STARMER cruise dives (1 to 6) on Site 1. In cartoon: location of the North Fiji Basin. Circle: Site 1. Square: Site 2. XY: bathymetric section.

STARMER 1

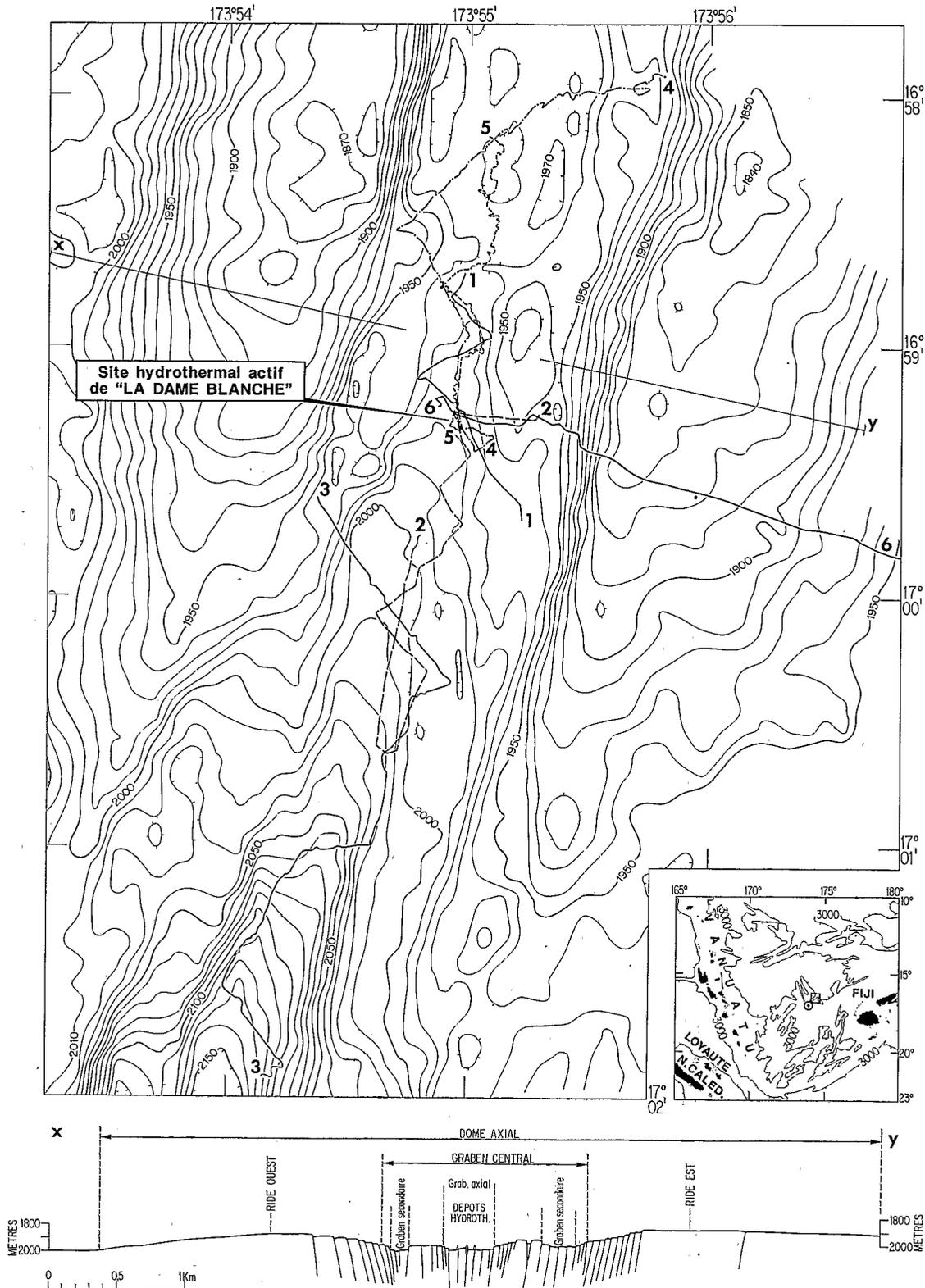


Fig. 1

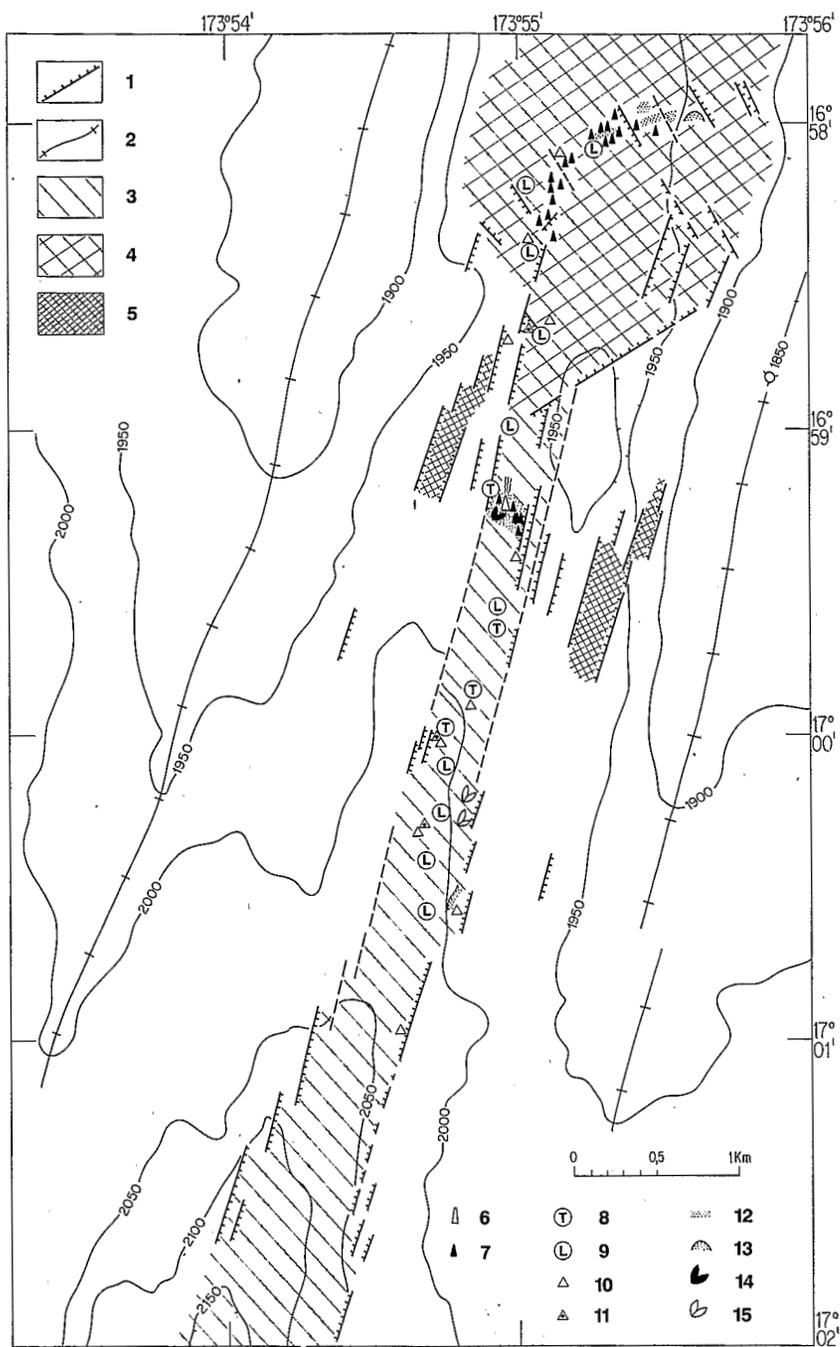


Fig. 2. — Schéma géologique et structural du graben axial. 1, faille normale. 2, crête. 3, graben axial principal. 4, zone d'intersection. 5, grabens secondaires. 6, site hydrothermal actif. 7, cheminées fossiles. 8, anomalie de température. 9, lac de lave. 10, placage hydrothermal jaune. 11, placage hydrothermal noir. 12, dépôts de sulfures. 13, monticule de sulfures. 14, colonies animales vivantes. 15, colonies animales mortes.

