

Profils d'hydrocarbures légers dans l'eau de mer, les saumures et les eaux interstitielles de la fosse Atlantis II (mer Rouge)

Mer Rouge
Fosse Atlantis II
Saumure
Eau interstitielle
Hydrocarbures légers dissous

Red Sea
Atlantis II Deep
Brine
Interstitial water
Dissolved light hydrocarbons

Gérard BLANC ^a, Jacques BOULÈGUE ^b, Jean-Luc CHARLOU ^c

^a Centre de Géochimie de la surface (UPR n° 6251),
Institut de Géologie (ULP), 1, rue de Blessig, 67084 Strasbourg Cedex, France.

^b Laboratoire de Géochimie et Métallogénie (UA n° 196),
U.P.M.C., 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France.

^c Laboratoire DERO-GM, IFREMER,
Centre de Brest, BP n° 70, 29280 Plouzané, France.

Reçu le 27/9/89, révisé le 11/12/89, accepté le 14/12/89.

RÉSUMÉ

Les concentrations en hydrocarbures légers (C1-C3) ont été mesurées dans l'eau de mer, les saumures et les eaux interstitielles des sédiments métallifères de la fosse Atlantis II. Ces échantillons d'eau ont été prélevés lors de la mission HYDROTHERM (mai 1985) à bord du *NO Marion-Dufresne* (TAAF). Les hydrocarbures légers dissous dans ces eaux ont très probablement une origine thermogénique comme le suggèrent les rapports C1/(C2 + C3) compris entre 5 et 33. Des calculs de solubilité relative du méthane en fonction de la température et de la salinité suggèrent que la différence de concentration en méthane dissous dans la saumure supérieure et inférieure doit correspondre à l'équilibre thermodynamique et non, à un apport de fluide riche en méthane au sein des saumures.

Les concentrations en méthane dans les eaux interstitielles sont en moyenne deux fois plus faibles que celles de la saumure inférieure. Cette différence résulte certainement d'un phénomène d'accumulation de méthane dans les saumures depuis la formation d'un écran d'immiscibilité empêchant une perte importante de méthane vers le haut par diffusion. La plus forte concentration en méthane (169 µl/l) déterminée sur un échantillon d'eau interstitielle du bassin SW suggère un apport récent de fluide riche en méthane au sein des sédiments métallifères.

L'ensemble des résultats acquis sur les hydrocarbures légers suggère qu'il n'y a pas d'apport de fluide hydrothermal actuel au sein des saumures des bassins W et SW de la fosse Atlantis.

Oceanologica Acta, 1990. 13, 2, 187-197.

ABSTRACT

Light hydrocarbon profiles in the sea water, brines and metalliferous sediment interstitial waters of the Atlantis II Deep (Red Sea)

Light hydrocarbon (C1-C3) concentrations in the sea water, brines and metalliferous sediment pore waters of the Atlantis II Deep are reported. Red Sea waters were sampled during the HYDROTHERM cruise (May 1985) on board *RV Marion-Dufresne* (TAAF). The hydrocarbon gases dissolved in these waters are apparently of a thermogenic origin as evidenced by C1/(C2 + C3) ratios ranging from 5 to 33. Thermodynamic calculations of methane solubility as a function of temperature and salinity suggest that the methane concentrations in the upper and lower brines can be explained in terms of thermodynamic equilibrium. Methane concentrations in the interstitial waters yield concentrations lower by one-half than those of the lower brine. This difference possibly reflects methane accumulation resulting from the long residence time of the brine in the basin due to its high stability as far as mixing with

