

CAMPAGNE HYDROFAST :
ETUDES QUANTITATIVES DE L'ACTIVITE HYDROTHERMALE
SUR LA RIDE-EST PACIFIQUE A 13° NORD

H. Bougault*, P. Appriou#, A. Birolleau*, J.L. Charlou*, K. Crane°,
J. Etoubleau*, Y. Fouquet*, P. Gente#, F. Harmegnies*, J.Y. Landuré*,
A. Le Noac'h*, H. Pellé*, B. Sichler*, M. Voisset*, P. Watremez\$,
N. Vaslet* et P. Jean Baptiste£

* Ifremer, Centre de Brest, B.P. 70, 29263 Plouzané cédex

Université de Bretagne Occidentale, Avenue Le Gorgeu, 29283 Brest cédex

° Lamont-Doherty Geological Observatory, Palisades, N.Y. 10964, USA

\$ BRGM, B.P. 70, 29263 Plouzané cédex

£ Lab. de Géochimie Isotopique, CEA/IRDI/DESICP, DPC, 91191 Gif sur Yvette

Une expression de l'hydrothermalisme océanique a été découverte en 1977 sur la dorsale des Galapagos. Il s'agissait de sources de basse température (< 20°C) accompagnées de manifestations biologiques spectaculaires (1). En 1978, à la latitude de 21°N, sur la dorsale Est Pacifique, il s'agissait de "tumulus" de sulfures hydrothermaux, plus ou moins oxydés (2). Les sources hydrothermales "haute température" ont été découvertes l'année suivante, en 1979, dans la même zone à la latitude de 21°N sur la Ride Est Pacifique (3). A la suite de ces découvertes spectaculaires, de nombreuses campagnes ont été organisées autour de ce thème "hydrothermalisme", notamment sur la dorsale rapide du Pacifique Est. Les campagnes françaises sont SEARISE (J. Charcot, 1980) (3), mission à très large maille d'observation (depuis 13°N jusqu'à l'île de Pâques) ; CLIPPERTON (J. Charcot, 1981) (5), mission destinée à examiner un segment d'une vingtaine de milles à 13°N par des moyens optiques (Raie) ; CYATHERM (Cyana, 1982) (6), mission d'observation et d'échantillonnage par submersible sur le segment de 13°N ; GEOCYARISE (Cyana, 1984) (7), mission d'observation à l'aide du submersible Cyana dans l'hémisphère sud (7 plongées entre 21°30'S et 17°30'S) et d'observation et d'échantillonnage

sur le segment de 13°N (8).

L'ensemble de ces travaux a permis de décrire l'activité hydrothermale le long de la dorsale du Pacifique Est, pas très large dans l'hémisphère sud, et d'une manière plus focalisée sur le segment de 13°N (notion de laboratoire naturel). Il n'en demeure pas moins que ces résultats restent descriptifs et qualitatifs vis-à-vis de la question très importante suivante : "quelle est la loi de répartition de l'activité hydrothermale le long de l'axe de la dorsale du Pacifique Est ?". C'est le sujet de la campagne HYDROFAST.

Choix du segment à étudier :

Quelle que soit la méthode d'investigation utilisée, celle-ci impliquera le choix d'un segment de l'axe de la dorsale. Ce choix représente un compromis entre structure axiale, méthode de mesure de l'activité hydrothermale et durée de la mission.

La figure 1 représente la variation de la profondeur axiale de la dorsale Est Pacifique entre 8 et 14°N (9). Elle met clairement en évidence la segmentation de la dorsale à l'échelle du degré, délimitée par les zones de fracture et les "overlapping spreading centers" (OSC) importants : Siqueiros F.Z.,

9°03'N OSC, Clipperton F.Z., 11°45'N OSC, 14°08'N OSC. Le choix du segment à étudier doit tenir compte de la segmentation de l'axe par ces discontinuités majeures. Il est apparu difficile de couvrir complètement l'un de ces segments, de l'une à l'autre de ces discontinuités ("bas topographiques") en passant par le "haut topographique" médian. La logistique de la mission permettait néanmoins de couvrir environ 60 milles ; le "segment représentatif" étudié au cours de la mission Hydrofast s'est donc naturellement défini comme étant le segment couvrant la dorsale depuis un "bas topographique", zone de discontinuité majeure, au haut topographique médian.

La méthode de mesure de l'activité hydrothermale décrite plus loin (palanquées dynamiques) a été utilisée pour la première fois : elle avait donc besoin d'être "testée" sur une zone déjà documentée. La zone d'étude de détail par submersible (Cyatherm, Géocyarise) est localisée entre les deux petits OSC, situés à 12°37'N et 12°54'N. Le choix du segment étudié au cours d'Hydrofast s'est donc naturellement porté sur le segment délimité par l'OSC majeur de 11°45'N et le "haut topographique" situé immédiatement au Nord du petit OSC de 12°54'N. Une carte simplifiée de cette zone est présentée Fig. 2.

Méthode de "mesure" de l'activité hydrothermale : les palanquées dynamiques

Si le submersible est un outil de choix pour l'étude d'un site, il devient complètement inefficace pour produire une information permettant de comparer l'activité hydrothermale de tel segment par rapport à tel autre segment. Cette inefficacité tient à deux raisons principales :

- d'une part l'observation et les mesures, aussi bien faites soient-elles, sur un ou plusieurs sites hydrothermaux, ne peuvent rendre

compte de l'activité le long d'un segment, la longueur de celui-ci fut-elle limitée à un ou deux milles ;

- d'autre part, il est impossible, compte tenu tout simplement du champ d'observation du submersible, de recenser tous les sites hydrothermaux. La comparaison de l'activité d'un segment par rapport à celle d'un autre repose donc nécessairement sur une autre approche.

La méthode choisie consiste à "quantifier" les anomalies créées dans l'eau de mer au dessus des champs hydrothermaux : température, concentrations de CH₄, Mn ou He.

Pour une raison analogue à celle qui conduit à l'impossibilité d'utiliser le submersible, les mesures ponctuelles de ces anomalies sont également interdites. Ponctuellement, le signal mesuré est trop dépendant de la distance à une cheminée hydrothermale ou à un site hydrothermal. L'illustration en est donnée Fig. 3 et 4, où sont représentés des profils verticaux de concentrations en CH₄, Mn, He et les diagrammes température potentielle - salinité (diagrammes T/S). Les palanquées HF 06 à HF 21 sont situées sur ou à proximité immédiate de l'axe du segment de 13°N. La distance qui sépare certaines d'entre elles est de l'ordre du mille. La variabilité observée exclut totalement une possibilité d'étude de la variation d'activité le long de l'axe. Ainsi que la complexité des diagrammes T/S le montrent (fig. 4), cette variabilité n'est pas seulement une question de distance par rapport aux sources d'émission, c'est aussi une question de dynamique du panache et de cellules de convection dont les dimensions sont probablement inférieures au mille.

