

Activité hydrothermale et structure axiale des dorsales Est-Pacifique et médio-Atlantique

Dorsale
Atlantique, Pacifique
Hydrothermalisme
Méthane
Manganèse

Rise
Atlantic and Pacific Oceans
Hydrothermalism
Methane
Manganese

Henri BOUGAULT, Jean-Luc CHARLOU, Yves FOUQUET et Hubert David NEEDHAM

Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER), Centre de Brest,
B.P. 70, 29263 Plouzané Cedex, France.

Équipe Hydrofast : H. Bougault, P. Appriou, A. Birolleau, J.-L. Charlou, K. Crane,
J. Étoubleau, Y. Fouquet, P. Gente, F. Harmegnies, J.-Y. Landuré, A. Le Noac'h, H. Pellé,
B. Sichler, M. Voisset et P. Watremez.

Équipe Ridelente : H. Bougault, P. Appriou, B. Bienvenu, P. Cambon, J.-L. Charlou,
B. Collette, J.-P. Donval, L. Dosso, G. Floch, Y. Fouquet, M. Morvan, H. Pellé, J. Poncin,
D. Thieblemont, A. Vangriesheim

Reçu le 15/09/89, révisé le 29/01/90, accepté le 06/02/90.

RÉSUMÉ

La première étude systématique de la variation d'activité hydrothermale le long de la dorsale Est-Pacifique (EPR) sur une centaine de kilomètres entre 12°N et 13°10'N (campagne Hydrofast du N/O Jean Charcot, décembre 1986) a démontré que l'activité hydrothermale le long de l'axe y est partout présente, mais qu'elle n'est pas répartie d'une manière aléatoire. L'intensité de l'activité hydrothermale dépend très clairement des discontinuités structurales présentes le long de l'axe. L'activité hydrothermale maximale est localisée entre deux petits «Overlapping Spreading Centres» situés respectivement à 12°37'N et 12°54'N.

Les premiers résultats concernant la variation d'activité hydrothermale le long de la dorsale médio-atlantique (MAR) entre la zone de fracture 15°20'N et la zone de fracture Kane démontrent également que l'activité hydrothermale est partout présente le long de l'axe de cette partie de la MAR, et qu'elle n'est pas répartie d'une manière aléatoire (campagne Ridelente du N/O Jean Charcot, janvier 1988). Le maximum d'activité hydrothermale a été trouvé à proximité des intersections de l'axe de la dorsale avec les zones de fracture (intersection Sud Kane, intersections Nord et Sud 15°20'N). De plus, ces maxima d'activité hydrothermale se trouvent corrélés à la présence de roches ultra-basiques échantillonnées sur des «hauts structuraux» situés sur le plancher interne de la vallée axiale. L'eau de mer et des fluides hydrothermaux pénètrent donc très probablement jusqu'à l'interface croûte / manteau : le phénomène de serpentinisation des roches ultrabasiques et la diminution de densité qu'ils provoquent permettent l'affleurement de ces formations. Ceci est particulièrement bien documenté aux intersections Nord et Sud de la zone de fracture 15°20'N.

Ainsi, l'étude systématique de la variation d'activité hydrothermale le long de l'axe d'une dorsale révèle deux résultats importants : l'activité hydrothermale, partout présente, dépend très fortement des discontinuités structurales (OSC sur la dorsale Est-Pacifique, zone de fracture sur la dorsale médio-atlantique) et elle était considérée jusqu'ici comme un processus majeur associé à la construction de la croûte océanique. Les résultats démontrent que la couche 3 est impliquée - au moins sur la MAR - et que le processus hydrothermal

contribue à la construction de la croûte océanique, provoquant la remontée et l'affleurement de massifs ultrabasiques serpentinisés dans le plancher interne de la vallée axiale.

Oceanologica Acta, 1990, volume spécial 10, Actes du Colloque Tour du Monde Jean Charcot, 2-3 mars 1989, 199-207.

ABSTRACT

Hydrothermal activity and axial structure of the East Pacific Rise and Mid Atlantic Ridge

The first systematic study of the variation of hydrothermal activity along the axis of the East Pacific Rise (EPR) over 100 km between 12°N and 13°10'N (Hydrofast cruise, R/V *Jean Charcot*, December 1986) demonstrated that hydrothermal activity along the strike is present everywhere but not randomly distributed. The intensity of hydrothermal activity clearly depends on structural discontinuities along the ridge axis. The maximum of hydrothermal activity is located between two small overlapping spreading centres at 12°37'N and 12°54'N.

The first results of the variation of hydrothermal activity along the Mid Atlantic Ridge (MAR) between the 15°20'N fracture zone and Kane fracture zone also demonstrate that hydrothermal activity is present everywhere along the axis of this part of the MAR and that it is not randomly distributed (Ridelente cruise, R/V *Jean Charcot*, January 1988). The maximum of hydrothermal activity is found close to ridge axis / fracture zone intersections (south Kane fracture zone, north and south 15°20'N fracture zone intersections). In addition, the maximum of hydrothermal activity is correlated with the occurrence of serpentinitized ultrabasic rocks on structures located within the axial domain of the rift valley. This observation suggests that sea water and fluids reach the crust/mantle interface; ultrabasic rocks are serpentinitized and reach the surface. This is particularly well documented at the north and south 15°20'N fracture zone intersections.

The systematic study of the variation of hydrothermal activity along the strike of the ridge axis reveals two important results: hydrothermal activity is present everywhere, but strongly depends on structural discontinuities (*i.e.* OSC on the EPR, fracture zone on the MAR); hydrothermal activity has so far been considered as a major process associated with the construction of the oceanic crust. We suggest that it also involves the layer 3, reaches the mantle - at least on the MAR - and participates the construction of new seafloor at the ridge axis through uplift of serpentinitized bodies, as "diapirs" controlled by the normal fault system.

Oceanologica Acta, 1990, volume spécial 10, Actes du colloque Tour du Monde Jean Charcot, 2-3 mars 1989, 199-207.