Fig. 2. — Geological and structural sketch map of the axial graben. 1, normal fault. 2, crest. 3, main axial graben. 4, intersection zone. 5, secondary grabens. 6, active hydrothermal site. 7, fossil chimneys. 8, temperature anomaly. 9, lava lake. 10, yellow hydrothermal staining. 11, black hydrothermal staining. 12, sulfides deposit. 13, sulfides mound. 14, living animal colonies. 15, dead animal colonies.

une cassure N 140 met à l'affleurement une couche de dépôts hydrothermaux d'épaisseur supérieure à 30 m.

La seconde cible de la campagne STARMER 1 était la reconnaissance géologique et l'étude structurale du graben situé immédiatement à l'est de la jonction des dorsales N 15 et N 160, le long de la fracture nord-fidjienne. Trois plongées ont eu pour objectif la réalisation d'un transect NS, depuis le mur nord du graben jusqu'à l'axe de la ride volcanique médiane.

Le mur nord a fourni une coupe continue de 1 200 m d'épaisseur à travers la partie supérieure de la croûte océanique. La succession observée comporte des dykes parallèles, des laves en tube et en coussin et des coulées massives ou à débit prismatique. En de nombreux endroits, le long du mur, des brèches tectoniques de quelques mètres d'épaisseur, plaquées contre les parois, témoignent du jeu d'accidents verticaux importants.

Les deux plongées effectuées plus au sud ont révélé la complexité structurale du fond du graben. Celui-ci apparaît formé par une alternance de petites dépressions et d'escarpements récents associés à des fissures ouvertes. Le fond de certaines dépressions circulaires est occupé par des lacs de lave éventrés. Le long de nombreux escarpements, les tubes de lave sont verticaux ce qui indique que le magma s'est écoulé sur une topographie accidentée. Au total, les observations effectuées dans ce secteur suggèrent que l'activité volcanique s'est répartie de manière diffuse le long de plusieurs rides parallèles. Actuellement, l'activité tectonique semble prédominer sur l'ensemble du système.

COMPOSITION DES EAUX HYDROTHERMALES. — Les eaux hydrothermales ont été échantillonnées sur le site actif de la « Dame Blanche », au cours de 7 prélèvements réalisés dans trois événements. Deux de ces événements qui ont un fort débit, sont situés de part et d'autre du pied de la cheminée, le troisième, à débit plus faible et légèrement plus éloigné, s'ouvre sur les sulfures constituant la base du site.

Les sept échantillons ont été analysés à bord, nous disposons ainsi de mesures de pH, de concentration des sulfures, des chlorures et de la silice dissoute, et de la valeur de l'alcalinité. La répartition des points représentatifs des différents prélèvements dans un diagramme Sulfures = $f(\text{Cl}^-)$ définit une droite de mélange entre l'eau de mer du fond et l'échantillon 1ST 5-2, le plus pur. Les proportions d'eau hydrothermale dans les différents échantillons varient ainsi de 3 à 90 %.

Les eaux du pôle pur hydrothermal se caractérisent par :

- une température relativement peu élevée, 285°C;
- une chlorinité faible, inférieure à 0,3 mol/l;
- un pH relativement élevé, environ 4,5 u. pH;
- une alcalinité importante pour ce type d'eau;
- une concentration en silice dissoute peu élevée, estimée à environ 15 mmol/l.

Ces caractères permettent de différencier nettement ces eaux hydrothermales de celles de la dorsale Est-Pacifique ou de la dorsale Médio-Atlantique ([7], [8]).

AUTRES MESURES ET PRÉLÈVEMENTS. — Sur le premier site de plongée, 13 mesures de gravimétrie ainsi que 6 mesures de flux de chaleur ont été réalisées sur le fond à partir du submersible *Nautille*, d'une part dans le graben axial et d'autre part le long d'un profil partant de l'axe et descendant le flanc est de la ride.

