

Première exploration *in situ* de la dorsale médio-Atlantique au sud de la zone de fracture Atlantis (29°06'N-43°11'W)

Jean-Marie AUZENDE, Maurice TIVEY, Mathilde CANNAT, Pascal GENTE,
Jean-Pierre HENRIET, Thierry JUTEAU, Jeffrey KARSON et Yves LAGABRIELLE

Résumé – Lors de la campagne Kanaut (15 novembre-16 décembre 1992) du *Nautilé* et de son navire support *Le-Nadir*, une plongée a été consacrée à l'étude détaillée d'un secteur de la ride néovolcanique de l'axe de la dorsale médio-Atlantique autour de 29°06'N et 43°11'W. Cette étude permet de souligner le rôle prépondérant que jouent les centaines de petits édifices volcaniques dans la construction de la ride néovolcanique, par leur juxtaposition et leur superposition. Ceci confirme et affine les observations faites à partir des données des sondeurs multifaisceaux et les sonars latéraux. La très forte anomalie magnétique associée à ces édifices penche en faveur de leur extrême fraîcheur.

First *in situ* exploration of the MAR south of the Atlantis fracture zone (29°06'N-43°11'W)

Abstract – During the Kanaut cruise of the submersible *Nautilé* and its mothership *Le-Nadir* (15 November-16 December 1992), one dive was devoted to the detailed study of a specific area of the neovolcanic ridge of the MAR around 29°06'N and 43°11'W. This study emphasizes the importance of the juxtaposition and the stacking of hundreds of small volcanoes in the construction of a neovolcanic ridge and confirms the general observation made from multibeam and side-scan sonar data. The very large magnetic anomaly associated with these massifs favours an extreme freshness.

Abridged English Version – Since the Famous project (Renard *et al.*, 1975), the role of the small volcanic massifs in the construction of the neovolcanic ridges of the MAR has been well-defined. These elongated or circular features are characteristic of the slow-spreading MAR and rarely exist in other contexts, such as the EPR (Fornari *et al.*, 1987). The enhanced performance of present-day sounding systems (multibeam and side-scan sonars) has allowed documentation of the existence and distribution of these volcanic structures (Smith and Cann., 1990; Smith and Cann, 1992). In the MAR axial valley between 24 and 30°N, a recent TOBI survey Cann *et al.*, 1992) has shown that these volcanoes are hectometric to kilometric in size and several hundred of them are aligned along the valley floor to constitute the neovolcanic ridge.

During the Kanaut cruise, one dive was carried out in the axial valley at 29°05'58N and 43°11'69W, exploring a ten square kilometre surface of the neovolcanic ridge.

The bathymetric map of the ridge axis (Purdy *et al.*, 1990) shows an asymmetric rift valley with variable trend and width (*fig. 1*). The NS oriented western wall is very steep between 2,800 and 3,200 m. The eastern wall is less well defined being composed of successive steps trending N10 to N40. South of 29°04'N the width of the axial valley is 3.5 to 4 km increasing to the north up to 7 km where the dive was located. The rift valley is cut by two diverging fault systems. On both sides of the faults the sea floor is covered by small volcanoes. On the morphostructural map resulting from the dive observations (*figs. 2 and 3 a and b*), three domains may be identified:

– to the west a steep wall, trending N40 and N160 between 3,170 and 3,200 m, entirely consisting of lava tubes and pillows, with a thin sedimentary cover. This wall probably reflects a previous tectonic fault, recently covered by the lava flows.

— in the central part, the area is characterized as a platform with three small volcanic domes, 10 to 20 m high and approximately 50 m in diameter with extremely fresh glassy lava tubes. The top of the southernmost volcano has recently been reactivated with a new small cone built within the centre of the old cone. These three domes have developed on top of an older volcanic platform, covered by a continuous sedimentary film, and are separated by a deep, N160 trending valley;

— to the East, the central platform is bounded by a succession of steep slope segments, about 80 m high and trending (from N to S) N40, N160 and NS. It is built by recent lava tubes and pillow flows. In some places normal faults cut the tubes and pillows.