INTRODUCTION

En 1948, en Mer Rouge, le navire de recherche suédois Albatros relève la première anomalie thermique dans l'eau de mer associée à l'activité hydrothermale : une température de 22,57°C à 1 888 m de profondeur (Bruneau *et al.*, 1953). Après l'identification des saumures et des sédiments métallifères de la Mer Rouge, il faut attendre 1977 pour observer, sur la dorsale des Galapagos, anomalies thermiques (environ 20°C) et manifestations biologiques spectaculaires associées à l'hydrothermalisme sous-marin (Corliss *et al.*, 1979). Les premiers édifices de sulfures hydrothermaux ont été découverts en 1978, par 21°N, sur la dorsale Est-Pacifique (projet Rita), au cours d'une campagne submersible entrant dans le cadre général de l'étude de la structure axiale des dorsales médio-océaniques (Francheteau *et al.*, 1979). Enfin, dans la continuation du projet Rita, la première mission affichant un objectif «hydrothermalisme», fonction des résultats obtenus sur

la dorsale des Galapagos et sur la ride Est-Pacifique (EPR), est la campagne Alvin, en 1979, qui découvre les premières sources hydrothermales à haute température (Spiess *et al.*, 1980).

Depuis 1979, de nombreuses missions ont été organisées sur le thème de l'hydrothermalisme, soit dans le cadre d'études de site (notion de laboratoire naturel), soit dans des contextes géodynamiques différents, dorsales à différents taux d'expansion, bassins arrière-arc... Néanmoins, les informations concernant l'existence d'activité hydrothermale le long de l'axe d'une dorsale demeuraient jusqu'ici ponctuelles. On peut dire qu'aucun site connu à ce jour ne résulte d'une démarche quelque peu scientifique et cohérente. La raison en est simple : nous ne disposons pas de la méthodologie appropriée.

Le thème «répartition et intensité des systèmes hydrothermaux» était affiché dans le cadre du programme français dès 1981 (Bougault, 1982). Dès cette époque, un effort était consenti pour développer une

méthodologie d'étude de la variation d'activité hydrothermale le long de l'axe d'une dorsale : les palanquées dynamiques (Bougault *et al.*, sous presse a). Ce thème, activité hydrothermale et structure axiale des dorsales médio-océaniques, constitue également l'un des thèmes principaux du programme américain Ridge (Ridge Inter-Disciplinary Global Experiment).

Deux missions du N/O Jean Charcot ont obtenu les premiers résultats sur la variation d'activité hydrothermale le long de l'axe d'une dorsale : Hydrofast (décembre 1986) sur la dorsale Est-Pacifique (EPR), une centaine de kilomètres le long de l'axe (Bougault *et al.*, sous presse a), Ridelente (janvier 1988) sur la dorsale médio-atlantique (MAR) sur 5° de latitude (Bougault *et al.*, sous presse b).

LES TRACEURS UTILISÉS

Les premières missions et les premiers résultats concernant l'identification d'un panache hydrothermal - par opposition à de simples informations ponctuelles - sont attribuées à Baker *et al.* (1985), Baker et Massoth (1986), et Baker *et al.* (1987). L'identification du panache était effectuée à partir des anomalies thermiques et néphélométriques. Le système de mesures était tracté au-dessus du fond par le bateau, en imprimant simultanément un mouvement de «yo-yo».

Les premiers enregistrements thermiques le long de l'axe d'une dorsale ont été réalisés par Crane *et al.* (1988). Néanmoins, une véritable image de la variation d'activité hydrothermale doit reposer sur plusieurs traceurs, en raison de leurs propriétés différentes : traceurs physiques (température, néphélométrie), mais aussi traceurs chimiques (CH₄, Mn, He...etc.). En effet, la dissipation de chaleur, à partir du substratum, peut s'effectuer de différentes manières : il ne s'agit pas exclusivement de sources haute température, et les effets induits dans la masse d'eau peuvent être significativement différents. Les phénomènes de convection induits compliquent singulièrement le message thermique. Pour être efficace, un bon traceur nécessite un contraste très important entre eau de mer et fluides hydrothermaux ; pour la température, ce contraste demeure nettement inférieur à celui des traceurs chimiques CH₄, Mn et He, y compris pour les sources haute température. Un bon traceur doit avoir une propriété constante et bien définie (un «blanc») dans l'eau de mer : de ce point de vue, CH₄ et Mn présentent un avantage par rapport à la température et à l'hélium.

En contrepartie, si des traceurs comme Mn et CH₄ ont un «blanc» parfaitement défini dans l'eau de mer profonde, ces traceurs ne sont pas conservatifs dans l'eau de mer : précipitation sous forme d'oxy-hydroxydes pour Mn, activité bactérienne pour CH₄. L'hélium, longtemps considéré comme le traceur idéal, parce que chimiquement inactif et donc conservatif, ne peut

également traduire «quantitativement» et en toutes circonstances l'activité hydrothermale : on vient en effet récemment de démontrer que le rapport He / anomalie de température n'est pas constant (Lupton *et al.*, 1989).

L'ensemble des résultats obtenus à 13°N sur l'EPR reposent sur les anomalies de température, les anomalies de CH₄, Mn et He ; ces résultats conduisent aux observations et conclusions suivantes en ce qui concerne la validité des traceurs :

- Les anomalies thermiques sont extrêmement difficiles à utiliser (Bougault, 1982 ; Charlou *et al.*, soumis). Les raisons sont multiples : absence de «blanc» pour la température due au gradient naturel de température fonction de la profondeur, à l'effet topographique de la dorsale sur la structure des masses d'eau (dissymétrie des profils de température de part et d'autre de l'axe de la dorsale), à des cellules de convection dont la dimension est inférieure au mille (anomalies locales atteignant 0,02°C, les diagrammes T/S étant extrêmement différents à un mille près). De plus, phénomène intéressant mais non interprété d'une manière entièrement satisfaisante jusqu'ici, des lentilles d'eau uniquement caractérisées par des anomalies thermiques et situées à une altitude supérieure au panache caractérisé par des anomalies physiques et chimiques, ont été détectées. Ces lentilles, dont la dimension horizontale est de l'ordre du mille, ne sont probablement pas le résultat de l'activité hydrothermale sous-jacente.