Le *Nautile* a également récolté 22 échantillons de dépôts hydrothermaux actuels ou fossiles, 23 basaltes, 2 dolérites, 7 échantillons de sédiment, ainsi que quelques animaux vivant à proximité des sites hydrothermaux (crabes, gastéropodes, cirripèdes...). Les échantillons de dépôts hydrothermaux comprennent des sulfures massifs, riches en pyrite, des fragments de la cheminée du site actif (anhydrite), et des sulfures altérés, oxydés et hydratés prélevés sur les sites fossiles.

En conclusion, les résultats, encore préliminaires, acquis pendant la campagne STARMER 1, confirment l'activité actuelle du segment de dorsale exploré par le *Nautile* sur le premier site. Celle-ci se manifeste essentiellement par une intense fracturation et fissuration faisant rejouer les accidents principaux gouvernant la structure de l'ensemble du domaine considéré. Les directions N15 représentent l'orientation générale de la dorsale, les N60 qui sont celles de la zone de fracture nord-fidjienne et les N140 qui sont celles de l'accident qui limite au Nord la dorsale N15.

L'activité hydrothermale se situe exclusivement dans la partie la plus axiale du graben médian. Elle se manifeste sous la forme d'une cheminée constituée d'anhydrite émettant un liquide moiré de relativement faible température (285°C), de pH élevé et de faible chlorinité. L'explication de cette dernière particularité doit probablement être cherchée dans les décharges se produisant lors de changements de phases, lors de la circulation hydrothermale dans les niveaux profonds de la croûte. Ces caractéristiques différencient nettement ces eaux de celles prélevées sur la dorsale Est-Pacifique ou Médio-Atlantique.

Le très important champ de dépôts hydrothermaux fossiles situé à l'extrémité septentrionale du segment de dorsale N15 correspond à un domaine où se superposent trois directions de fracturation. Ceci démontre la relation étroite existant entre l'intensification de la fracturation et l'apparition des venues hydrothermales.

Les plongées réalisées sur le deuxième site suggèrent l'existence d'une série de rides volcaniques se propageant dans la partie centrale du graben constituant l'extrémité orientale de la zone de fracture nord-fidjienne. Sur ces rides, l'activité tectonique semble, dans l'état actuel, prédominer sur l'activité magmatique.

Note remise le 21 septembre 1989, acceptée le 30 octobre 1989.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] C. G. CHASE, *Bull. Geol. Soc. Am.*, 82, 1971, p. 3087-3109.
- [2] L. W. KROENKE, *Bull. CCOP-SOPAC*, 6, 1984, 122 p.
- [3] J.-M. AUZENDE et coll., *Geology*, 16, 1988 a, p. 925-929.
- [4] J.-M. AUZENDE et coll., *C. R. Acad. Sci. Paris*, 306, série II, 1988, p. 971-978.
- [5] J.-M. AUZENDE et coll., *Tectonophysics*, 146, 1988 c, p. 317-351.
- [6] Y. LAFOY et coll., *C. R. Acad. Sci. Paris*, 304, série II, 1987, p. 147-152.
- [7] E. MERLIVAT et coll., *Trans. Am. Geophys. Union*, 62, 1981, p. 45.
- [8] A. C. CAMPBELL et coll., *Nature*, 335, 1988, p. 514-519.

J.-M. A. : G.D.R. G.E.D.O., IFREMER-Brest, B.P. n° 70, 29263 Plouzané;
 T. U., M. J. et M. T. : Geological Survey of Japan, Higashi, Tsukuba 305, Japon;
 C. D. : I.P.G., Paris, 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05;
 J.-P. E. : G.D.R. G.E.D.O., Centre O.R.S.T.O.M., B.P. n° A 5, Nouméa, Nouvelle Calédonie;
 D. G. : Laboratoire de Géochimie des Eaux,
 Université de Paris-VII, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05;
 P. H. : Laboratoire de Géologie, E.N.S., 24, rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 05;
 J. I. : Laboratory for Earthquake Chemistry, Faculty of Science,
 University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japon;
 Y. L. : G.D.R. G.E.D.O., Université de Bretagne occidentale, 6, avenue Le Gorgeu, 29287 Brest Cedex;
 C. M. : Laboratoire de Pétrologie-Magmatologie-Métallogénie,
 Université Pierre-et-Marie-Curie, 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05;
 J. N. et T. T. : Japan Marine Science and Technology Center, 2-15 Natsushima, Yokosuka 237, Japon;
 E. R. : U.R.A. "Géodynamique", Nice - Sophia-Antipolis.