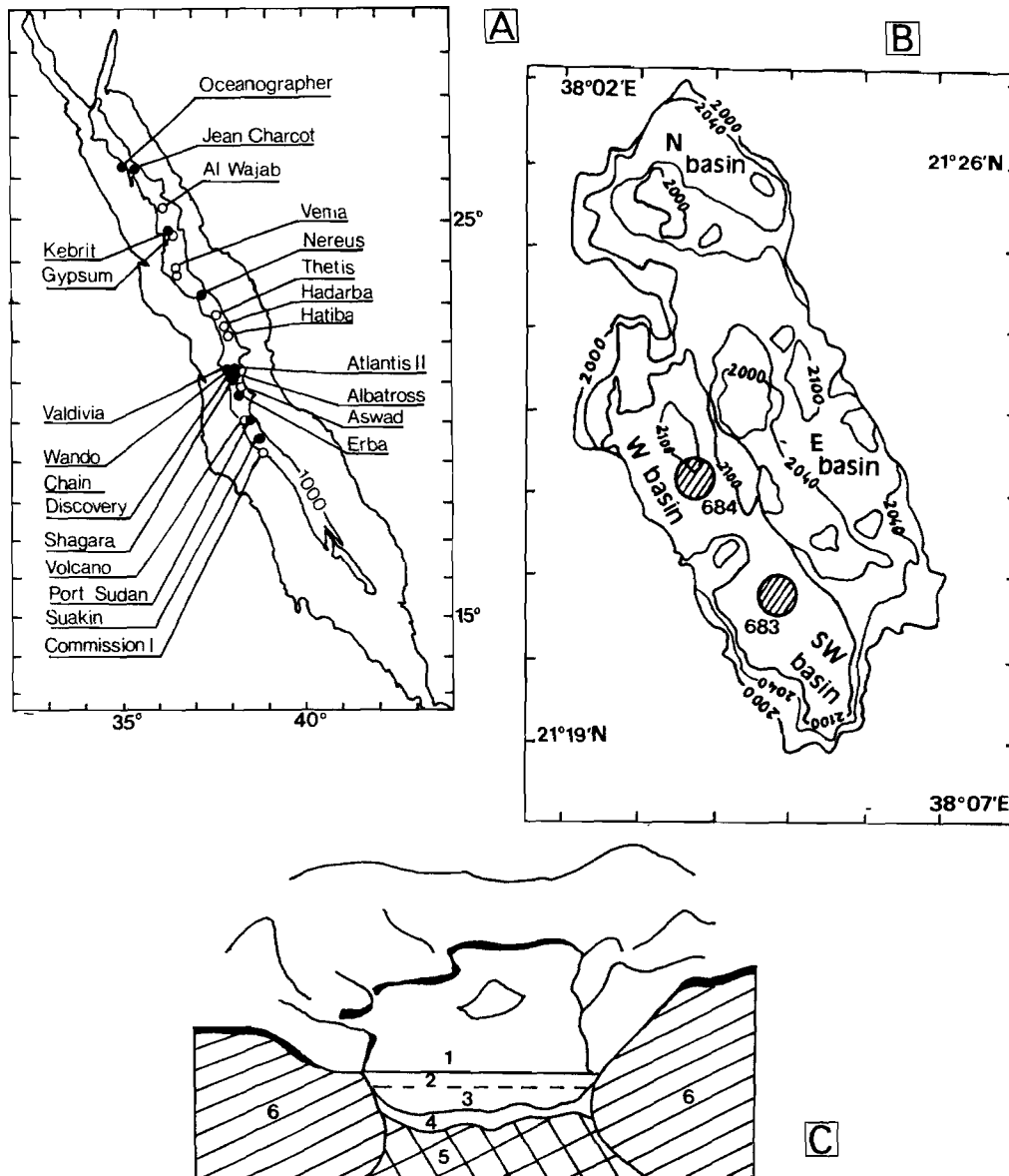


Figure 1

(A): Carte schématique de la mer Rouge montrant la dépression axiale définie par l'isobathe 1000 m et les principales fosses axiales contenant des saumures et des sédiments métallifères (○) ou contenant seulement des sédiments métallifères (○); d'après Pautot *et al.* (1984).

(B): Carte schématique de la fosse Atlantis II montrant la localisation de carottages et des panlanquées réalisées au cours de la mission HYDROTHERM (mai 1985) à bord du *NO Marion-Dufresne* (TAAF).

(C): Coupe schématique recoupant le bassin SW. Sur le schéma (C): 1 = eau de mer; 2 = saumure supérieure; 3 = saumure inférieure; 4 = sédiments métallifères; 5 = basalte de la croûte océanique; 6 = série sédimentaire évaporitique Miocène.

(A): Schematic map of the Red Sea showing the axial depression (as defined by 1,000 m isobaths) and the main axial deeps containing brines and metalliferous sediments (○), or containing only metalliferous sediments (○); after Pautot *et al.* (1984).

(B): Schematic map of the Atlantis II Deep area showing the hydrographic and drilling stations during the HYDROTHERM cruise (May 1985) on board *RS Marion-Dufresne* (TAAF).