La méthode de "mesure" de l'activité d'un segment donné implique donc nécessairement une notion de mesure moyenne suivant

une certaine distance le long de l'axe. A l'évidence, une telle information peut être obtenue à partir de paramètres qui peuvent être mesurés en continu, température et néphélométrie (densité de particules en suspension). Une première approche dans ce sens pour décrire un panache hydrothermal a été effectuée par Bäcker et al. (10, 11, 12) en utilisant un système remorqué comprenant une bathysonde et un néphélomètre. Le système était tracté à environ deux noeuds en imprimant un mouvement vertical de yoyo de manière à obtenir, par interpolation des mesures, l'image d'une coupe verticale. Par contre, pour les traceurs chimiques qui nécessitent un échantillonnage, la méthode de prélèvement doit être conçue pour fournir un prélèvement moyen. Ce type d'échantillonnage est effectué grâce au développement d'un outil nouveau : "palanquée dynamique". La palanquée dynamique est elle-même basée sur une nouvelle bouteille de prélèvement, la "bouteille proportionnelle".

La bouteille proportionnelle est tout simplement une seringue constituée d'un cylindre et d'un piston (fig. 5). En tête du système se trouve une hélice dont le mouvement de rotation est engendré par le mouvement relatif de l'outil tracté par rapport à l'eau de mer. Ce mouvement entraîne une pompe péristaltique (pompe volumétrique) qui remplit la seringue. Ce principe simple permet le remplissage de la "bouteille proportionnelle" proportionnellement à la distance parcourue et indépendamment des variations de vitesse de traction de la palanquée par le bateau. Le réglage de l'incidence des pales de l'hélice permet de remplir la bouteille le long d'une distance choisie. Au cours d'Hydrofast, cette distance était de un mille.

La "palanquée dynamique" utilisée pendant Hydrofast était constituée de quatre systèmes fixés sur un câble tiré par le bateau et répartis de manière à échantil-

lonner les 250 m au dessus du fond. Chaque système est constitué de 10 bouteilles proportionnelles. Ainsi que le schéma de la figure 5 l'indique, lorsqu'une bouteille est remplie, un automatisme permet de commencer le remplissage de la suivante. La palanquée dynamique ainsi constituée permet donc d'obtenir des échantillons moyens pour chaque mille parcouru dans les 250 m au dessus de l'axe de la dorsale suivant 4 profils parallèles. Un conteneur électronique permet l'enregistrement des temps de passage d'une bouteille à une autre ainsi que l'enregistrement de la température à partir de thermistances placées sur le châssis.

La technique "palanquée dynamique" permet ainsi d'obtenir l'image de la répartition des anomalies chimiques suivant une coupe verticale, suivant un profil donné.

La qualification des échantillons et les mesures de CH_4 et de Mn étaient effectuées dans la dizaine d'heures qui suivaient la fin de l'opération. La qualification de l'échantillon est nécessaire pour identifier tout mauvais prélèvement (mesures de SiO_2 , O_2 , salinité,...). La mesure des concentrations de Mn (P. Appriou) était effectuée suivant la méthode décrite par Klinkhammer 13) ; la mesure de CH_4 utilisait la méthode déjà utilisée par J.L. Charlou (14). Ces mesures étaient effectuées dans le conteneur de chimie spécialement aménagé à cet effet. Au cours de la mission Hydrofast, 10 palanquées dynamiques ont été effectuées (soit 400 échantillons d'eau de mer analysés).

Autres opérations

- Palanquées bathysonde-rosette : une dizaine de profils classiques verticaux bathysonde-rosette ont été effectués, incluant un profil de référence. Ces profils et diagrammes T/S (fig. 3 et 4) qui en sont déduits témoignent de la complexité de la structure de la

couche d'eau au droit d'un segment hydrothermalement actif (15) (J.L. Charlou et al., en prép.). Ces profils ont permis d'établir la position de chaque système des palanquées dynamiques le long du câble : ils ont été placés de façon à échantillonner les 250 m au dessus du fond, zone dans laquelle les anomalies chimiques sont présentes.

- Sonar latéral SAR. La zone de travail Hydrofast a été choisie en fonction de la segmentation de l'axe de la dorsale à échelle de l'ordre du degré (depuis un "bas topographique" à 11°45'N jusqu'au "haut topographique" de 13°N). A l'échelle du mille, l'activité hydrothermale peut être fonction du système de fissuration, à l'intérieur du graben axial (300 à 400 m). Les plongées submersibles ne fournissent que des éléments d'information ponctuels, l'interpolation présentant un haut degré d'incertitude. Seul actuellement le SAR permet d'obtenir une image continue du système de fissuration axial, avec une définition théorique de l'ordre du mètre. Outre l'image des fissures, la qualité du signal du faisceau renvoyé par le fond permet de distinguer les coulées, les lacs de lave, les éboulis et les laves en coussin. La figure 6 montre un exemple de données et d'interprétation de l'image SAR, le long de l'axe entre 12°50' et 12°51'N (N. Vaslet et al.) (16). L'interprétation des données, basée sur l'étude statistique des longueurs et de la densité des failles ou fissures, est en cours.

- Magnétisme. Derrière le SAR (à 100 m au dessus du fond), était tracté un magnétomètre profond. L'objectif est de tester l'influence de la segmentation (ou mini-segmentation) de l'axe d'une variation de profondeur de la température de Curie ou de l'action de l'activité hydrothermale sur les propriétés magnétiques de la croûte océanique. Un magnétomètre de référence a été mouillé dans la zone pour permettre des

corrections de la variation diurne du champ magnétique. Les données sont également en cours d'exploitation.

- Température. Une chaîne de thermistance était disposée sous le lest du SAR. Les profils ainsi obtenus devaient compléter les profils verticaux bathysonde-Rosette et les profils "palanquée dynamique".

Résultats

La figure 7 représente le panache hydrothermal obtenu à partir d'une palanquée dynamique (HF 16 PLD) suivant une coupe subperpendiculaire à l'axe de la dorsale au voisinage de 12°45'N. Cette opération était destinée à décrire l'extension du panache de part et d'autre de l'axe et à apprécier la confiance à accorder à l'image obtenue par les palanquées dynamiques le long de l'axe, en tenant compte notamment de la précision de navigation. Pour que les variations de concentrations en CH₄ ou en Mn le long de l'axe soient interprétables en termes de variation d'activité hydrothermale, il ne faut pas, en effet, que le panache soit trop étroit vis-à-vis de la précision de navigation le long de l'axe de la dorsale.

Compte tenu d'une asymétrie assez marquée de la topographie, les coupes des panaches de CH₄ et de Mn (Fig. 7), très similaires, présentent une bonne symétrie axiale. La zone du maximum de concentration (CH₄ : 150 - 200 nl/l ; Mn : 40-50 nM/kg) est parfaitement centrée sur l'axe et déborde d'environ 1 km de part et d'autre de l'axe. La précision de navigation de la palanquée dynamique tractée par le bateau étant probablement meilleure que 200 m, la symétrie et les gradients de concentrations en CH₄ et en Mn permettent d'utiliser les variations de concentrations en CH₄ et en Mn obtenues à partir des prélèvements par palanquées dynamiques le long de l'axe en tant que variations d'activité

hydrothermale.