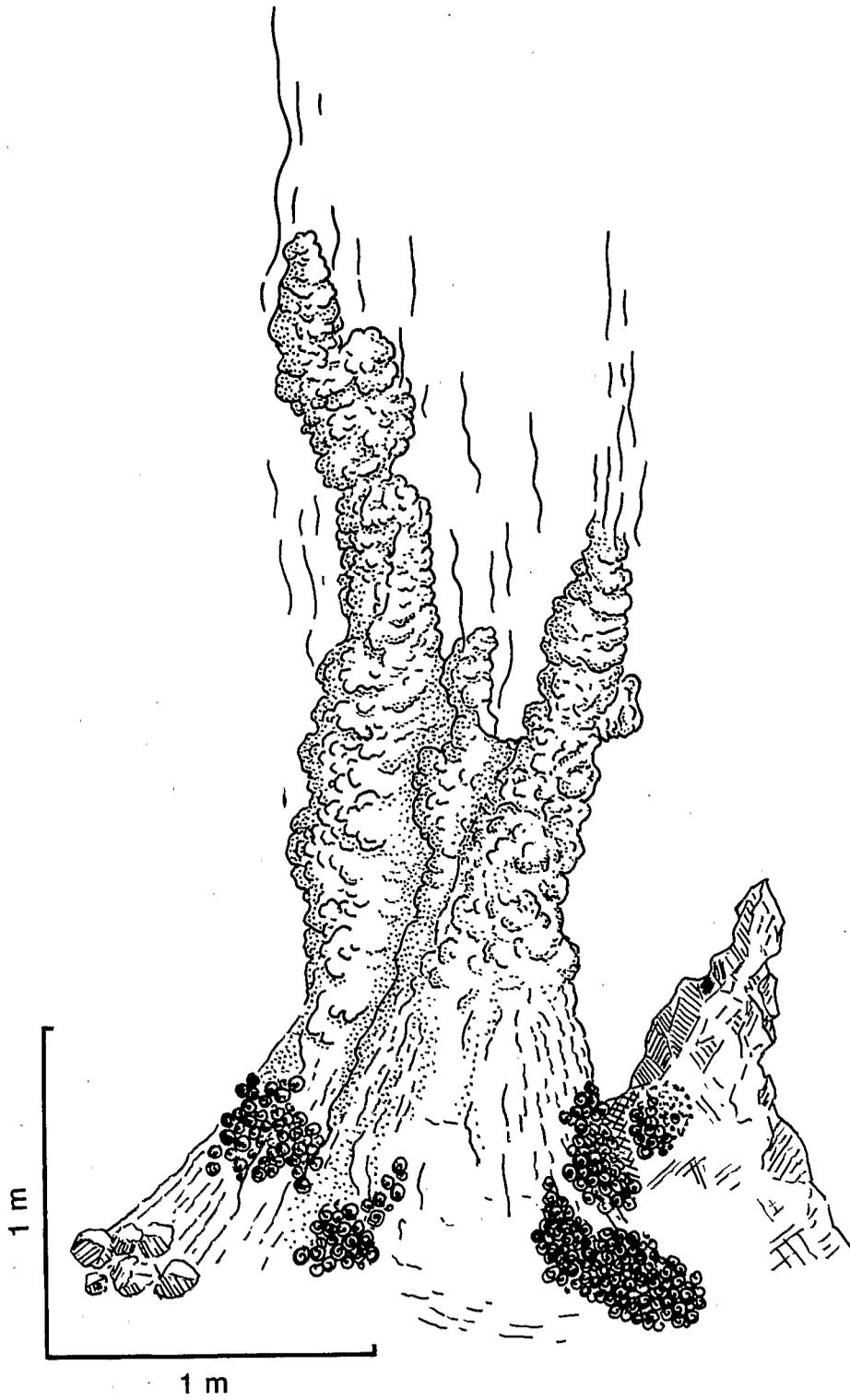


Fig. 3. — Cheminée active « La Dame Blanche ».

Fig. 3. — Active chimney "The White Lady".