In situ magnetic measurements performed with the Woods Hole Oceanographic Institution gradiometer prove a good correlation between the magnetic field and the recent volcanic structure of the area (*fig. 4 a*). A large magnetic anomaly (ca. 12,000 nT) (*fig. 4 b*) is associated with the volcanic structures, suggesting a young age and the virtual absence of hydrothermal weathering. Such an anomaly is characteristic of the central anomaly high which is found over the most recent crust of the axis on many mid-ocean ridges (Klitgord *et al.*, 1975; Tivey *et al.*, 1987).

All the rocks sampled during the dive are fresh glassy aphyric basalts, except one sample taken 300 m east of the platform and which is composed of scoriated lava, covered with a manganese crust and sediments.

Current hypotheses about the segmentation of mid-oceanic ridges suggest the existence of about 80 km long segments at the "hot" fast spreading ridges (MacDonald, 1982; Gente *et al.*, 1984; Kappel and Ryan, 1986; Gente, 1987) and 40 to 50 km long segments in the "cold" slow spreading ridges (Gente, 1987; Sempéré *et al.*, 1990). In the latter case, the segmentation should reflect the along-axis alternation at zero age offset of magmatic and amagmatic domains (Karson *et al.*, 1987; Mével *et al.*, 1989), as the surface expression of upper mantle dynamics. The dive observations suggest processes even at a finer scale. In some domains of the ridge axis and probably as the result of peculiar thermal conditions, a pulsated magmatic supply seems to control the building of systems of small volcanoes, which by stacking yield a neovolcanic ridge.

INTRODUCTION. — Depuis l'opération Famous et le levé bathymétrique (Renard *et al.*, 1975) qui lui a servi de support, on a mis en évidence le rôle considérable joué par les petits massifs volcaniques de dimensions kilométriques dans la construction de la partie la plus active de la vallée de la dorsale médio-Atlantique. Ces massifs de forme allongée ou circulaire constituent l'essentiel de ce que l'on appelle « la ride néovolcanique ». Ils semblent caractéristiques de la ride médio-Atlantique, leur présence dans d'autres domaines dorsaliens comme la dorsale Est Pacifique n'ayant été que très rarement illustrée (Fornari *et al.*, 1987). Depuis quelques années, grâce au développement considérable des moyens d'investigation tels que sondeurs multifaisceaux et sonar latéraux, leur existence et leur distribution ont pu être précisées. Dans deux articles récents D. Smith et J. Cann (1990, 1992) ont tenté de décrire et quantifier ces massifs et de définir leur rôle dans la vallée axiale de la ride médio-Atlantique entre 24° et 30°N. Ces volcans se comptent par centaines et leurs dimensions varient de quelques mètres à quelques centaines de mètres de diamètre et de quelques dizaines de mètres à 300 m de hauteur. Un récent levé du TOBI, sonar latéral tracté près du fond, confirme et illustre l'existence de ces massifs (Cann *et al.*, 1992). Leur assemblage et superposition aboutit à l'édification de la partie

majeure de la ride néovolcanique qui partage la vallée axiale de la ride médio-Atlantique. Lors de la campagne Kanaut du *Nadir* et du *Nautilé* (15 novembre-16 décembre 1992), partie du programme franco-américain FARA, une plongée a été consacrée à l'exploration très détaillée d'un de ces systèmes de volcans dans une zone d'environ 10 km², centrée sur 29°05'58N et 43°11'69W, dans l'axe de la dorsale au sud de la fracture Atlantis. Pendant la plongée du *Nautilé*, outre les observations et prélèvements de roches habituels, des mesures magnétiques *in situ* ont été réalisées à partir d'un outil installé sur le submersible (Tivey, en préparation).

Cadre général du site exploré. — La bathymétrie Sea Beam de la zone (Purdy *et al.*, 1990) montre une vallée axiale asymétrique de direction et de largeur variable (*fig. 1*).