La figure 7 présente également l'enregistrement de la température sur le préleveur le plus près du fond (≈ 50 m). Cet enregistrement présente deux caractéristiques :

- il est asymétrique - en opposition avec les images de CH_4 et Mn ;

- il présente des variations dont l'amplitude peuvent dépasser $0,2^\circ\text{C}$ sur moins d'un kilomètre.

Ces deux caractéristiques représentent une autre image de la complexité de la structure thermique d'une zone hydrothermale telle qu'elle ressort de la figure à partir des palanquées verticales (Fig. 4). Les variations de $0,2^\circ\text{C}$, sur une centaine de mètres pour certaines d'entre elles, traduisent une grande hétérogénéité, qui interdit toute évaluation quantitative de l'activité hydrothermale à partir des anomalies de température détectées verticalement à l'aide d'une CTD classique. L'asymétrie générale du profil est probablement à attribuer au moins en grande partie à l'effet de topographie de l'axe.

La figure 8 traduit le résultat principal obtenu au cours de la mission. La coupe verticale du panache hydrothermal au droit de l'axe de la dorsale (concentrations en CH_4 et Mn) y est représentée sur une centaine de kilomètres grâce à l'utilisation des palanquées dynamiques. Ce résultat montre que :

- L'activité hydrothermale est présente tout le long du segment étudié ($12^\circ 10'$ à $13^\circ 10' \text{N}$) ;

- L'activité hydrothermale n'est pas répartie d'une manière aléatoire. Il existe des zones où l'activité est "faible", les anomalies en CH_4 et Mn atteignent néanmoins quatre à cinq fois les concentrations naturelles de l'eau de mer ($13^\circ - 13^\circ 10' \text{N}$).

Sur d'autres zones, les anomalies de CH_4 et Mn atteignent 50 fois les concentrations naturelles de l'eau de mer à $12^\circ 42'$ et $12^\circ 47' \text{N}$.

- L'activité hydrothermale est corrélée à la structure géologique de l'axe de la dorsale. Le segment le plus actif est très clairement le segment délimité par les deux petits "OSC" de $12^\circ 37' \text{N}$ et de $12^\circ 54' \text{N}$. Plus au Sud, le tracé des courbes isométhane montre des discontinuités à $12^\circ 28'$ et $12^\circ 18'$. Il ne s'agit pas d'un artefact dû au choix des valeurs de concentrations pour le tracé des courbes isoconcentrations. Les deux latitudes ($12^\circ 28'$ et $12^\circ 18'$) correspondent à des changements de direction de l'axe de la dorsale ("Deval").

- La forme des panaches traduit une composante de courant significative vers le Sud.

- L'enregistrement de température au voisinage du fond confirme les variations très locales de l'ordre de $0,2^\circ\text{C}$ (représentées fig. 8). Les valeurs les plus élevées enregistrées entre $12^\circ 37'$ et $12^\circ 54' \text{N}$ reflètent sans doute l'apport hydrothermal, mais dans le détail ne sont pas corrélées avec les anomalies chimiques. On ne relève pas de "super anomalies" de température qui indiqueraient être passé à proximité immédiate d'une source ; les signaux chimiques enregistrés ne sont donc pas "contaminés" par des apports ponctuels.

English abridged version

Hydrofast cruise of the R.V. J. Charcot addressed the important problem of the variation of hydrothermal activity along the strike of the Ridge over a distance of 100 km with respect to the structure of the ridge axis. This cruise was conducted along the EPR between the OSC at $11^\circ 45' \text{N}$ and the topographic high at 13°N .

To reach that objective, a new tool, the dynamic hydrocast, was used. This technique permits to

get average samples mile per mile, horizontally, at four different depths above the bottom. Temperature is recorded at the same time. This method allows to obtain the picture of the variation of concentration of hydrothermal tracers such as CH₄, Mn and He. CH₄ and Mn were measured on board.

In addition, the side-scan sonar SAR gave a continuous picture of the fissures along the strike and of the different facies (pillows, lava flows, lava lakes...) within the 300 to 400 m width of the axial graben. A magnetometer and a thermistance array towed with the SAR completed the set of data necessary to get the best geological settings to be compared with hydrothermal activity as described from dynamic hydrocasts.

The main results are as follows :

- Hydrothermal activity is present all along the studied segment (12°10'-13°10'N).

- Hydrothermal activity is not randomly distributed : North of 13°N, on the topographic high, the activity is the lowest although CH₄ and Mn signals are up to five times the normal background.

In other areas, CH₄ and Mn reach up to 50 times the normal seawater background (at 12°42' and 12°47'N).

- Hydrothermal activity is clearly correlated to the Ridge axis structure. The most active hydrothermal segment is located between the two small OSC's at 12°37'N and at 12°54'N. The discontinuity to the North is very sharp. South of this segment, hydrothermal activity, weaker, seems to be correlated to secondary structures such as discontinuities in the linearity of the axis (at 12°28' and 12°18'N).

- The plume shape indicates a current component to the South.

- Temperature records show local

variations up to 0.2°C and are not a simple image of the chemical plume.

Conclusion

Les deux informations importantes apportées par Hydrofast sont les suivantes :

- sur une centaine de kilomètres le long de l'EPR, l'activité hydrothermale n'est pas répartie d'une manière aléatoire. Elle dépend clairement des discontinuités de la structure axiale de la dorsale ;

- l'image thermique de panache est différente de l'image chimique du panache (CH₄, Mn). Cette différence peut être due en partie au comportement des traceurs chimiques non conservatif, mais elle est surtout due à une structure thermique très complexe des zones hydrothermales (turbulences à une échelle inférieure au mille, effets topographiques...).

Références

(1) Corliss J.B., Dymond J., Gordon L.I., Edmond J.M., Von Herzen R.P., Ballard R.D., Green K., Williams D., Bainbridge A., Crane K. et Van Andel T.H., Submarine thermal springs on the Galapagos Rift. *Science* 203 : 1073-1083, 1979.

(2) Francheteau J., Needham H.D., Choukroune P., Juteau T., Séguret M., Ballard R.D., Fox P.J., Normark W., Carranza A., Cordoba D., Guerrero J., Rangin C., Bougault H., Cambon P. et Hékinian R., Massive deep-sea sulfide ore deposit discovered on the East Pacific Rise. *Nature*, 277 : 523-528, 1979.

(3) Spiess F.N., Macdonald K.C., Atwater T., Ballard R., Carranza A., Cordoba D., Cox C., Diaz Garcia V.M., Francheteau J., Juteau T., Kastner M., Larson R., Luyendyk B., Macdougall J.D., Miller S., Normark W., Orcutt J. et Rangin C. (Rise Project Group), East Pacific Rise : hot springs

and geophysical experiments. Science 207 : 1421-1444, 1980.

