

Activité magmatique, tectonique et hydrothermale actuelle sur la Dorsale Est Pacifique entre 17° et 19°S (campagne NAUDUR)

Jean-Marie Auzende, Valérie Ballu, Rodey Batiza, Daniel Bideau, Marie-Hélène Cormier, Yves Fouquet, Patrick Geistdoerfer, Yves Lagabrielle, John Sinton et Piera Spadea

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 319, série II,
p. 811 à 818,
1994

Résumé L'étude par le submersible *Nautilus* de quatre segments de la Dorsale Est Pacifique entre 17° et 18°40'S où le taux d'ouverture est de plus de 150 mm/an, permet de confirmer la variabilité des processus de l'accrétion dans le temps et dans l'espace. Le segment compris entre 17° et 17°30'S montre une intense activité magmatique actuelle ou sub-actuelle; celui compris entre 18°10' et 18°22'S montre une activité essentiellement tectonique et celui compris entre 18°22' et 18°37'S une combinaison des deux, le graben d'extension étant partiellement rempli de laves émises lors d'une éruption extrêmement récente. Partout existe une activité hydrothermale, allant de l'émission de fluides moirés à des fumeurs noirs, associée à divers stades de colonisation animale.

Mots-clés : Océan Pacifique, Dorsale ultra-rapide, Magmatisme, Tectonique, Hydrothermalisme.

Abstract **Present-day magmatic, tectonic and hydrothermal activity on the East Pacific rise between 17° and 19°S (Naudur cruise)**

The submersible study of four segments of the East Pacific Rise between 17° and 18°40'S, where the spreading rate is greater than 150 mm/a, allows us to confirm the variability of the accretion processes. The segment between 17° and 17°30'S shows an intense present-day magmatic activity. The one between 18°10' and 18°22'S shows a mainly tectonic activity. The segment between 18°22' and 18°37'S is an intermediate stage with an axial graben in which fresh lavas were emplaced by an extremely young eruption. On all the segments the hydrothermal activity exists ranging from shimmering water up to black smokers. It is associated with different stages of animal colonization.

Keywords : Pacific Ocean, Ultra-fast spreading ridge, Magmatism, Tectonics, Hydrothermalism.

**Abridged
English
Version**

THE Garret fracture zone (13°S) and the Easter Microplate limit a large segment of the East Pacific Rise where the accretion rate is one of the fastest ever measured (figure 1 a). The calculated spreading rate varies from 141 to 162 mm/a (Naar and Hey, 1989; DeMets *et al.*, 1990; Perram *et al.*, 1993). Spreading along the southern East Pacific Rise of generally faster for the eastern flank than for the western flank (Rea, 1977, 1978; Naar and Hey, 1989; Cormier and MacDonald, 1994).

The whole area has been extensively surveyed since 1982 with Seabeam and Seamark II (Renard *et al.*, 1985; Baker *et al.*, 1985; Lonsdale, 1989; MacDonald *et al.*, 1988;

Perram *et al.*, 1993; Scheirer *et al.*, 1993; Cormier and MacDonald, 1994). A very shallow (less than 1 km-deep) seismic reflector interpreted as the top of the magma chamber has been identified by multichannel seismic surveys (Detrick *et al.*, 1991) at 17°22'S. In 1984 the submersible *Cyana* carried out 8 dives between 17°30' and 21°30'S (Renard *et al.*, 1985; Baker *et al.*, 1985; Gente, 1987; Auclair, 1988) and discovered fossil hydrothermal deposits in collapsed lava-lakes.

The objectives of the NAUDUR Cruise of the *Nautilus* (December 3-30, 1993) were to carry out geological explorations along different segments of the EPR located between 17° and 19°S. Twenty-three dives have been carried

J.-M. A. : IFREMER/CB,
BP n° 70, 29280 Plouzané.
Actuellement à ORSTOM, BP n° A5,
Nouméa, Nouvelle-Calédonie ;

V. B. : IRGP, 2, place Jussieu,
75251 Paris Cedex 05, France ;

R. B., J. S. : SOEST, 2525 Correa road,
Honolulu, HI 96822, USA ;

D. B., Y. F. : IFREMER/CB, BP n° 70,
29280 Plouzané ;

M.H. C. : Université de
Californie-Santa Barbara
Department of Geology-Geophysics,
Santa Barbara, California 93106-9630,
USA ;

P. G. : Muséum d'Histoire Naturelle,
43, rue Cuvier, 75231 Paris Cedex 05,
France ;

Y. L. : Université de Bretagne
Occidentale,
6, avenue Le Gorgeu, 29287 Brest
Cedex, France ;

P. S. : Università degli studi di Udine,
Dipartimento di Georisorse e territorio,
Via Cottonificio, 114-33100 Udine,
Italia.