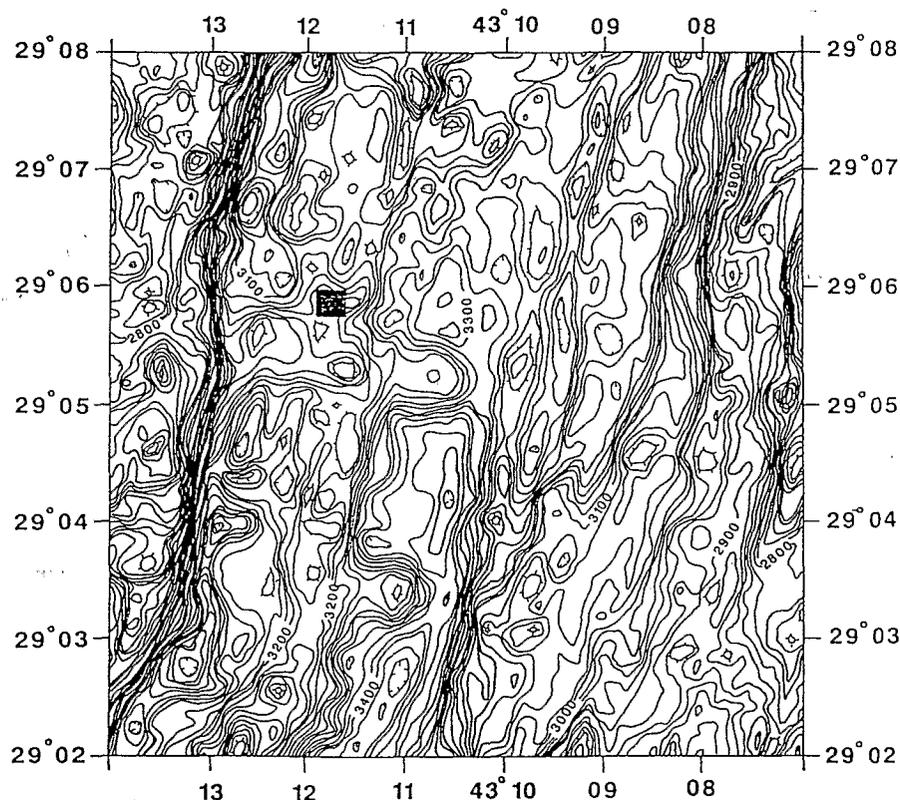


Fig. 1. — Carte bathymétrique simplifiée d'après Purdy *et al.* (1990) de l'axe de la dorsale autour de 29°N. La zone explorée est marquée par le carré gris.

Fig. 1. — Simplified bathymetric map of the MAR axis around 29°N from Purdy *et al.* (1990). The explored area is marked in grey.

Le mur ouest est très abrupt avec un dénivelé allant de 2 800 à 3 200 m. Sa direction oscille autour de NS. Le mur Est est moins bien défini et se présente en plusieurs paliers successifs dont l'orientation varie de N10 à N40. Au sud de 29°04'N la largeur de la vallée axiale (profondeur supérieure à 3 200 m) n'est que de 3,5 à 4 km, tandis qu'elle s'élargit au nord pour atteindre 7 km au niveau de la plongée. La structure du domaine axial est complexe, avec en particulier deux alignements de faille divergents. L'occidental est parallèle au mur ouest alors que l'oriental s'aligne sur le mur est. De part et d'autre de ces failles et en plus grands nombre du côté ouest le fond de la vallée est tapissé de

petits édifices volcaniques. Alternant avec ces derniers de petites dépressions de 100 à 200 m de profondeur occupent la vallée.

RÉSULTATS DE LA PLONGÉE *Nautilé*. — *Morphostructure*. — Un des objectifs de la plongée était la recherche d'un OBS (oceanic bottom seismometer) perdu par nos collègues Américains lors d'une récente campagne. Cette recherche a été conduite de manière à pouvoir en même temps effectuer une étude géologique détaillée de cette portion de l'axe