- En revanche, à l'exception d'une palanquée verticale, les données de CH₄ et de Mn dans la zone de l'EPR à 13°N sont remarquablement cohérentes (Charlou *et al.*, soumis). Le rapport Mn/CH₄ est même rigoureusement constant pour trois palanquées réparties sur plus de 20 milles le long de l'axe. La durée de vie du panache est donc probablement faible par rapport aux temps de résidence de cet élément et de ce composé dans l'eau de mer : cette propriété fait de Mn et CH₄ de bons traceurs de l'hydrothermalisme. Les données d'He ont été en nombre insuffisant au cours d'Hydrofast et de Ridelente pour obtenir une image continue et interprétable le long de l'axe.

VARIATION D'ACTIVITÉ HYDROTHERMALE LE LONG DE L'AXE D'UNE DORSALE : EPR, MAR

L'image de l'activité hydrothermale le long de l'EPR, sur une centaine de kilomètres, est représentée figure 1 par les concentrations de CH₄ et de Mn dans la tranche d'eau située au droit de l'axe de la dorsale (Bougault *et al.*, sous presse a). Cet ensemble de données a été obtenu grâce à l'utilisation des «palanquées dynamiques», dont le principe est décrit par Bougault *et al.* (sous presse a)

Les principaux résultats qui peuvent en être déduits sont les suivants :

- L'activité hydrothermale est présente tout le long de

East Pacific Rise 13°N

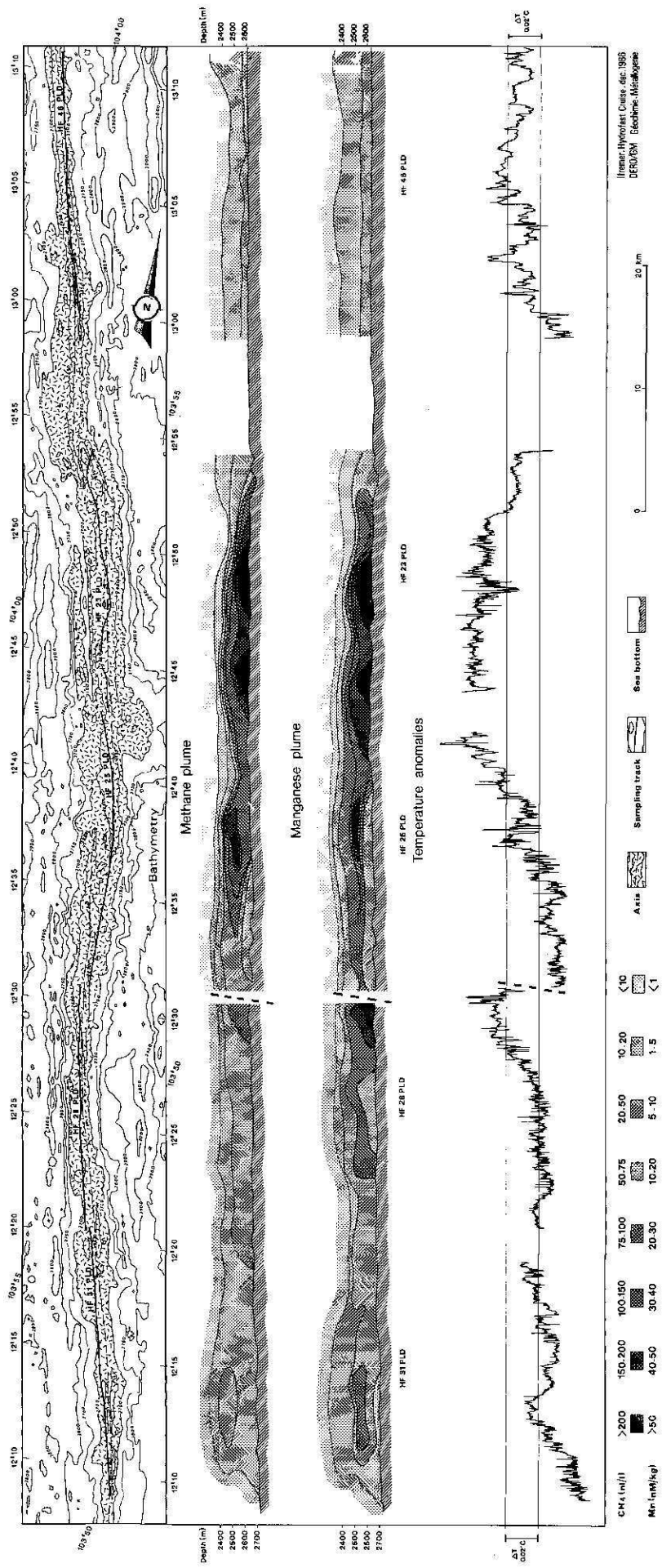


Figure 1
 Variation d'activité hydrothermale sur une centaine de kilomètres le long de l'EPR : panaches de CH₄ et de Mn, profil de température. Le segment le plus actif est délimité par les petits OSC à 12°37' et 12°54'N.
 Variation of hydrothermal activity along the axis of the EPR over 100 km : CH₄ and Mn plumes, temperature profile. The maximum of activity is located between the OSC at 12°37'N and 12°54'N.

l'axe de l'EPR, sur une centaine de kilomètres ; sur le segment de dorsale le moins actif (au nord de l'Overlapping Spreading Centre - OSC - de 12°54'), les concentrations de CH₄ et de Mn sont trois à quatre fois supérieures aux concentrations normales de l'eau de mer profonde.

- L'activité hydrothermale n'est pas distribuée d'une manière aléatoire le long de l'axe. Elle est fonction des discontinuités structurales de l'axe.
- L'activité hydrothermale est maximale entre les deux OSC de 12°37' et 12°54'N.
- Les discontinuités de direction de l'axe au sud de 12°37'N semblent montrer des discontinuités d'activité de deuxième importance.

En dépit de l'existence d'activité hydrothermale en Mer Rouge (dorsale à taux d'expansion très lent : 1 cm/an), certaines théories prévoient l'absence d'activité hydrothermale en Atlantique suivant le critère du taux d'expansion (Francheteau et Ballard, 1983). En fait, dès 1985, des indices d'activité hydrothermale (Klinkhammer et al., 1985 ; Charlou *et al.*, 1988) et des sources hydrothermales (Rona *et al.*, 1986 ; Leg 109 Scientific Party, 1986) étaient trouvés à des latitudes différentes (14°N, 23°N, 26°N). Néanmoins, l'échantillonnage des anomalies hydrothermales dans la masse d'eau par palanquées verticales classiques était jusque là complètement insuffisant pour dégager la moindre variation significative d'activité le long de l'axe de la dorsale.