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 43160

Cote : B ex1

Note

présentée par
Jean Aubouin.

remise le 16 mai 1994,
acceptée après révision
le 1^{er} août 1994.

ORSTOM Documentation



010003901

out in four different regions centred around 17°10'S, 17°25'S, 18°15'S and 18°25'S, respectively (**figure 1 a**).

The spreading ridge in the 17°10'S zone is a dome culminating at less than 2,600 m depth. Two main types of lava have been observed (**figure 1 b**); pillows and tubes on the flanks of the ridge and more fluid, draped or lobate lavas at the axis. The pillows and tubes are capped by a very thin sedimentary cover, but the fluid lavas are extremely fresh and lack any sedimentary dust. Locally, very fresh lobate flows have been observed partially covering clam and serpulid colonies and inactive sulfide mounds and chimneys. In the very axial part of the dome, one or two ridge fissures cut through the most recent lobate flows. Active and fossil vents have been observed and sampled on the eastern side of the axial domain (Fouquet *et al.*, this volume). They consist of a group of small vents of shimmering water and associated colonies of clams, serpulids and so on. Living colonies of clams and serpulids have been observed on very recently extinct vents.

The 17°25'S region shows morphological characteristics very similar to those of the previous area, with an axial dome also culminating at less than 2 600 m. The six dives carried out in this region during the Naudur cruise lead us to conclude that since the Cyana dives in 1984 (Renard *et al.*, 1985) important changes concerning the morphology and the magmatic and hydrothermal activities have occurred. To the north of the surveyed zone (**figure 1 c**), the axial summit has quite a uniform character, with alternation of pillow flows and lobate lavas. At intervals, large collapsed lava lakes, ranging in depth from 2 to 10 m and in width from a few metres to tens of metres, are observed. To the south, extremely fresh lava flows have been observed on the top surface of the ridge. They include pillowed and lobate flows characterized by a very glassy surface with yellowish bacterial-like vellum. These lavas are devoid of sediments and do not show fixed faunas. A discontinuous collapsed lava lake, with 10-12 m high pillars, is present at the dome summit. It is floored either by debris from the very recently collapsed roof or by draped lavas that are clearly covering the debris. Hydrothermal vents are commonly ob-

served in the axial domain (Fouquet *et al.*, this volume). They include diffusion of shimmering water in the more recent areas and high temperature venting (black smokers, 250-340°C) in older regions. Pillars of the recent lava lake clearly serve as conduits for venting of shimmering water. Ambient temperature anomalies have been recorded by the *Nautila* in the region of the summital lava lake. Such anomalies could be related either to the diffuse venting of hot water or to the occurrence of still hot, cooling lavas. Animal colonies show a large variety of species (Geistdoerfer *et al.*, in press).

The "Hump" segment between 18°22'S and 18°34'S (**figure 2 b and c**) exhibits a more complex morphology. A median graben 200 to 500 m wide is bounded by 2 asymmetrical walls. The eastern ridge culminates at 2,600 m and the western ridges at 2,700 m. Six dives were conducted along this segment. Our observations indicate that intense tectonic activity is affecting the entire median graben as shown by the occurrence of numerous open fissures, up to 10 m wide, which separate pillow ridges. This segment is characterized by an important hydrothermal activity (Fouquet *et al.*, this volume) which appears to be concentrated only along a narrow ridge of pillow debris close to the eastern wall of the graben. More than 15 sites have been discovered and sampled. They consist mainly of black smokers (340°C) set on active, white mounds venting hot shimmering water (up to 150°C). The axis of the southern tip of Hump, between 18°34'S and 18°37'S (**figure 2 c**), consists of a 50 m deep and 200 m wide summital graben bounded by two vertical, symmetrical walls in which poorly tectonized, lobate flows, lava lakes and massive lavas have been emplaced. Extremely recent flows, probably from a still active eruption, have been observed covering recent lavas and scree. Hot water has been seen in places escaping from the entire surface of the lavas. The temperature of the water around the submersible increased by 2.5°C at 2-3 m above the lavas.

The segment north of the Hump is characterized by a wide graben bounded by two ridges culminating at 2,650 m. From dive results (**figure 2 a**), the graben appears to have a maximum width of 800 m. It may include a

secondary axial graben with a maximum depth of 80 m. The main boundary faults of the graben have a total vertical offset of 30-40 m. The bottom of the central valley shows intense fissuring. Open fissures, a few metres wide, are extremely common. Some of them separate small horsts that are only a few metres wide and ca. 10 m high. The observed volcanic formations include chaotic, brecciated, draped flows on the flanks of the axial dome, a thick pillow lava unit at the edge of the graben and a collapsed lava lake with up to 10-15 m high relict pillars and associated pillows in the central graben. Numerous fossil and active hydrothermal sites were observed during all the dives and in all parts of the graben (Fouquet *et al.*, this volume). They include large sulfide chimneys, black and white smokers and low-temperature fossil chimneys.