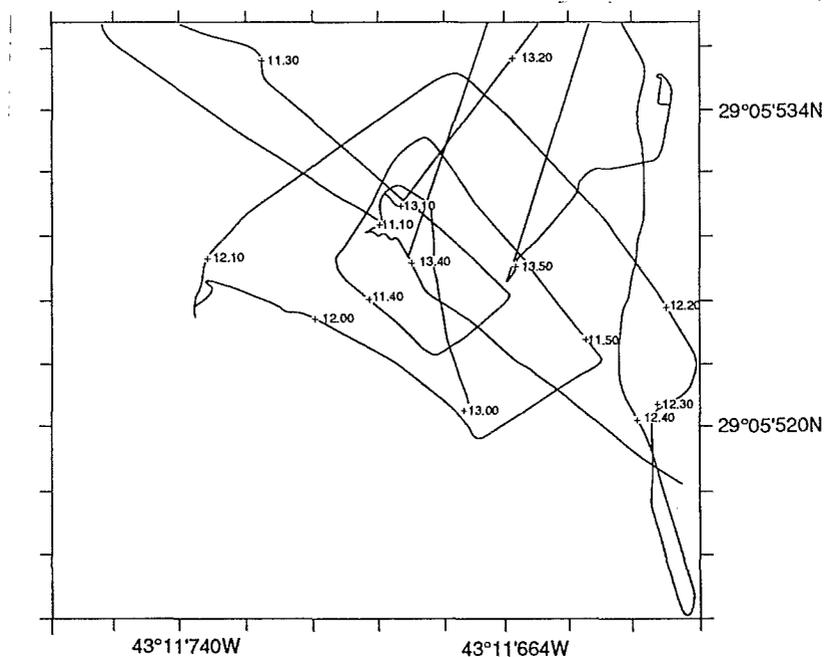


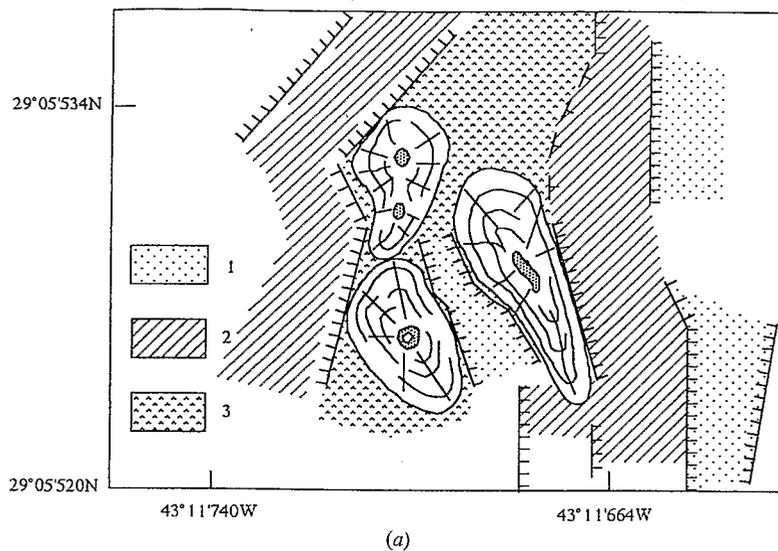
Fig. 2. — Plan de position de la plongée Kanaut 1.

Fig. 2. — Location map of the Kanaut 1 dive.

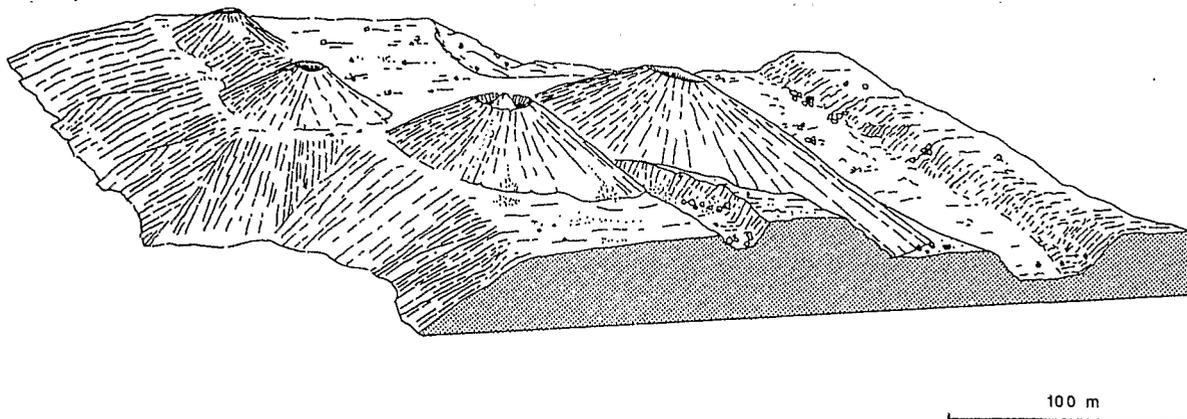
de la dorsale. Les routes suivies (*fig. 2*) centrées sur 29°05'58N et 43°11'69W, ont permis l'établissement d'un schéma morphostructural (*fig. 3 a et b*) sur lequel on distingue trois domaines :