(4) Boulègue J., Michard G., Bougault H. et Charlou J.L., Hydrothermal activity on the East Pacific Rise between 15°N and 7°S, EOS, 61, 992, 1980.

(5) Hékinian R., Février M., Avedik F., Cambon P., Charlou J.L., Needham H.D., Raillard J., Boulègue J., Merlivat L., Moinet A., Manganini S. et Lange J., East Pacific Rise near 13°N : Geology of new hydrothermal fields. Science, v. 219, p. 1321-1324, 1983.

(6) Hékinian R., Francheteau J., Renard V., Ballard R.D., Choukroune P., Cheminée J.L., Albarède F., Minster J.F., Charlou J.L., Marty J.C. et Boulègue J., Intense hydrothermal activity at the Rise axis of the East Pacific Rise near 13°N : Submersible witnesses the growth of sulfide chimney. Marine Geology Research, v. 6, p.1-14, 1983.

(7) Renard V., Hékinian R., Francheteau J., Ballard R.D. et Bäcker H., Submersible observations at the axis of the ultra-fast spreading East Pacific Rise (17°30' to 21°30'S).

(8) Gente P., Auzende J.M., Bougault H. et Voisset M., Variabilité morphotectonique le long de la dorsale Est Pacifique entre 11° et 13°N. Résultats préliminaires de la campagne Géocyarise 2 (submersible Cyana). C.R.A.S. Paris, t. 299, sér. II, n° 19, p. 1337-1342, 1984.

(9) Macdonald K.C., Sempere J.C. et Fox P.J., The East Pacific Rise from the Siqueiros to the Orosco fracture zone : along-strike continuity of the neovolcanic zone and the structure and evolution of overlapping spreading centers. J. Geophys. Res., 89, p. 6049-6069, 1984.

(10) Bäcker E.T., Lavelle J.W. et Massoth G.J., Hydrothermal particle plumes over the southern

Juan de Fuca Ridge. Nature, 316, 342-344, 1985.

(11) Bäcker E.T. et Massoth G.J., Hydrothermal plume measurements : a regional perspective. Science, 234, 980-982, 1986.

(12) Bäcker E.T., Massoth G.J. et Feely R.A., Cataclysmic hydrothermal venting on the Juan de Fuca Ridge. Nature, 329, 149-151, 1987.

(13) Klinkhammer G., Rona P., Greaves M. and Elderfield H., Hydrothermal manganese plumes in the Mid-Atlantic Ridge. Nature, 314, 727-731.

(14) Charlou J.L., Dmitriev L., et Bougault H., Hydrothermal CH₄ between 12°N and 15°N over the mid-Atlantic Ridge. Deep-Sea Res., 35, 1, p. 121-131, 1988.

(15) Charlou J.L., Bougault H., Appriou P., Etoubleau J. et Birolleau A., Water column anomalies associated with hydrothermal activity between 11°40'N and 13°N on the East Pacific Rise, en prép.

(16) Vaslet N., Fouquet Y., Voisset M. et Bougault H., Apports des images du sonar latéral SAR à la cartographie d'une zone hydrothermale de l'EPR, in press.

Légendes des figures :

Fig. 1 : Variation de profondeur axiale le long de la dorsale du Pacifique Est, d'après Mac Donald et al., 1984. Le segment choisi pour étude de la variation d'activité hydrothermale le long de l'axe au cours d'Hydrofast est situé entre l'OSC de 11°45'N et le haut topographique de 13°N.

Fig. 2 : Carte simplifiée de l'EPR de la zone étudiée, d'après Gente, 1987.

Fig. 3 : Profils verticaux de CH₄, Mn et He. Les données de CH₄ ont été obtenues par J.L. Charlou, Mn par P. Appriou (UBO) et He par P.

Jean Baptiste (CEA/IRDI/DESICP, DPC). Noter la diversité des profils, notamment de HF07 à HF21, palanquées localisées entre 12°45' et 12°53'N.

Fig. 4 : Profil température potentielle/salinité. En liaison avec la figure 3, noter la disparité des profils : cette disparité traduit une structure très complexe de la masse d'eau au voisinage des sites hydrothermaux. Pour comparaison, le profil 51 est un profil de référence situé environ à 30 milles à l'ouest de l'axe de la dorsale.

Fig. 5 : Schéma de principe des palanquées dynamiques. A: hélice qui fait fonctionner la pompe péristaltique en B. C est un plateau distributeur pour l'alimentation séquentielle des bouteilles en D. Les bouteilles "proportionnelles" D se remplissent au fur et à mesure de la distance parcourue et permettent d'obtenir un échantillon moyen sur cette distance. En E, un système permet le passage du remplissage de la bouteille suivante.

Fig. 6 : Exemple d'image du sonar latéral SAR entre 12°50' et 12°51'N. A-B, passage du SAR. 1 : coulée récente. 2 : laves fluides. 3 : éboulis. 4 : laves en coussins. 5 : surfaces non interprétables. 6 : faille normale. 7 : fissure. (ref. 16).

Fig. 7 : Coupe perpendiculaire à l'axe EPR du panache hydrothermal et profil de température effectué à 50 m au dessus du fond. Noter la symétrie et la bonne concordance des images CH₄ et Mn. Noter la dissymétrie du profil de température et les variations brusques de l'ordre de 0,02°C.

Fig. 8 : Variation d'activité hydrothermale sur une centaine de kilomètres le long de l'EPR. Le segment le plus actif est délimité par les petits OSC localisés à 12°37' et 12°54'N.

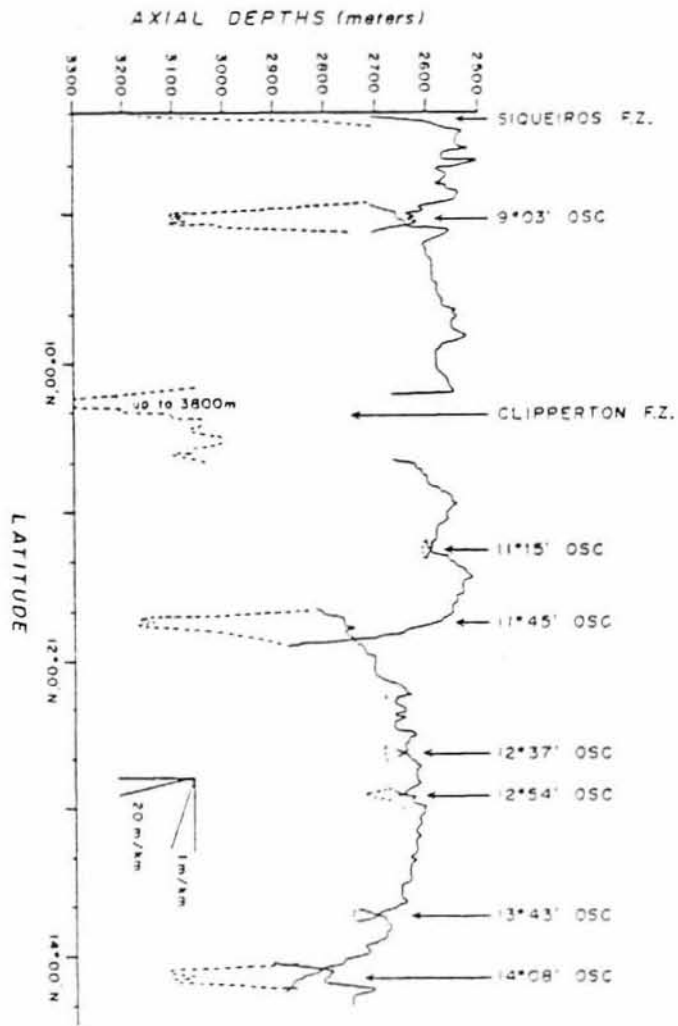


Figure 1 : Bougault et al.