La stratégie adoptée sur la dorsale médio-atlantique au cours de la campagne Ridelente diffère sensiblement de celle utilisée au cours d'Hydrofast sur l'EPR (Bougault *et al.*, sous presse a). Les résultats obtenus sur l'EPR grâce à l'utilisation des palanquées dynamiques nous ont montré qu'une zone très active, comme celle qui est située entre les OSC de 12°37' et 12°54'N (fig. 1), ne serait pas manquée en utilisant une palanquée verticale classique tous les 10 à 15 milles. Une telle démarche, si elle produit une image discontinue et moins précise que celle des palanquées dynamiques, permet néanmoins de couvrir l'axe de la dorsale sur une longueur beaucoup plus grande pour un temps de campagne donné.

La figure 2 présente l'image de la variation d'activité hydrothermale le long de la dorsale médio-atlantique entre 15 et 25°N, obtenue au cours de la campagne Ridelente. Sur la droite de la figure, la concentration en CH₄ correspond au maximum de l'anomalie de CH₄ suivant le profil obtenu à partir d'une palanquée verticale (concentration de CH₄ en fonction de la profondeur). Les principaux résultats qui peuvent être déduits à partir de cette figure 2 sur la MAR sont assez voisins de ceux qui ont été obtenus sur l'EPR :

- L'activité hydrothermale est présente tout le long de l'axe de la dorsale. Les concentrations en méthane sont partout au moins trois à quatre fois supérieures à la concentration normale de l'eau de mer. On distingue deux points (entre parenthèses fig. 2), correspondant à la

concentration normale de l'eau de mer. L'un, à 18°15'N, correspond à une palanquée hors axe (une vingtaine de milles) ; l'autre, à 23°40'N, correspond à une palanquée effectuée dans la zone de la fracture Kane.

- L'activité hydrothermale n'est pas distribuée d'une manière aléatoire le long de l'axe. Elle est plus intense au voisinage des intersections avec les zones de fracture (sud et nord de 15°20'N de la zone de fracture, sud de la zone de fracture Kane).

Ainsi, le résultat important obtenu au cours des campagnes Hydrofast et Ridelente est de montrer l'existence de l'activité hydrothermale d'une manière quasi continue le long de l'axe de l'EPR et de la MAR, et la dépendance entre l'intensité de l'activité hydrothermale et la structure de l'axe de la dorsale : les discontinuités représentées par les OSC sur l'EPR et par les zones de fracture sur la MAR jouent un rôle de premier plan vis-à-vis de la circulation d'eau de mer dans la croûte océanique.

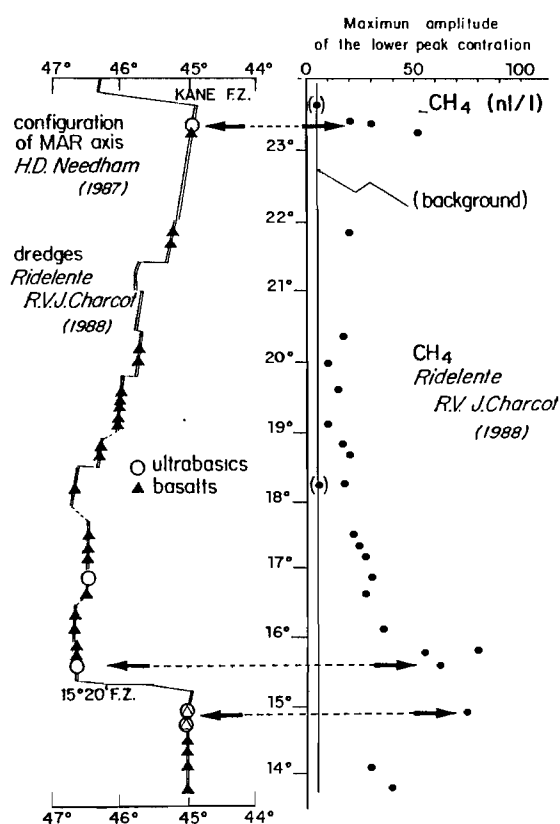


Figure 2

Variation d'activité hydrothermale le long de la MAR entre 14 et 23°N. Sur la gauche de la figure, schéma de l'axe de la dorsale. Les triangles représentent des sites où ont été échantillonnées des laves basaltiques. Les cercles représentent les sites où des roches ultrabasiques sont présentes. Sur la droite de la figure : amplitude maximum des profils verticaux de CH₄ dans la vallée axiale. Les deux points entre parenthèses correspondent à des profils hors axe.

Variation of hydrothermal activity along the MAR between 14°N and 23°N. The schematic of the MAR axis is represented on the left of the figure. Triangles represent sites where basaltic rocks were sampled, whereas circles correspond to locations where ultrabasic rocks were collected. On the right of the figure : amplitude maximum des profils verticaux de CH₄ of vertical profiles located in the rift valley. The two dots in brackets are not in the rift valley and correspond to the normal CH₄ background (5 nl/l).

ACTIVITÉ HYDROTHERMALE ET CONSTRUCTION DE LA CROÛTE OCÉANIQUE

Le long de l'axe de la dorsale médio-atlantique (fig. 2), les triangles représentent les sites où des basaltes ont été dragués dans le cadre du programme «structure chimique de la croûte et du manteau». Les cercles représentent les sites où des roches ultrabasiques serpentinisées ont été échantillonnées. Au sud de la zone de fracture Kane (Leg 109 Scientific Party, 1986; Mevel *et al.*, 1989) et immédiatement au sud de la zone de fracture 15°20' (Rona *et al.*, 1987), ces roches ultrabasiques sont présentes sur les murs latéraux de la vallée axiale. Sur les trois autres sites, 14°43'N, 15°36'N et 16°52'N, les roches ultrabasiques ont été draguées sur des structures du domaine interne de la vallée axiale (fig. 3).