- à l'ouest, une paroi relativement abrupte comprise entre 3 170 et 3 200 m de profondeur. Sa structure est guidée par des directions N40 et N160. Elle est uniquement constituée de tubes de lave et de pillow-lava d'aspect relativement frais, seulement saupoudrés par endroits d'une fine pellicule de sédiments. Cette paroi se superpose vraisemblablement à un ancien accident tectonique aujourd'hui recouvert par les émissions plus récentes de lave. De ce fait on n'y observe que très peu de sections de tubes et de pillows et pratiquement aucune faille ou fissure;

- au centre, un domaine caractérisé par une succession de trois dômes volcaniques principaux, de 10 à 20 m de hauteur et d'une cinquantaine de mètres de diamètre. Ces dômes sont constitués de tubes de lave d'aspect très frais laissant apparaître à leur surface du verre volcanique brillant. Ils sont séparés par une profonde dépression de direction N160. Le dôme le plus au sud est effondré à son sommet et dans le cratère central s'est mis en place un nouveau cône de taille métrique. Les dômes observés sont installés sur une plateforme de tubes de lave et de pillows d'aspect plus ancien et recouverte d'une pellicule sédimentaire continue;



(a)



(b)

Fig. 3. — (a) Schéma géologique établi à partir des données de la plongée. 1 : Escarpement; 2 : Tubes de lave et Pillows; 3 : Cone volcanique; 4 : Talus d'éboulis (b) Vue artistique de la zone explorée.

Fig. 3. — (a) Geological sketch established from dive data. 1: Scarp; 2: Lava tubes and pillows; 3: Volcanic cone; 4: Talus. (b) Artist's impression of the explored area.

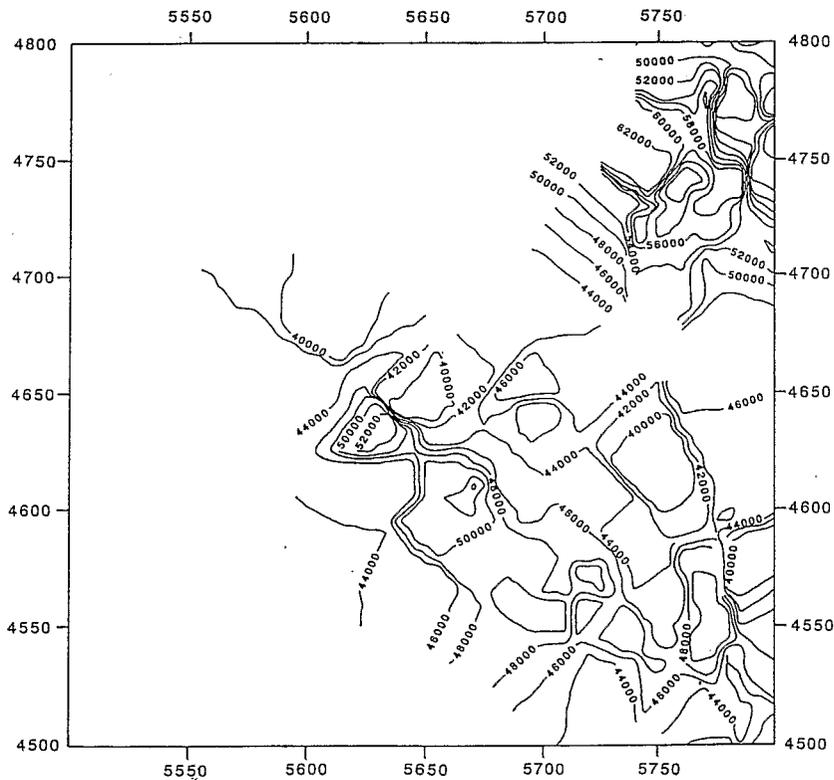
— à l'est, la plate-forme sommitale est bordée par une paroi fortement pentue montrant par endroits des murs verticaux, de direction N40, N160 et NS. Sa hauteur peut atteindre 80 m, elle est constituée de tubes de lave parfois sectionnés par des failles normales, mais ici encore ces manifestations tectoniques sont réduites, la majeure partie de la paroi semble avoir été recouverte par des émissions récentes. Le pied de la pente est occupée par un pierrier provenant du démantèlement gravitaire des tubes de lave.