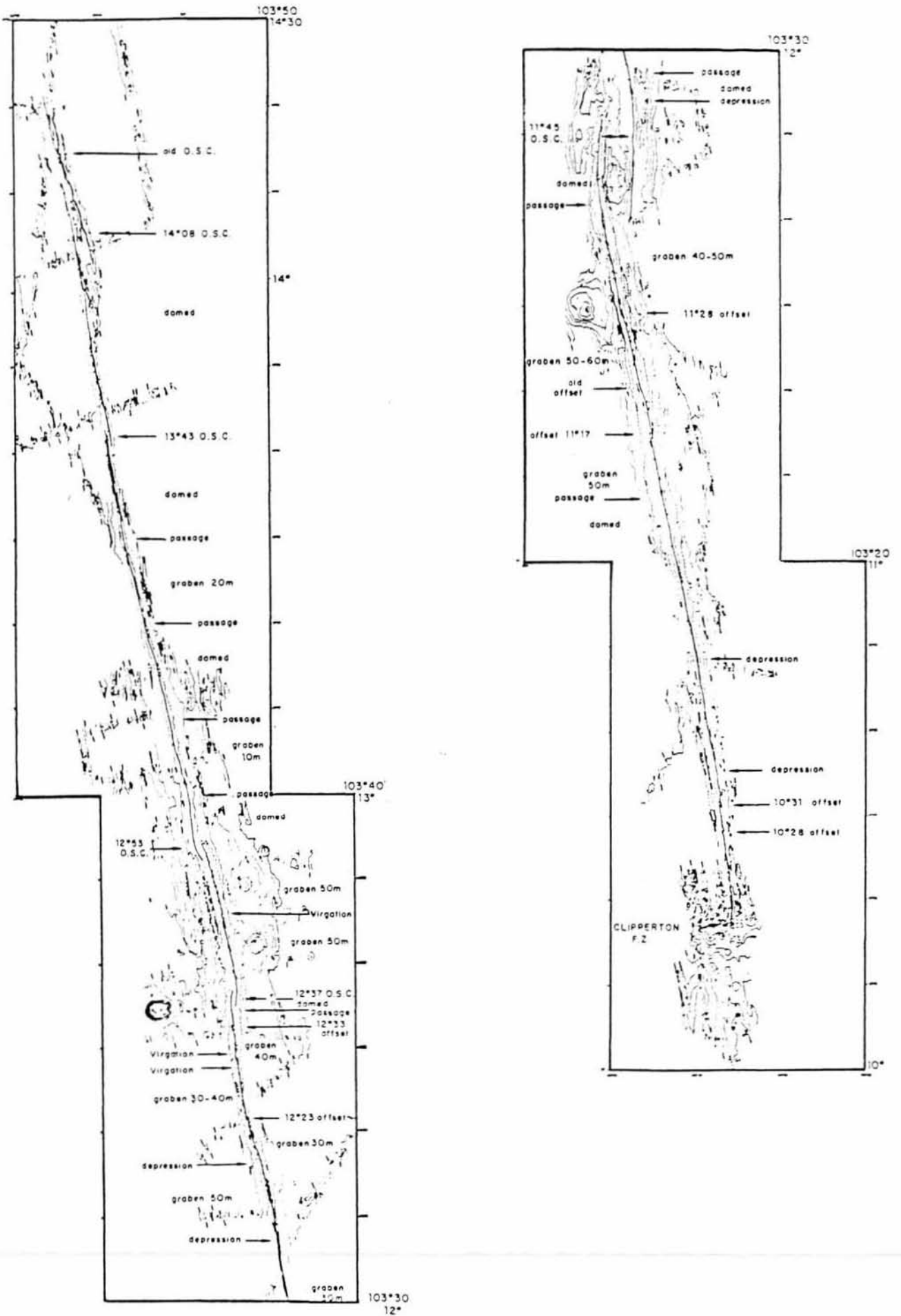


Figure 2 : Bougault et al.