In conclusion, the explored segments clearly illustrate the evolution of the accretion processes at an ultra-fast spreading ridge and the relationships between magmatism, tectonism, hydrothermal processes and biological colonization. At 17°10'S and 17°25'S, accretion occurs in a narrow lava lake area on the top of a dome less than 2,600 m deep. All the observed lavas are recent fluid lavas overlying older flows,

sulfide deposits and animal colonies. At 17°25'S, the magmatic activity can be considered as present-day activity as demonstrated by expulsion of shimmering waters from interstices between the pillows. Between 18°22' and 18°37'S (Hump segment) and between 18°12' and 18°22'S (segment north of the Hump), the accretion is located in a 200 to 800 m-wide graben widely fissured and faulted. The observed lavas are pillows and lava tubes representing a less fluid end-member. At 18°34'S, the 1 to 1.5 km-long, 200 m-wide, explored area constitutes probably the most recent magmatically active area as illustrated by the temperature measured in fissures (150°C), the lack of sulfide deposits and of animal colonies.

In all the explored domains, active and fossil hydrothermal sites have been observed and sampled. At 17°10'S and 17°25'S, their characteristics are close to the 9°50'N sites (Haymon *et al.*, 1993) and some of the 13°N sites. On the contrary, in the Hump and north of the Hump segments, the hydrothermal sites are different with sulfide chimneys prolonged by thin smokers covered by anhydrite, with no or very primitive animal colonization (crabs and fishes), witnesses of the extreme freshness of the area.

INTRODUCTION

La zone de fracture Garret (13°S) et la microplaque de l'île de Pâques (23°S) délimitent un vaste segment de la dorsale Est-Pacifique où le taux d'accrétion est l'un des plus rapides au monde (**figure 1 a**). Les taux d'ouverture calculés varient entre 141 et 162 mm/an (Naar et Hey, 1989; DeMets *et al.*, 1990; Perram *et al.*, 1993). Cormier et MacDonald (1994) démontrent que dans le domaine compris entre 17° et 19°S, l'accrétion est asymétrique (105 mm/an du côté ouest, 45 mm/an vers l'Est). La topographie résultante du domaine considéré est particulièrement hétérogène. Entre 17° et 18°S, l'axe d'accrétion est constitué par une ride culminant à ~ 2600 m. Entre 18° et 19°S, la zone «Hump» (La bosse) est constituée de trois segments de 25 à 40 km de long, séparés par de petites discontinuités de type OSC. (over-