Magnétisme. — Des mesures magnétiques ont été réalisées en continu pendant la plongée à partir d'un gradiomètre, mis au point par la « Woods Hole Oceanographic Institution », et installé à bord du *Nautilé*. Cet appareil mesure les trois composantes du champ magnétique et permet le calcul du gradient le long des profils effectués. La carte résultante (fig. 4 a) montre que le champ magnétique se superpose assez étroitement aux structures (fig. 3). On notera que les massifs volcaniques explorés provoquent une très importante anomalie magnétique (12 000 nT) (fig. 4 b). Ceci suggère un âge très récent

pour les laves, une faible intensité de la fracturation et l'absence de circulation de l'eau dans la croûte néoformée. Ce type d'anomalie est caractéristique du haut magnétique axial mesuré sur la croûte récente de la plupart des rides médio-océaniques (Klitgord *et al.*, 1975; Tivey *et al.*, 1987).

Prélèvements de roches. — Les trois échantillons prélevés dans le domaine exploré sont des fragments de basalte aphyrique ne présentant pas de couverture de manganèse et montrant à leur surface des verres très frais, non oxydés. Un quatrième échantillon prélevé à 300 m à l'est de la zone couverte est constitué de lave scoriacée d'aspect plus ancien, couverte d'encroûtements de manganèse. Cet échantillon provient d'une zone où la couverture sédimentaire est relativement épaisse.

DISCUSSION. CONCLUSION. — Le secteur de la ride néovolcanique de la dorsale médio-Atlantique exploré pendant la campagne Kanaut nous renseigne sur l'un des processus de création de la croûte océanique. En effet depuis les hypothèses invoquant un flux homogène et permanent de matière à l'axe des dorsales, les données acquises dans les 10 dernières années permettent de conclure au fonctionnement discontinu des dorsales. Ceci, considéré à petite échelle de temps. Il est vraisemblable qu'à plus longue période (de l'ordre de la centaine de milliers au million d'années) le système s'homogénéise et donne une image plus stable. Les hypothèses invoquant une segmentation des dorsales et leur fonctionnement discontinu définissent des segments de l'ordre de 80 km de long pour des dorsales à forte thermicité, comme par exemple la dorsale Est Pacifique (MacDonald, 1982; Gente *et al.*, 1984; Kappel et Ryan, 1986; Gente, 1987) et de l'ordre de 40 à 50 km pour les dorsales « froides » (Gente, 1987; Sempéré *et al.*, 1990). Pour



(a)