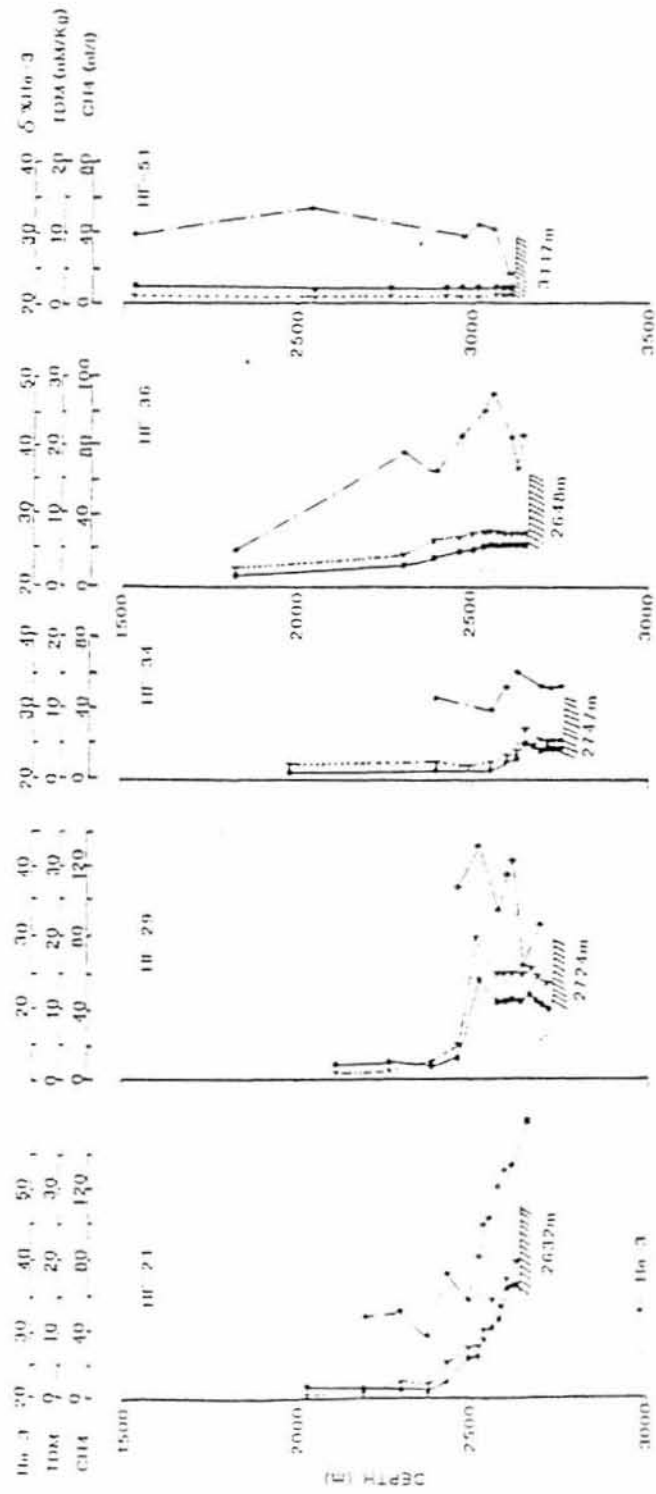
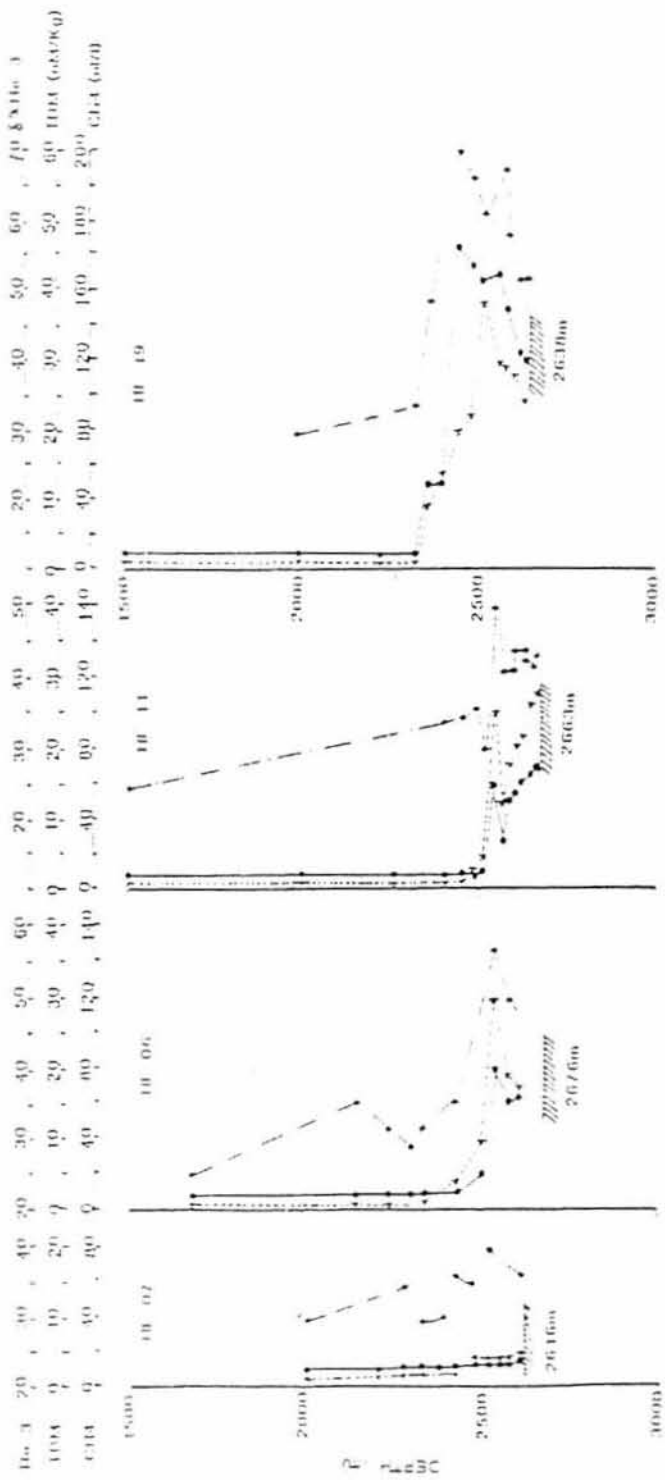


Figure 3. : Bougault et al.

Figure 3 : Bougault et al.

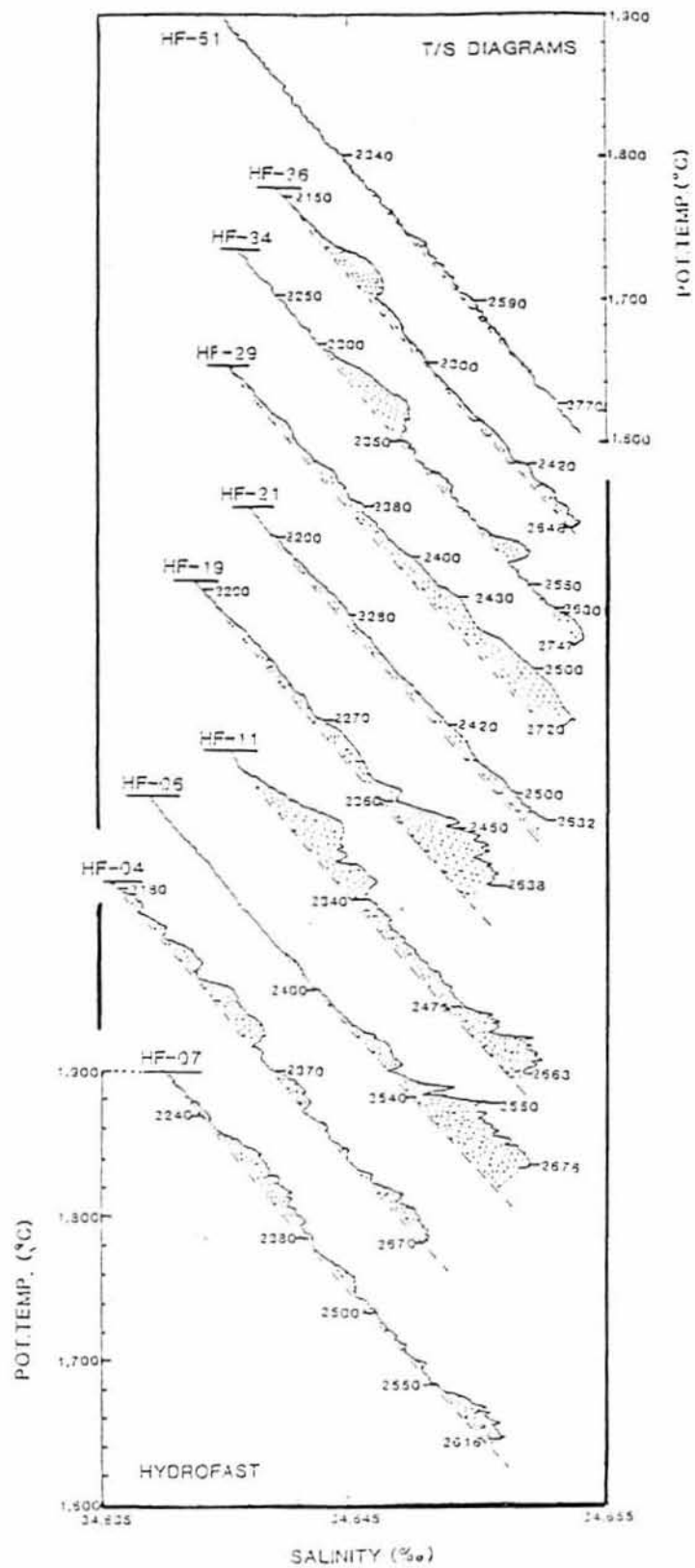


Figure 4 : Bougault et al.