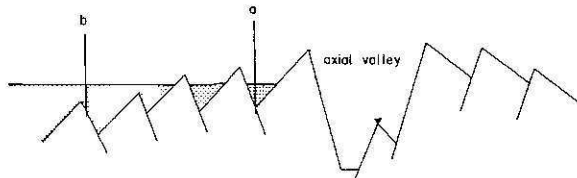


Figure 3

Schéma d'une coupe perpendiculaire à l'axe de la MAR, représentant les contextes où des roches ultrabasiques ont été échantillonnées. En (a), forage au plus près de l'axe de la dorsale (ex. : site 395 DSDP) ; en (b), site à 30 Ma (ex. : site 556 DSDP). Sur le moment d'une structure culminant à 1 000 m au-dessus du plancher interne, le triangle indique le lieu de dragage d'ultrabasiques au cours de Ridelente.

Schematic cross section of the MAR showing the context where ultrabasic rocks have been recovered so far. In (a), drilling the closest to the axis, where a sediment pound permitted to maintain the drill string (ex. : site 395 DSDP); in (b), 30Ma old site (ex.: site 556 DSDP): within the rift valley, on a structure located in the inner floor, indicated by the full triangle (dredge during Ridelente).

Cette observation est en elle-même très importante : la présence de telles roches affleurant sur des structures internes de la vallée axiale était pratiquement inconnue jusqu'ici. Leur présence avait été signalée par Bonatti *et al.* (1975) sur le sommet d'un mur de la vallée. La présence de ces roches sur des structures axiales internes est d'autant plus intéressante qu'elle coïncide avec les maxima d'activité hydrothermale à 14°53'N et 15°36'N. La figure 4 représente le schéma de l'intersection sud de la zone de fracture 15°20'N. Le haut structural indiqué par une flèche est situé dans l'axe de la vallée axiale, et culmine à 1500 m au-dessus du plancher interne. De tels hauts structuraux aux intersections avec les zones de fracture sont bien connus, mais ils sont en général localisés dans le coin situé à l'intersection du mur interne de la vallée axiale avec le mur de la zone de fracture. Ce haut structural est hydrothermalement actif : des prélèvements d'eau au voisinage du fond révèlent des teneurs en CH₄ atteignant 400 nl/l, démontrant ainsi l'activité hydrothermale de ce «diapir» (non publié).

Ce résultat confirme le travail théorique de Francis (1981) à propos de serpentinitisation au voisinage des failles transformantes et des failles normales. Les résultats observés diffèrent tout de même quelque peu des prédictions de son modèle, mais confirment le rôle important de la serpentinitisation des roches profondes vis-à-vis de la construction axiale de la dorsale, notamment au voisinage des intersections avec les zones de fracture.

On ne connaissait jusqu'ici l'existence de roches ultrabasiques dans l'Atlantique que sur les murs des zones de fracture (Arcyana, 1975 ; Bonatti, 1976 ; Bonatti et Honorez, 1976 ; Auzende *et al.*, 1989) sur les murs internes de la vallée axiale de la dorsale (Bonatti et Honorez, 1975 ; Leg 109 Scientific Party, 1986 ; Mevel *et al.*, 1989 ; Rona *et al.*, 1987 ; Zonenshain *et al.*, 1989) et sur certains sites hors axe forés par le Glomar Challenger dans le cadre du programme DSDP (Aumento et Melson, 1977 ; Melson et Rabinovitz, 1978 ; Bougault et Cande, 1985). Les contextes structuraux sur lesquels ces roches ultrabasiques affleurent sont résumés par le schéma présenté figure 3.

L'objectif en (a), (Leg 45 de DSDP ; Melson et Rabinovitz, 1978) était de forer au plus près de l'axe de la dorsale (ex. : site 395). Il fallait donc rechercher une poche de sédiments d'une centaine de mètres d'épaisseur, capable de maintenir le train de tige de forage. Des morceaux de roches ultrabasiques ont été trouvés dans le sédiment ainsi que sur une dizaine de mètres d'épaisseur, pratiquement à l'interface basalte/ sédiment. Ces roches ultrabasiques proviennent donc d'éboulements à partir de la faille normale voisine.

Au contraire en (b), à un âge de la croûte d'environ 30 millions d'années, l'épaisseur minimale de sédiment était recherchée pour atteindre le substratum le plus rapidement possible (ex. : sites 556, 558, Leg 82 de DSDP ; Bougault et Cande, 1985). Des roches ultrabasiques ont été trouvées sous quelques dizaines de mètres de basaltes. Il s'agit de roches ultrabasiques très serpentinisées, voire milonitisées. La présence de telles roches est donc un phénomène commun hors axe, non nécessairement lié à la présence de zones de fracture et clairement associé au système de failles normales. Suivant le schéma d'une couche 2 (basaltique) plus ou moins uniforme (2 a, 2 b), d'une épaisseur d'environ deux kilomètres, la présence de ces roches associées aux failles normales ne reçut pas d'interprétation satisfaisante à l'époque.

La campagne Ridelente apporte probablement une partie de la réponse : ces roches ultrabasiques serpentinisées existent sur des structures «âge zéro» de la vallée axiale hydrothermalement actives (Bougault *et al.*, sous presse b, fig. 3). A l'axe de la dorsale médio-atlantique, l'eau de mer pénètre donc la croûte océanique, et atteint les roches ultrabasiques du manteau. Là, des échanges chimiques entre roches et fluides ont lieu : le processus

de serpentinisation-hydratation prend place, pouvant augmenter le volume de la roche de 45 %. Si la couche 3 est affectée sur deux kilomètres, le plancher océanique s'élève de 900 m, sans qu'il soit besoin d'un réajustement isostatique important (Francis, 1981). Le manteau serpentinisé affleure, sous forme d'un «diapir» étroitement contrôlé par le système de failles normales.

L'hydrothermalisme ne serait donc pas seulement un processus important limité aux échanges de matière et d'énergie entre l'océan et la croûte océanique, mais également un processus majeur contribuant à la construction, à la structure et à la morphologie de l'axe de la dorsale.