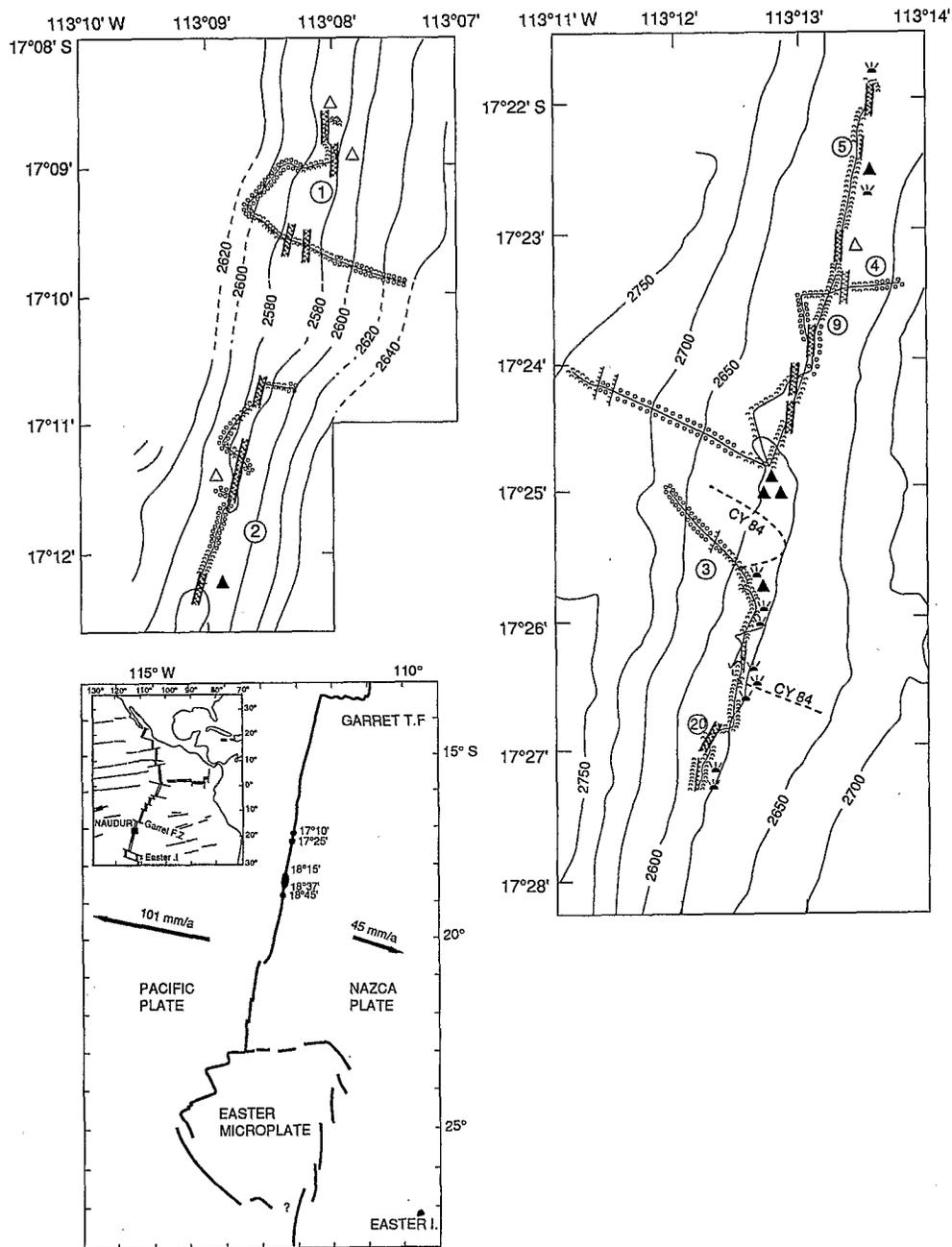
lapping Spreading Centers), l'un situé à 18°22'S et l'autre à 18°37'S.

L'ensemble de la zone a été particulièrement bien cartographié depuis 1984, par des levées SeaBeam (Bäker *et al.*, 1985; Lonsdale, 1989; Cormier et MacDonald, 1994) et des levées SeaMark II, qui permettent d'élargir les observations au domaine hors-axe (MacDonald *et al.*, 1990; Scheirer *et al.*, 1993).

Des campagnes de prélèvements ont permis de définir des variations de différenciation des laves selon le segment considéré (Sinton *et al.*, 1991). Une étude sismique multitrace combinée avec des OBS (Detrick *et al.*, 1991, 1993) a permis d'effectuer une tomographie de l'axe d'accrétion et de définir la profondeur de la chambre magmatique: un réflecteur interprété comme le toit de celle-ci a été enregistré à seulement 1 km de profondeur sous l'axe, à 17°22'S.

Figure 1 a : Carte de localisation des zones de plongée de la campagne Naudur; b : Schéma géologique de la zone 17°10'S d'après les observations faites en plongée (voir légende sur la figure 2); c : Schéma géologique de la zone 17°25'S.

a: Location map of the diving areas of Naudur cruise; b: Geological sketch of the 17°10'S zone from dive observations. (see legend on figure 2); c: Geological sketch of the 17°25'S zone.



Outre ces données acquises à partir de bateaux de surface, quatre séries de plongées du submersible *Cyana* ont eu lieu entre 17°26'S et 21°26'S pendant la campagne Géocyarise I en 1984 (Renard *et al.*, 1985; Bäker *et al.*, 1985; Gente, 1987; Auclair, 1988).

RÉSULTATS DE LA CAMPAGNE NAUDUR (NAUtile Dorsale Ultra Rapide)

L'objectif de la campagne Naudur du *Nautilus* (3-30 décembre 1993) était d'explorer deux secteurs de la Dorsale Est Pacifique. Le