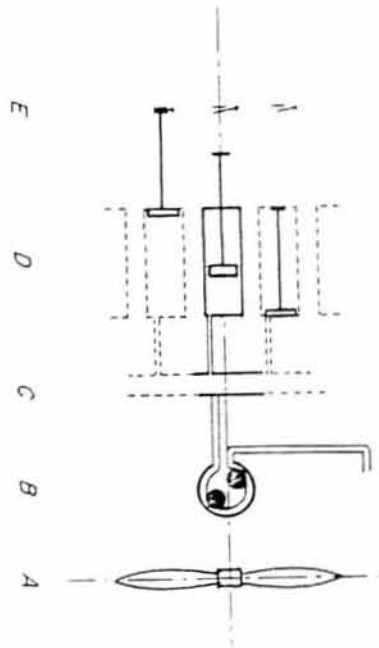


Figure 5 : Bougault et al.

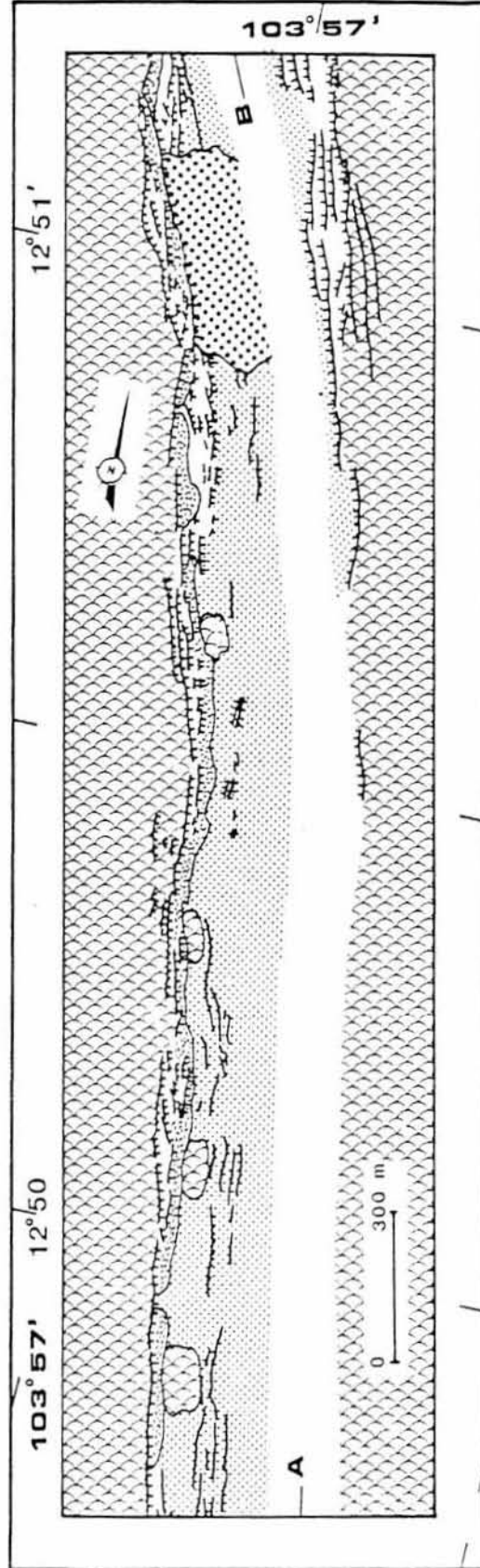
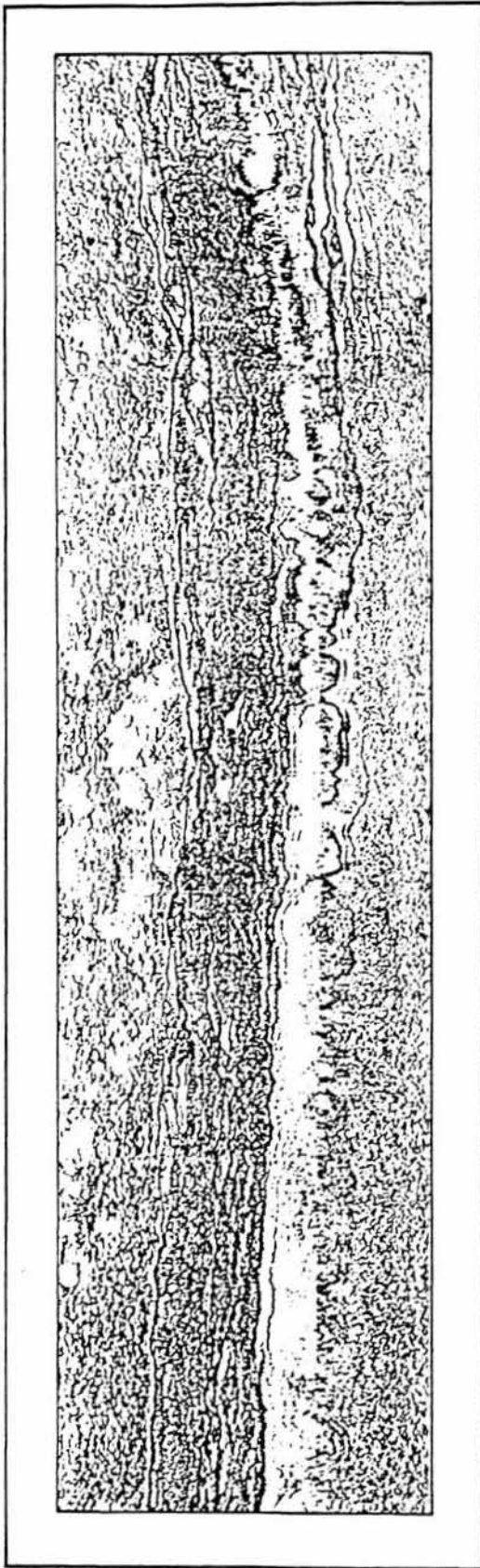


Figure 6 : Bougault et al.