DISCUSSION

Nul ne saurait nier l'existence du phénomène de serpentinisation. Il est curieux de constater le peu de rôle attribué jusqu'ici à ce processus dans la mise en place de la croûte océanique. De là à lui conférer un rôle fondamental pour expliquer toute la structure axiale de la dorsale, il y a un pas à franchir, qui nécessite une évaluation quantitative du phénomène, mais aussi des données complémentaires.

Certaines observations confortent qualitativement l'importance des relations activité hydrothermale / serpentinisation / structure de la dorsale. L'importance de

l'activité hydrothermale au voisinage des intersections avec les zones de fracture doit laisser une signature particulière, par comparaison à un domaine axial «standard» non influencé par une zone de fracture. Les hauts structuraux présents aux intersections zones de fracture / axe de la dorsale, représentent probablement une telle signature. Par définition, le mur d'une zone de fracture représente l'enregistrement en fonction du temps des résultats des processus qui ont pris place à l'intersection zone de fracture/axe de la dorsale. La coupe schématique au travers d'une zone de fracture présentée figure 5, montre deux bombements bordant la zone de fracture, qui peuvent être considérés comme les témoins des hauts structuraux produits aux intersections axe/zone de fracture, résultats d'une serpentinisation plus intense à cet endroit que dans un contexte «standard» axial. Ainsi que nous l'avons vu, ces hauts structuraux sont en quelque sorte des «diapirs» distants d'environ 4 milles, le long de la zone de fracture (fig. 4), traduisant une période du phénomène de l'ordre de 700 000 ans. Une seule coupe, voire deux ou trois coupes localisées au hasard le long d'un mur d'une zone de fracture, ne sauraient donc donner l'image de la coupe de la croûte océanique «standard» : d'une part le mur d'une zone de fracture représente l'enregistrement des processus particuliers aux intersections axe/zone de fracture ; d'autre part ces processus à ces intersections se répètent suivant une période.

En conséquence une véritable image représentative du mur d'une zone de fracture ne peut être correctement faite qu'en examinant une période du phénomène.

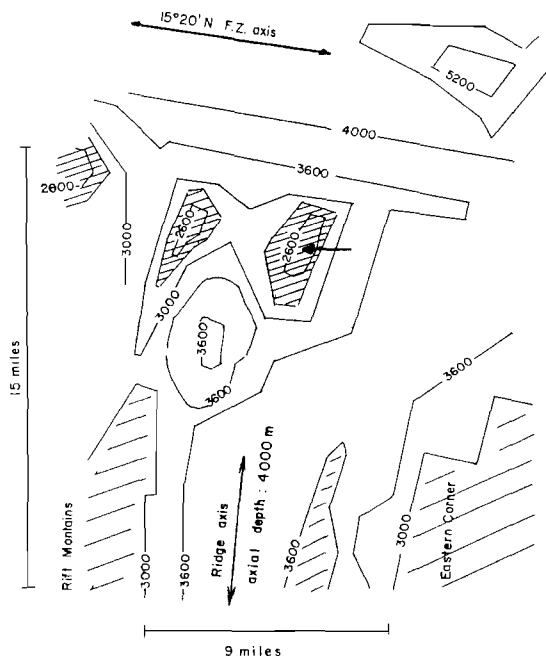


Figure 4

Schéma de l'intersection sud de la zone de fracture 15°20'N avec l'axe de la MAR. La flèche indique l'emplacement du «diapir axial» situé immédiatement en bordure de la zone de fracture. La carte de cette intersection est publiée dans le recueil de cartes du colloque Tour du Monde du Jean Charcot.

Schematic of the southern intersection of the ridge axis with the 15°20'N F.Z. The arrow indicates the "axial diapir" located on the edge of the fracture zone. The map of this intersection is published in volume 2 of the Jean Charcot colloquium (Oceanologica Acta editor).

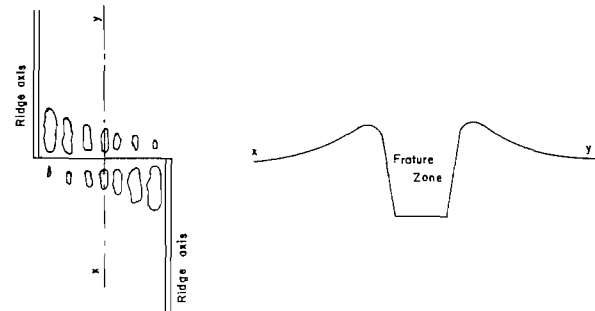


Figure 5

Coupe schématique perpendiculaire à une zone de fracture. Le «bombement» moyen bordant la zone de fracture est interprété en termes de mémoire des hauts topographiques formés aux intersections axe / zone de fracture. Ces hauts topographiques et ces bombements moyens seraient la conséquence d'une circulation hydrothermale, donc d'une serpentinisation plus importante aux intersections axe / zone de fracture.

Schematic cross section perpendicular to a fracture zone : the average high present on the edge of the fracture zone can be interpreted as the record of the topographic highs that are formed at the intersections ridge axis / fracture zone. These topographic highs and recorded average highs would reflect a more intense hydrothermal circulation and serpentinization at the ridge axis / fracture zone intersections.

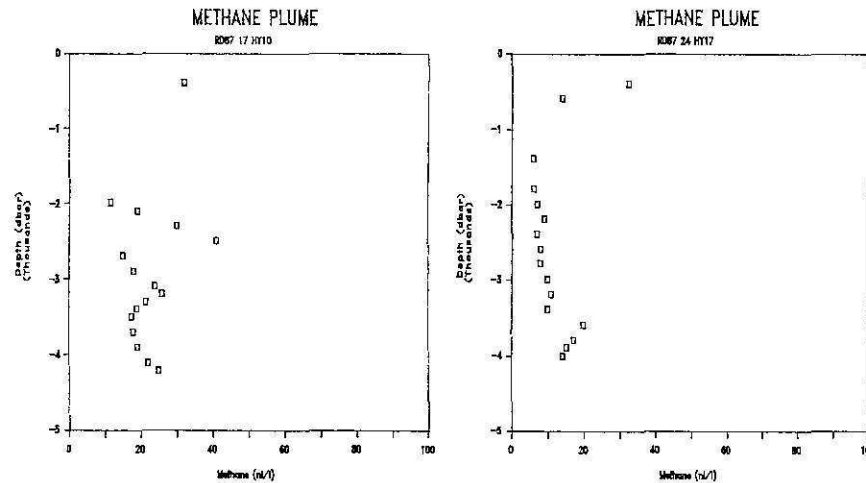


Figure 6

Exemples de profils verticaux de CH₄ dans la vallée axiale de la MAR. À droite, exemple classique, avec maximum situé à une profondeur supérieure à 3000 m, reflétant une activité hydrothermale du plancher interne. Noter un léger maximum vers 2300 m, décelable sur toutes les palanquées effectuées. À gauche, un exemple de maximum très important entre 2000 et 2300 m. Ce maximum vers 2300 m, correspondant au niveau des montagnes du rift, est attribué à une activité hydrothermale persistante sur les montagnes du rift.