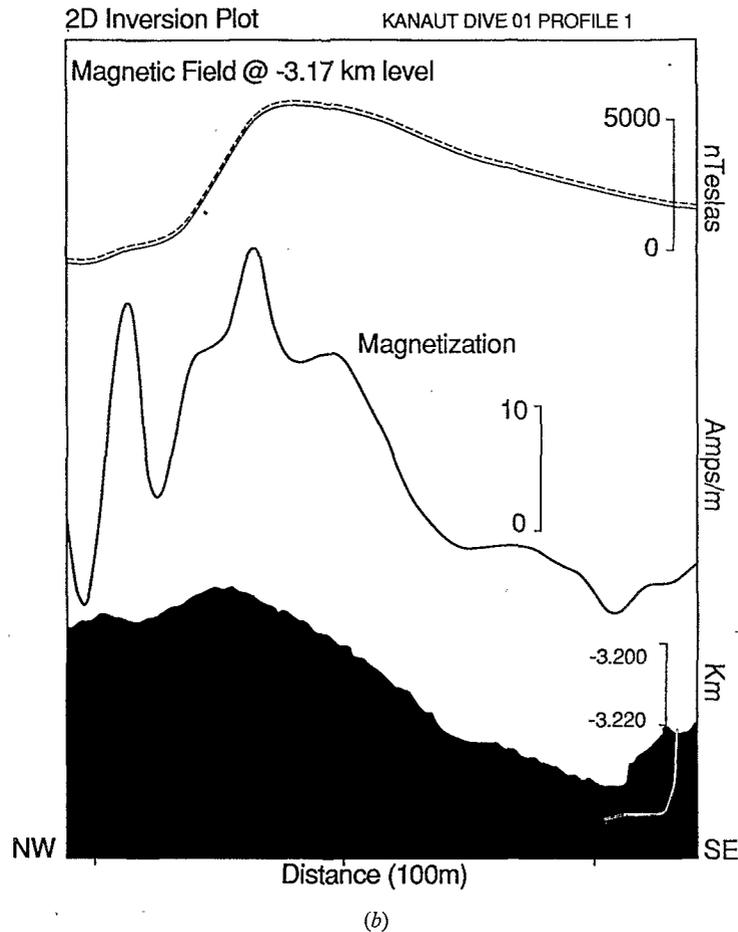


Fig. 4. — (a) Carte magnétique réalisée à partir des mesures *in situ*. (b) Profil magnétique réalisé par le *Nautilus* sur l'un des volcans traversés pendant la plongée 1. En haut, profil du champ magnétique calculé pour un niveau de 3,17 km de profondeur (environ 10 m au-dessus du volcan). Les pointillés représentent le champ magnétique recalculé à partir de la magnétisation et de la topographie. Le profil du milieu est la magnétisation calculée pour une source de 0,5 km d'épaisseur. Le profil du bas est la courbe bathymétrique mesurée par le *Nautilus*.

Fig. 4. — (4) Magnetic map resulting from *in situ* measurements. (b) *Nautilus* magnetic profile over one of the volcanoes traversed during the dive 1. The top profile shows the magnetic field upward continued to a level plane of -3.17 km (ca. 10 m above the volcano summit). The dashed line is the recomputed field based on the magnetization and topography. The middle profile is the magnetization computed for a 0.5 km thick source layer. The bottom profile shows the seafloor bathymetry measured by the *Nautilus*.

ces dernières, cette segmentation a pour effet l'alternance, sur une même dorsale à âge zéro, de domaines à forte production magmatique et de domaines amagmatiques, allant jusqu'à la dénudation des niveaux profonds de la croûte et parfois du manteau supérieur (Karson *et al.*, 1987; Mével *et al.*, 1989). Ces diverses phases sont vraisemblablement l'illustration superficielle de processus qui affectent le manteau supérieur. Dans le cas qui nous intéresse, les processus invoqués dans l'édification de la croûte (Smith et Cann, 1992) sont encore à plus petite échelle et suggèrent que dans certains secteurs des dorsales lentes (froides) et probablement sous certaines conditions thermiques, l'apport magmatique à l'axe se fait par pulsations successives aboutissant à la mise en place de

petits édifices volcaniques, dont la juxtaposition donnera les rides néovolcaniques. Dans l'état actuel des connaissances, il est difficile de généraliser ce processus à l'ensemble de la dorsale médio-Atlantique, trop peu de zones ayant été explorées avec suffisamment de détail. La zone explorée par le *Nautilus* pendant la campagne Kanaut pourrait néanmoins s'avérer représentative de ce type de création de la croûte océanique.