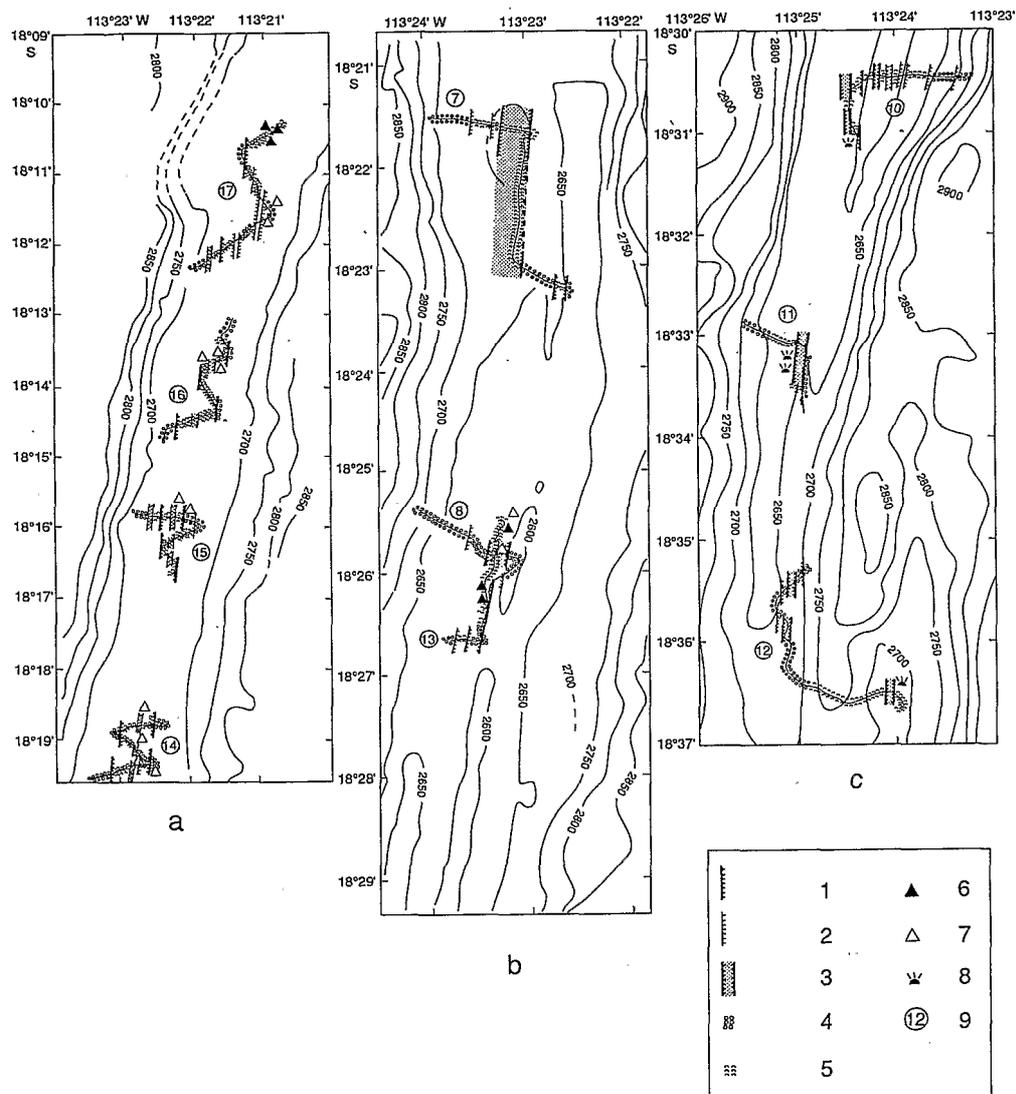


Figure 2 a : Schéma géologique de la zone nord de Hump ; b et c : Schémas géologiques de la zone Hump. 1 = faille normale majeure ; 2 = faille normale ; 3 = Graben axial ; 4 = « pillow lava » ; 5 = lave lobée ; 6 = Site hydrothermal actif ; 7 = Site hydrothermal éteint . 8 = eaux moirées ; 9 = numéro de plongée.

a: Geological sketch of the zone north of the Hump ; b and c: Geological sketches of the Hump zone. 1 = Major normal fault ; 2 = Normal fault ; 3 = Axial graben ; 4 = Pillow lava ; 5 = Lobate lava ; 6 = Active hydrothermal site ; 7 = Extinct hydrothermal site ; 8 = Shimmering waters ; 9 = Number of dive.

premier situé entre 17°10' et 17°25'S est caractérisé par la faible profondeur du dôme axial. Le second, constituant la zone Hump, est situé entre 18°55'S et 18°37'S ; il comprend plusieurs discontinuités séparant des segments aux caractéristiques morphostructurales différentes. Vingt-trois plongées ont été réparties le long de l'axe sur quatre zones centrées sur 17°10'S, 17°25'S, 18°15'S et 18°25'S (figure 1a). Les données récoltées permettent de comparer les différents segments à la fois sur le plan géologique et tectonique.