Examples of CH₄ vertical profiles in the MAR rift valley. A typical example is shown on the right with a maximum deeper than 3000 m, that reflects hydrothermal activity on the inner floor. Note a slight maximum around 2300 m: such a maximum is detectable on all profiles made in the rift valley. A very important CH₄ maximum between 2000 and 2300 m is shown on the left. We believe that these maxima reflect hydrothermal activity on the wall of the valley and on the top of the rift mountains.

L'existence de roches ultrabasiques serpentinisées dans un contexte «failles normales» (forages DSDP) conforte également le rôle de la serpentinisation et de l'activité hydrothermale vis-à-vis de la construction de la croûte océanique. La circulation de fluides le long de failles normales persiste probablement bien au-delà de la vallée axiale (Wolery et Sleep, 1976 ; Williams *et al.*, 1979 ; Honorez *et al.*, 1981) au niveau des montagnes du rift adjacentes à la vallée axiale. Cette activité peut laisser une signature dans l'eau de mer, à une profondeur correspondant au niveau des montagnes du rift. L'anomalie de méthane à cette profondeur, en général faible, pourrait correspondre à ce processus hydrothermal associé aux failles normales.

Cette anomalie à cette profondeur peut néanmoins être importante, ainsi que le montre la figure 6. La circulation d'eau de mer et la serpentinisation pourraient donc intervenir d'une manière très significative pour expliquer la morphologie d'une dorsale lente à vallée axiale bien définie.

En revanche, la contribution de l'activité hydrothermale ne permet pas d'expliquer les différentes morphologies classiques de l'axe des dorsales. Pourquoi une forme en dôme avec graben axial peu développé sur la dorsale Est-Pacifique? Pourquoi une dorsale médio-Atlantique avec une vallée axiale profonde de 2000 m? Cinétique d'hydratation vis-à-vis du taux d'expansion? Au sud de l'Islande, la dorsale de Reykjanes n'a pas de vallée axiale marquée, alors que son taux d'expansion est plutôt plus faible que le taux d'expansion moyen de la dorsale médio-atlantique. On ne connaît pas - pour l'instant - de

roches ultrabasiques à l'axe de la dorsale Est-Pacifique. Le résultat de Ridelente montre que la circulation d'eau de mer atteint le manteau, le phénomène de serpentinisation et le «diapirisme» associé. C'est un processus important qui contribue à la construction de la croûte océanique, au moins pour ce qui concerne les dorsales lentes. A n'en pas douter, ces nouvelles informations constituent des hypothèses à tester en utilisant les moyens géophysiques appropriés.

CONCLUSION

Les campagnes Hydrofast et Ridelente ont permis de démontrer la dépendance qui existe entre activité hydrothermale et structure axiale de la dorsale.

Les discontinuités type «overlapping spreading centers» et intersections axe dorsale/zone de fracture jouent un rôle fondamental vis-à-vis de la circulation des fluides dans la croûte océanique.

Dans l'Atlantique, les sites où l'activité hydrothermale est maximale sont corrélés à la présence de roches ultrabasiques serpentinisées dans le domaine interne de la vallée axiale et à l'apparition de structure de type «diapir».

Ainsi, par le phénomène de serpentinisation, l'activité hydrothermale joue-t-elle un rôle très significatif dans la construction et vis-à-vis de la structure de la croûte océanique.