Note remise le 11 janvier 1993, acceptée le 23 mars 1993.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- J. R. CANN *et al.*, TOBI survey of the Mid-Atlantic Ridge, Boston, Nov. 1992, *FARA symposium 1992* (Abstract).
- D. J. FORNARI, R. BATIZA et M. A. LUCKMANN, Seamount abundances and distribution near the East Pacific Rise 0-24°N based on seabeam data, in: *Seamounts, Islands and Atolls, Geophys. Monogr.*, 43, B. H. KEATING *et al.*, AGU, Washington, DC, p. 13-21.
- P. GENTE, J. M. AUZENDE, H. BOUGAULT et M. VOISSET, Variabilité morphotectonique le long de la dorsale Est-Pacifique entre 11 et 13°N. Résultats préliminaires de la campagne Géocyarise 2, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 299, série II, 1984, p. 1337-1342.
- P. GENTE, Étude morphostructurale comparative des 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, 1987, 371 p.
- E. S. KAPPEL et W. B. F. RYAN, Volcanic Episodicity and a non-Steady state Rift valley Along Northeast Pacific Spreading Center: Evidence from SeaMARC 1, *J. Geophys. Res.*, 13, 6, 1986, p. 13925-13940.
- J. A. KARSON, G. THOMPSON, S. E. HUMPHRIES, J. M. EDMOND, W. B. BRYAN, J. R. BROWN, A. T. WINTERS, R. A. POCKALNY, J. F. CASEY, A. C. CAMPBELL, G. KLINKHAMMER, M. R. PALMER, R. J. KINZLER et M. M. SULANOVSKA, Along axis variations in seafloor spreading in the MARK area, *Nature*, 328, 1987, p. 681-685.
- K. D. KLITGORD, S. P. HUESTIS, J. D. MUDIE et R. L. PARKER, An analysis of Near-Bottom Magnetic Anomalies: Sea-Floor Spreading and the Magnetized Layer, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 43, 1975, p. 387-424.
- K. C. MACDONALD, Mid Ocean Ridges, fine scale tectonic, volcanic and hydrothermal processes within the plate boundary zone, *Rev. Earth Planet. Sci.*, 10, 1982, p. 155-190.
- C. MÉVEL, J. M. AUZENDE, M. CANNAT, J. P. DONVAL, J. DUBOIS, Y. FOUQUET, P. GENTE, D. GRIMAUD, J. A. KARSON, M. SÉGONZAC et M. STIEVENARD, La ride du Snake-Pit (dorsale médio-Atlantique, 23°22'N) : résultats préliminaires de la campagne Hydrosnake, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 308, série II, 1989, p. 454-552.
- G. M. PURDY, J. C. SEMPÉRÉ, H. SHOUTEN, D. L. DUBOIS et R. C. DUBOIS et R. GOLGSMITH, Bathymetry of the Mid-Atlantic Ridge, 24°-31°N : A map series, *Mar. Geophys. res.*, 12, 1990, p. 247-252.
- V. RENARD, B. SCHRUMPF et J. C. SIBUET, Bathymétrie détaillée d'une partie de vallée du rift et de faille transformante près de 36°50'N dans l'Océan Atlantique, *Carte*, Pub. CNEXO, Paris, 1975.
- J. C. SEMPÉRÉ, G. M. PURDY et H. SCHOUTEN, Segmentation of the Mid-Atlantic Ridge Between 24°N and 30°40'N, *Nature*, 344, 1990, p. 427-431.
- D. K. SMITH et J. R. CANN, Hundred of small volcanoes on the median floor of the Mid-Atlantic Ridge, *Nature*, 348, 1990, p. 152-155.
- D. K. SMITH et J. R. CANN, The role of Seamount Volcanism in Crustal Construction at the Mid-Atlantic Ridge (24°-30°N), *J. Geophys. Res.*, 1992, 97, n° B2, 1992, p. 1645-1658.
- M. A. TIVEY et H. P. JOHNSON, The central anomaly magnetic high: implications for ocean crust construction and evolution, *J. Geophys. Res.*, 92, 1987, p. 12685-12694.

J.-M. A. et J.-P. H. : *IFREMER/CB*, PB n° 70, Plouzané, France;

J.-M. A. : *adresse actuelle, ORSTOM-UR 1 F*, BP n° A 5, Nouméa, Nouvelle-Calédonie;

M. T. : *WHOI, Woods Hole, Massachusset*, 02543, USA;

M. C. : *UPMC, Laboratoire de Pétrologie*, Tour, n° 26, 4, place Jussieu, 75257 Paris Cedex 05, France;

P. G., T. J. et Y. L. : *UBO*, 6, avenue Le Gorgeu, 29287 Brest Cedex, France;

J. K. : *Department of Geology, Duke University, Durham, North Carolina* 27706, USA.