HDROFAST -1986-

HF 16 PLD

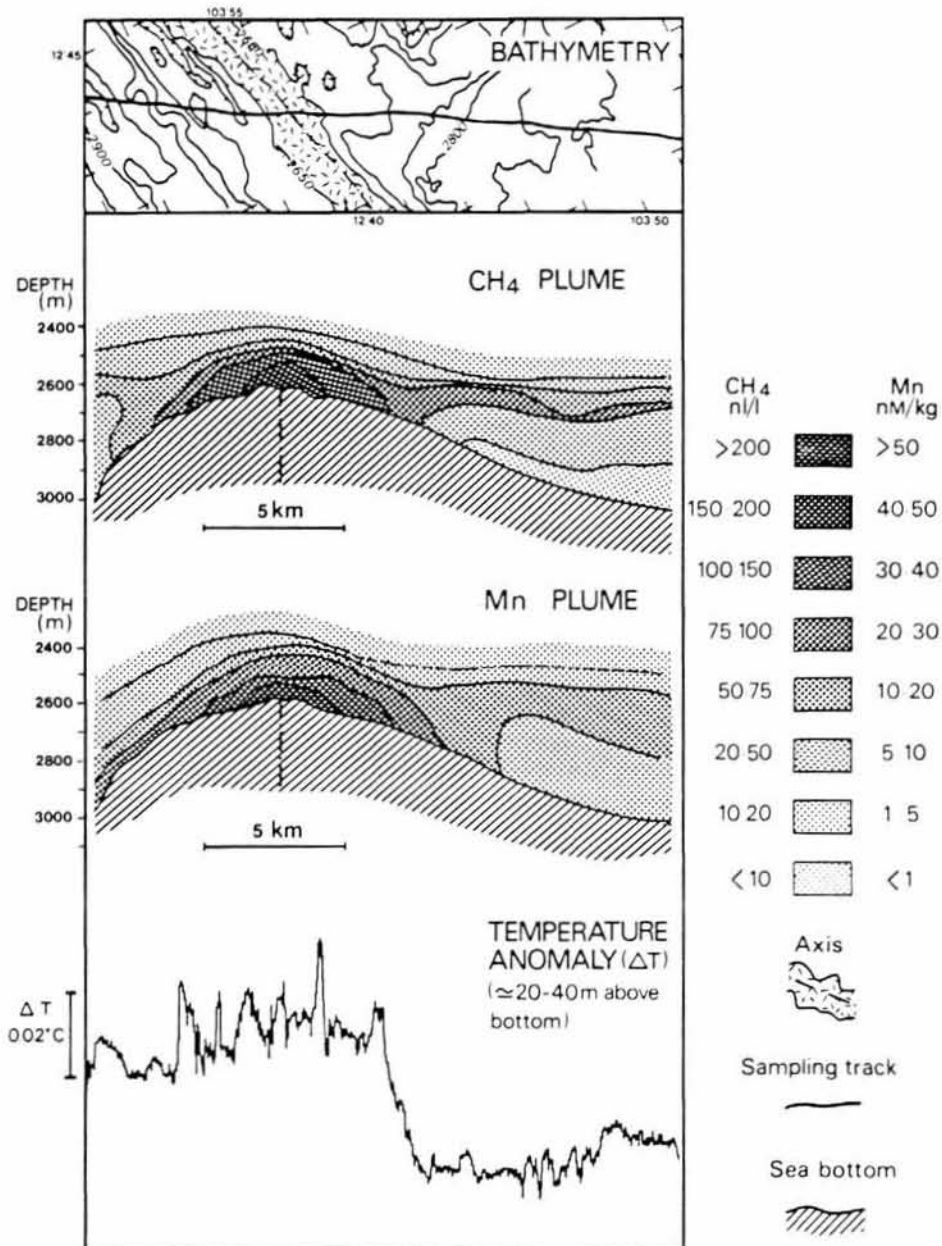


Figure 7 : Bougault et al.

East Pacific Rise 13°N

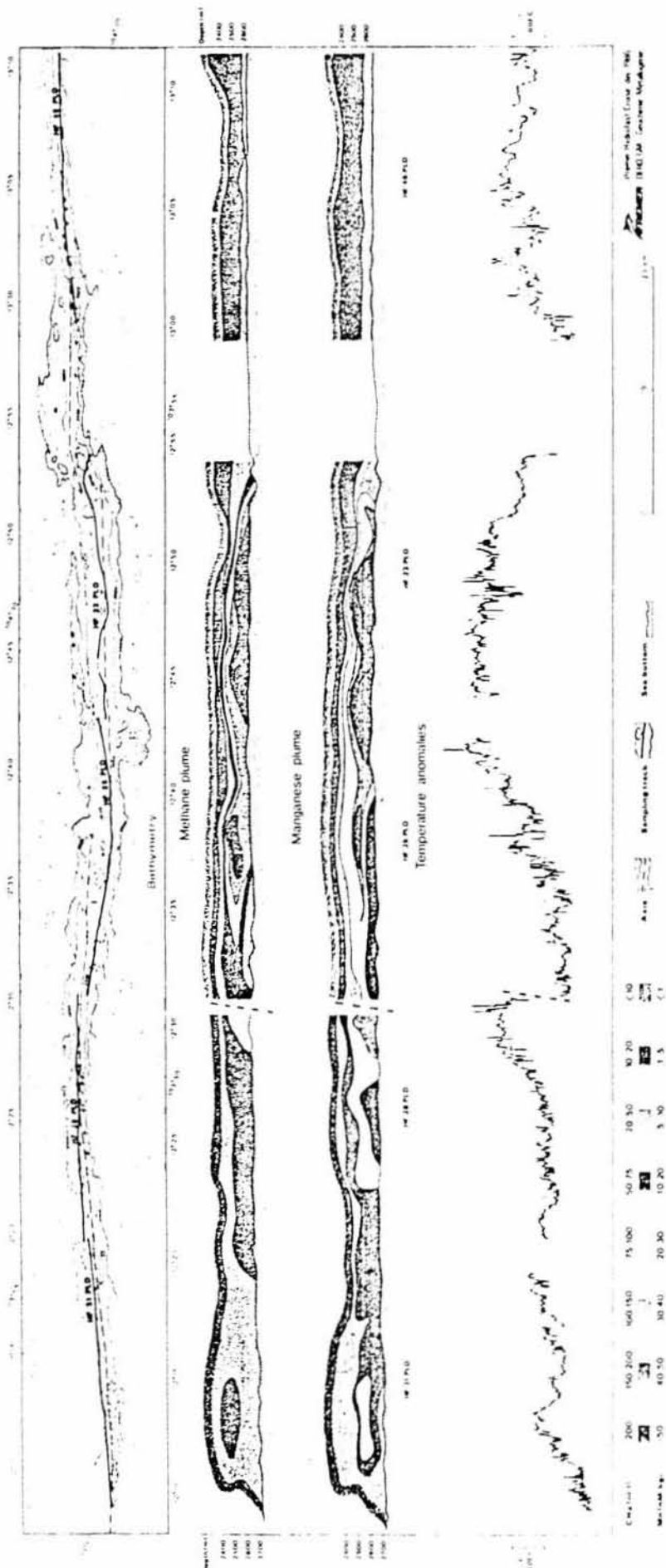


Figure 8bis : Bougault et al.