REFERENCES

- Arcyana (1975). Transform fault and rift valley from bathyscaph and diving saucer. *Science*, **190**, 108-116.
- Aumento F. and W.G. Melson (1977). Site 334. *Initial Repts Deep Sea Drilling Proj.*, **37**.
- Auzende J.-M., D. Bideau, E. Bonatti, M. Cannat, J. Honorez, Y. Lagabrielle, J. Malavieille, V. Mamaloukas-Frangoulis et C. Mevel (1989). *Nature*, **337**, 6009, 726-729.
- Baker E.T. and G.J. Massoth (1986). Hydrothermal plume measurements: a regional perspective. *Science*, **234**, 980-982.
- Baker E.T., J.W. Lavelle and G.J. Massoth (1985). Hydrothermal particle plumes over the Southern Juan de Fuca Ridge. *Nature*, **316**, 342-344.
- Baker E.T., G.J. Massoth and R.A. Feely (1987). Cataclysmic hydrothermal venting on the Juan de Fuca Ridge. *Nature*, **329**, 149-151.
- Bonatti E. (1976). Serpentinite protrusions in the ocean crust. *Earth planet. Sci. Letts*, **32**, 107-113.
- Bonatti E. and J. Honorez (1976). Sections of the Earth's Crust in the Equatorial Atlantic. *J. geophys. Res.*, **4104-4116**.
- Bonatti E., J. Honorez, P. Kirst and F. Radicati (1975). Metagabros from the Mid-Atlantic Ridge at 06°N: contact hydrothermal dynamic metamorphism beneath the axial valley. *J. Geol.*, **83**, 61-78.
- Bougault H. (1982). Circulation hydrothermale océanique et métallogénèse. *Annls Mines*, novembre-décembre 1982, 1-32.
- Bougault H. and S. Cande (1985). Sites 556 and 558. *Initial Repts Deep Sea Drilling Proj.*, **82**.
- Bougault H., P. Appriou, A. Birolleau, J.-L. Charlou, K. Crane, J. Étoubleau, Y. Fouquet, P. Gente, F. Harmegnies, J.-Y. Landuré, A. Le Noach, H. Pellé, B. Sichel, M. Voisset et P. Watremez (sous presse a). Campagne Hydrofast. *Oceanologica Acta*, Colloque Tour du Monde du Jean Charcot, vol. 1.
- Bougault H., P. Appriou, P. Bienvenu, P. Cambon, J.-L. Charlou, B. Collette, J.-P. Donval, L. Dosso, G. Floch, Y. Fouquet, M. Morvan, H. Pellé, J. Poncin, D. Thieblemont, A. Vangriesheim et H.D. Needham (sous presse b). Ridelente. *Oceanologica Acta*, Colloque Tour du Monde du Jean Charcot, vol. 1.
- Bruneau L., N. G. Jerlov and F. Koezy (1953). Rep. Swedish Deep-Sea Expedition, XIX-XXX.
- Charlou J.-L., L. Dmitriev, H. Bougault and H. D. Needham (1988). Hydrothermal CH₄ between 12° and 15°N over the MAR. *Deep-Sea Res.*, **35**, 121-131.
- Charlou J.-L., H. Bougault, P. Appriou, P. Jean-Baptiste, J. Étoubleau and A. Birolleau (soumis). Water column anomalies associated with hydrothermal activity between 11°40'N and 13°N on the East Pacific Rise.
- J.B. Corliss, J. Dymond, L.I. Gordon, J.M. Edmond, R.P. von Herzen, R. D. Ballard, K. Green, D. Williams, A. Bainbridge, K. Crane and T.H. van Andel (1979). Submarine thermal springs on the Galapagos Rift. *Science*, **203**, 1073-1083.
- Crane K., F. Aikman III, J.-P. Foucher (1988). The distribution of geothermal fields along the East Pacific Rise from 13°10'N to 8°20'N: implications for deep-seated origins. *Mar. geophys. Res.*, **9**, 211-236.
- Francheteau J. and R.D. Ballard (1983). The East Pacific Rise near 21°N, 13°N and 20°S: inferences for variability of axial processes of the Mid-Ocean Ridge. *Earth planet. Sci. Letts*, **64**, 93-116.
- Francheteau J., H.D. Needham, P. Choukroune, T. Juteau, M. Séguret, R. D. Ballard, P.J. Fox, W. Normark, A. Carranza, D. Cordoba, J. Guerrero, C. Rangin, H. Bougault, P. Cambon and R. Hékinian (1979). Massive deep-sea sulfide ore deposits discovered on the East Pacific Rise. *Nature*, **277**, 523-528.
- Francis T.J. (1981). Serpentinization faults and their role in the tectonics of slow spreading ridges. *J. geophys. Res.*, **86**, B12, 11616-11622.
- Honorez J., R. P. von Herzen, T. J. Barret, K. Becker, M. L. Bender, P. E. Borella, H. W. Hubberten, S. E. Jones, S. Karato, C. Laverne, S. Levi, A. A. Migdisov, S. A. Moorbly and E. L. Schrader (1981). Hydrothermal mounds and young ocean crust of the Galapagos: preliminary Deep-Sea Drilling Project results, Leg 70. *Geol. Soc. Am. Bull.*, Part 1, **92**, 457-472.
- Klinkhammer G., P. Rona, M. Greaves and H. Elderfield (1985). Hydrothermal manganese plume in the MAR rift valley. *Nature*, **314**, 727-731.
- Leg 109 Scientific Party (1986). Drilling the Snake Pit hydrothermal sulfide deposit on the Mid-Atlantic Ridge, latitude 23°22'N. *Geology*, **14**, 1004-1007.
- Leg 109 Scientific Party (1986). Drilling succeeds on bare rock. *Geotime*, **31**, 5, 10-12.
- Lupton J.E., E.T. Baker and G.J. Massoth (1989). Variable 3He/Heat ratios in submarine hydrothermal systems: evidence from two plumes over Juan de Fuca Ridge. *Nature*, **337**, 161-164.
- Melson W.G. and P.D. Rabinowitz (1978). Site 395. *Initial Repts Deep Sea Drilling Proj.*, **45**.
- Mevel C., J.-M. Auzende, M. Cannat, J.-P. Donval, J. Dubois, Y. Fouquet, P. Gente, D. Grimaud, J. A. Karson, M. Segonzac et M. Stievenard (1989). La ride du Snake Pit (dorsale médio-atlantique, 23°22'N) : résultats préliminaires de la campagne Hydrosnake, *C.r. Acad. Sci.*, II, **308**, 545-52.
- Rise Project Group: F.N. Spiess, K.C. McDonald, T. Atwater, R. Ballard, A. Carranza, D. Cordoba, C. Cox, V. M. Diaz Garcia, J. Francheteau, J. Guerrero, J. Hawkins, R. Haymon, R. Hessler, T. Juteau, M. Kastner, R. Larson, B. Luyendyk, J.D. McDougall, S. Miller, W. Normark, J. Orcutt et C. Rangin (1980). East Pacific Rise: hot springs and geophysical experiments. *Science*, **207**, 1421-1444.
- Rona P.A., G. Klinkhammer, T.A. Nelsen, J.H. Treefry and H. Elderfield (1986). Black smokers, massive sulfides and vent biota on the Mid-Atlantic Ridge. *Nature*, **321**, 33-37.
- Rona P.A., L. Widenfalk and K. Bostrom (1987). Serpentinized ultramafics and hydrothermal activity at the Mid-Atlantic Ridge crest near 15°N. *J. geophys. Res.*, **92**, 1417-1427.
- Williams D.L., K. E. Green, T.H. van Andel, R.P. von Herzen, J.R. Dymond and K. Crane (1979). The hydrothermal mounds of the Galapagos Rift: observation with the DSRV Alvin and detail heat flow studies. *J. geophys. Res.*, **84**, 7467-7484.
- Wolery T.J. and N.H. Sleep (1976). Hydrothermal circulation and geochemical flux at mid-ocean ridges. *J. Geol.*, **84**, 249-275.
- Zonenshain L.P., M.I. Kurmin, A.P. Lisitsin, Y.A. Bogdanov and B.V. Baranov (1989). Tectonics of the Mid-Atlantic Rift valley between the TAG and MARK areas (26-24°N). *Tectonophysics*, **159**, 1-23.