La zone 17°10'S est caractérisée sur les cartes Seabeam par un dôme de morphologie

très régulière, culminant à moins de 2 600 m de profondeur. Deux plongées ont été réalisées sur la partie supérieure de la ride axiale. Deux principaux types de laves ont été reconnus (figure 1b). Dans la partie constituant les flancs du dôme axial, ce sont des « pillows » et des tubes de lave de grande dimension d'aspect récent mais uniformément recouverts par une fine pellicule sédimentaire. Ces « pillows » et tubes sont surmontés de coulées de laves drapées et lobées sans couverture sédimentaire. Ces coulées ont été émises très récemment et recouvrent par en-

droits des colonies de clams et de serpulidés, des niveaux de sulfures antérieurs et entourent le pied de cheminées hydrothermales maintenant inactives. Ce même phénomène a été décrit entre 9°45' et 9°52'N sur la Dorsale Est Pacifique (Haymon *et al.*, 1993). Cet ensemble de laves actuelles occupe toute la partie sommitale du dôme et s'étend par endroit sur les flancs. Dans sa partie axiale le dôme est coupé longitudinalement par des zones d'effondrement et de fissuration de 20 à 50 m de large, affectant des coulées lobées et des tubes de lave et matérialisant le domaine d'extension actuel. Sur les bords de ce domaine sont installés les sites hydrothermaux actifs et fossiles (Fouquet *et al.*, ce volume). Un site actif a été exploré et échantillonné à 17°08'S et 113°08'W. Il comporte de petits événements émettant un fluide moiré associé à des colonies de clams et de vers serpulidés et vestimentifères. Les sites fossiles (**figure 1 b**) sont très récents puisqu'encore peuplés de vers serpulidés, de filaments bactériens et de clams dont certains sont encore vivants.

La zone 17°25'S présente une morphologie tout à fait comparable à celle de la zone précédente avec un dôme axial à 2 600 m de profondeur. Elle avait été explorée partiellement lors de deux plongées de la campagne Géocyarise 1 du submersible *Cyana* en 1984 (Renard *et al.*, 1985). A l'époque, l'activité magmatique récente s'alignait le long d'une étroite zone d'effondrement de petits lacs de lave. Les manifestations hydrothermales observées étaient représentées par des diffusions dans des cuvettes effondrées où s'installaient des colonies de serpulidés. Lors de la campagne Naudur, cinq plongées réalisées dans cette zone ont permis de constater d'importants changements dans la morphologie et dans l'activité magmatique et hydrothermale par rapport à 1984. L'exploration le long de l'axe a permis d'observer (**figure 1 c**) des laves lobées et des «pillows» d'une extrême fraîcheur, vraisemblablement émis lors d'un épisode actuel (quelques mois, semaines, jours?), dépourvus totalement de sédiments et montrant une surface noire, vitreuse au brillant remarquable. Les «pillows» sont généralement situés au front des coulées suc-

cessives; ils présentent des excroissances vitreuses caractéristiques, expulsées avant la solidification totale de la lave. Dans la zone centrale, les grands tubes de lave commencent à s'effondrer sous l'effet de l'extension axiale et du drainage de la lave sous-jacente. En bordure de ces lacs de lave effondrés, l'eau hydrothermale percole par les orifices des piliers et les interstices entre les tubes. La température ambiante avoisine les 20°C, soit en raison de ces diffusions, soit à cause de la chaleur encore dégagée par des coulées en cours de refroidissement. Cinq sites hydrothermaux actifs ont été découverts entre 17°22'S et 17°26'S (Fouquet *et al.*, ce volume) (**figure 1 c**). Les eaux émises par les événements de type «fumeurs noirs» atteignent des températures de 250 à 340°C.

Le segment *Hump* (la bosse) entre 18°22' et 18°37'S présente une morphologie plus complexe avec un graben médian de 200 à 500 m de large et 50 m de profondeur, encadré par deux rides asymétriques. La ride orientale culmine à moins de 2 600 m alors que la profondeur moyenne de la ride occidentale avoisine 2 700 m. Les 6 plongées réalisées sur ce segment (**figure 2 b et c**) montrent, dans sa partie nord, une intense activité tectonique répartie sur l'ensemble du domaine axial et se manifestant essentiellement par des fissures métriques à décamétriques séparant des rides de «pillows». Ce segment présente une forte activité hydrothermale concentrée le long d'un éperon de débris de pillows localisé dans la partie orientale du graben axial. Plus de 15 sites ont été observés et échantillonnés. Il s'agit de sites de type «fumeurs noirs», dont les fluides atteignent des températures de 340°C, ou de type diffuseur dont les eaux moirées ont des températures variant de 20° à 210°C, alignés le long d'une faille N10-15. Les événements sont le plus souvent de petits conduits installés sur de plus grosses cheminées. Les espèces animales vivantes récoltées sont majoritairement des ascidies, des crabes, des polychètes *Alvinella* et des poissons (Geistdoerfer *et al.*, ce volume). Dans sa partie sud (entre 18°34'S et 18°37'S) (**figure 2 c**), le domaine axial est constitué par un graben de 50 m de profondeur et 200 m de largeur, encadré de murs sub-verticaux,

dans lequel s'installe un lac de laves lobées, drapées et des coulées massives actuelles sur 1,5 km de longueur. Ces coulées de laves lobées très récentes recouvrent des niveaux plus anciens constitués de coulées massives et latéralement les talus d'éboulis situés aux pieds des murs du graben. Sur le bord oriental, de l'eau chaude transparente percole uniformément à travers la surface les laves fraîches. La température mesurée dans de petites fissures actives atteint 150°C. Dans cette zone, la température ambiante du sous-marin s'est élevée de 2,5°C, ce qui peut être relié à une activité magmatique subactuelle. Seuls des crabes et des poissons occupent la zone. Aucun dépôt hydrothermal n'a été observé.

Le segment au Nord de Hump, au Nord de 18°22'S est caractérisé par un large graben (800 m) encadré par deux rides culminant à 2650 m de profondeur. Les quatre plongées réalisées sur cette zone (figure 2 a) montrent la prédominance de l'activité tectonique. Le graben axial profond de 50 à 55 m, est intensément découpé par une alternance de horsts et dépressions de direction NS à N10, de quelques mètres à quelques dizaines de mètres de hauteur et de largeur. Sa partie axiale est occupée par un grand lac de lave effondré, de 40 à 50 m de large et de 25 m de profondeur, dans lequel subsistent des piliers. De nombreux sites hydrothermaux actifs (fumeurs noirs et transparents, T° = 33 à 210°C) et inactifs ont été observés et échantillonnés (Fouquet *et al.*, ce volume). Ils s'alignent sur un éperon NS-N10 limitant à l'Est le graben axial à une profondeur de 2660 m. Ces sites montrent de grandes cheminées de sulfures, mais sont extrêmement pauvres en faune associée (quelques crabes, actinies, cirripèdes, etc.).

CONCLUSION

L'exploration de 4 segments alignés entre 17°10' et 18°45'S sur la Dorsale Est Pacifique permet d'illustrer clairement l'évolution des processus de l'accrétion dans ce domaine et les relations entre magmatisme, tectonique, processus hydrothermaux et colonisation animale. Pour un taux d'ouverture, relativement constant dans la zone, de l'ordre de

160 mm/an (Cormier et MacDonald, 1994), les segments présentent divers stades d'évolution qui se manifestent par une morphologie et un aspect des laves émises particulier et différents types de manifestations hydrothermales et d'associations faunistiques.

A 17°10' et à 17°25'S, l'accrétion se situe sur une étroite zone de lacs de lave effondrés au sommet d'un dôme étroit à moins de 2600 m de profondeur. Toutes les laves observées au sommet du dôme sont des laves fluides très récentes (tubes de lave, laves drapées, laves lobées) qui recouvrent des coulées plus anciennes, des niveaux de sulfures et les faunes fixées résultant d'un épisode antérieur. A 17°25'S, l'activité magmatique dans le graben axial peut être considérée comme actuelle, comme en témoignent les émissions d'eaux moirées à travers les interstices des laves lobées.

Entre 18°22'S et 18°37'S (segment Hump) comme entre 18°12'S et 18°22'S (segment au Nord de Hump) l'accrétion actuelle se situe dans un graben axial de 200 à 800 m de large montrant de nombreuses failles et fissures, au sommet d'une ride à 2650 m de profondeur. Les laves observées sont ici des tubes de lave et des «pillows» représentant un terme moins fluide, associés à des lacs de lave effondrés. Faisant exception aux caractéristiques de ce segment, la zone explorée à 18°34'S constitue probablement une des zones les plus récentes, en terme d'activité magmatique, jamais observées. Les températures mesurées, l'absence de colonisation animale et de dépôts hydrothermaux en sont la preuve.

Dans tout le domaine exploré ont été observés et échantillonnés des sites hydrothermaux actifs et fossiles. Dans la zone 17°10' à 17°25'S, leurs caractéristiques sont voisines de celles des sites observés à 9°50'N (Haymon *et al.*, 1993) et pour certains d'entre eux des sites de 13°N. Par contre, dans les segments Hump et nord de Hump, les sites hydrothermaux sont particuliers; ce sont des cheminées de sulfures se terminant par de minces fumeurs recouverts d'anhydrite, avec une colonisation animale absente ou encore très primitive (crabes et poissons), témoins de l'âge extrêmement récent de la zone.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AUCLAIR, G., 1988. Processus de métallogénèse dans les amas sulfurés océaniques, *Thèse de doctorat*, Université de Bretagne Occidentale, Brest, 340 p.
- BÄCKER, H., LANGE, J. et MARCHIG, V., 1985. Hydrothermal activity and sulfide formation in axial valleys of the East Pacific Rise crest between 18° and 22°S, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 72, p. 9-22.
- CORMIER, M. H. et MACDONALD, K. C., 1994. East Pacific Rise 18°-19°S: asymmetric spreading and ridge reorientation by ultra-fast migration of axial discontinuities, *J. Geophys. Res.* 99, B1, p. 543-564.
- DEMETS, C., GORDON, R. G., ARGUS, D. F. et STEIN, S., 1990. Current plate motions, *Geophys. J. Int.*, 101, p. 425-478.
- DÉTRICK, R. S., HARDING, A. J., KENT, G. M., ORCUTT, J. A., MUTTER, J. C. et BUHL, P., 1993. Seismic structure of the southern East Pacific Rise, *Science*, 259, p. 499-503.
- FOUQUET, Y., AUZENDE, J. M., BALLU, V., BATIZA, R., BIDEAU, D., CORMIER, M. H., GEISTDOERFER, P., LAGABRIELLE, Y., SINTON, J. et SPADEA, P. Hydrothermalisme et sulfures sur la dorsale du Pacifique est entre 17° et 19°S (campagne Naudur), *C.R. Acad. Sci. Paris* (à paraître).
- GEISTDOERFER, P., AUZENDE, J. M., BALLU, V., BATIZA, R., BIDEAU, D., CORMIER, M. H., FOUQUET, Y., LAGABRIELLE, Y., SINTON, J. et SPADEA, P. Hydrothermalisme et communautés animales associées sur la dorsale Est Pacifique entre 17°S et 19°S (Campagne Naudur), *C.R. Acad. Sci. Paris* (à paraître).
- GENTE, P., 1987. Etude morphostructurale comparative de dorsales océaniques à taux d'expansion variés. Schéma d'évolution morphologique de l'axe des dorsales : liaisons avec l'hydrothermalisme, *Thèse de Doctorat*, Université de Bretagne Occidentale, Brest, 371 p.
- HAYMON, R. M. et 14 Collaborateurs, 1993. Volcanic eruption of the mid-oceanic ridge along the East Pacific Rise crest at 9°45-52' : direct submersible observations of seafloor phenomena associated with an eruption event in April 1991, *Earth Plan. Sci. Lett.*, 119, p. 85-101.
- LONSDALE, P., 1989. Segmentation of the Pacific-Nazca spreading center, 1°N-20°S, *J. Geophys. Res.*, 94, p. 12197-12226.
- MACDONALD, K. C., HAYMON, R. M., MILLER, S. P. et SEMPERE, J. C., 1988. Deep-tow and Sea Beam studies of dueling propagating ridge on the East Pacific Rise near 20°40'S, *J. Geophys. Res.*, 93, p. 2875-2898.
- NAAR, D. F. et HEY, R. N., 1989. Recent Pacific-Easter-Nazca plate motions, *Evolution of Mid-Ocean Ridges, IUGG geophysical monograph 57*, SINTON, J. M., éd., p. 9-30.
- PERRAM, L. J., CORMIER, M. H. et MACDONALD, K. C., 1993. Magnetic and tectonic studies of the dueling propagating spreading centers at 20°40'S on the East Pacific Rise: Evidence for crustal rotations, *J. Geophys. Res.*, 98, 13850-13885.
- REA, D. K., 1977. Local axial migration and spreading rate variations, East Pacific Rise 31°S, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 34, p. 78-84.
- REA, D. K., 1978. Asymmetric sea-floor spreading and a nontransform axis offset: The East Pacific Rise 20°S survey area, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 88, p. 678-682.
- RENARD, V., HÉKINIAN, R., FRANCHETEAU, J., BALLARD, R. D. et BÄCKER, H., 1985. Submersible observations at the axis of the ultra-fast-spreading East Pacific Rise (17°30' to 21°30'S), *Earth Planet. Sci. Lett.*, 75, p. 339-353.
- SCHEIRER, D. S., MACDONALD, K. C. et FORSYTH, D. W., 1993. Widespread volcanic and tectonic activity on the southern East Pacific Rise and its flanks, *RIDGE Events*, 4, p. 1-2 and 8-10.
- SINTON, J. M., SMAGLIK, S. M., MAHONEY, J. J. et MACDONALD, K. C., 1991. Magmatic processes at superfast Mid-Ocean Ridges: Glass compositional variations along the East Pacific Rise 13°-23°S, *J. Geophys. Res.*, 96, p. 6133-6155.