(C): Schematic transverse section in the SW basin. On (C): 1 = Sea water; 2 = upper brine; 3 = lower brine; 4 = metalliferous sediment; 5 = oceanic basalt; 6 = Miocene evaporite sedimentary sequence.

lons d'eaux, bouchés à l'aide de septums sertis par des couronnes d'aluminium, et stockés en position couchée à l'obscurité jusqu'à l'analyse au laboratoire. Le même type de méthode de prélèvement a été utilisé par Bernard *et al.* (1978).

MÉTHODE D'ANALYSE

Les hydrocarbures légers, en particulier CH₄ sont analysés dans les eaux libres et les eaux interstitielles par

chromatographie en phase gazeuse couplée à une technique de piégeage. Cette technique a déjà été utilisée par de nombreux auteurs (Bernard *et al.*, 1976; 1978; Scranton et Brewer, 1977; Baross *et al.*, 1982; Swinnerton et Linnenbom, 1967 *a, b*). Les gaz sont transférés du flacon de prélèvement dans le dégazeur à l'aide d'un gaz vecteur (hélium). Le mélange gaz vecteur et hydrocarbures légers passe alors sur une série de trois pièges constitués de Driérite, Tamis moléculaire,

Position	n°échantillon	Profondeur (mètre)	CH4 n/l	C2 n/l	C3 n/l	C1/C2+C3
Bassin SW 683	H1	874	40			
	H2	1774	45			
	H3	1956	76			
	H4	1976	960			
	H5	1994	24000			
	H6	2069	79000	2800	30	28
Bassin W 684	H7	913	—			
	H8	1813	50			
	H9	1925	74			
	H10	1940	78			
	H11	2000	730			
	H12	2075	89000	4200	40	21

Tableau 1

Concentrations en hydrocarbures légers C1-C3 dans les échantillons d'eau des palanquées 683 et 684 sur la fosse Atlantis II.

Light hydrocarbon concentrations in the water samples of hydrocasts 683 and 684 (Atlantis II Deep).

telles analyses puissent être faites. Dans le bassin SW à 1994 m (H5: T°C=43°C; S°/∞=82°/∞; Blanc *et al.*, 1986), la concentration en méthane mesurée de 24 µl/L est nettement supérieure à celle mesurée à 2000 m dans le bassin W (H11: T°C=36°C, S°/∞=44°/∞).

Pour des problèmes de standardisation, nous n'avons pas pu déterminer les concentrations en éthane et propane.

Burke *et al.* (1981) donnent une valeur de 155 µl/L de méthane dans la saumure supérieure avec un rapport C1/C2 + C3 = 1 000 suggérant une origine biologique du méthane à ce niveau.

Discussion

Burke *et al.*, 1981 interprètent leur profil de concentration de méthane en terme de production biogénique de méthane dans la saumure supérieure.

Or cette interprétation néglige le fait que le système des saumures présente des interfaces de températures, et de salinités nets et stationnaires depuis leur découverte en 1963.

Nous avons donc exploité les données de concentrations en méthane en testant tout d'abord une hypothèse d'équilibre thermodynamique de part et d'autre de l'interface entre la saumure supérieure et la saumure inférieure.

Un calcul de la solubilité relative du CH₄ tenant compte des températures et des salinités mesurées, basé sur l'application de la loi de Henry, permet d'écrire le potentiel chimique du méthane à la température T_i et la salinité S_i selon :

$$\mu_i = \mu_{0,i} + RT_i \ln(\gamma_i, N_i).$$

Dans cette expression $\mu_{0,i}$ est le potentiel chimique de référence qui s'exprime en fonction de l'enthalpie molaire partielle de dissolution à dilution infinie $\Delta H_{(T_i)}$, et de la constante de la loi de Henry (k_i).

$$\mu_{0,i} = \Delta H_{(T_i)} + RT_i \ln(k_i) + \mu(T_i) \text{CH}_4.$$

Le principe de ce calcul est donné en annexe.

A partir des données expérimentales de Cramer (1984), nous avons pu calculer les rapports de concentrations théoriques en méthane entre la saumure supérieure et la saumure inférieure des profils 683 et 684. Les concentrations relatives calculées par cette méthode en fonction de la température et de la salinité sont données dans le tableau 2.

	Profondeur	T°C	S‰	CH4 mesuré	CH4 calculé
BASSIN SW 683					
H1	874	22	40,6	40	
H2	1774	22	40,6	45	ref.
H3	1956	24,50	43	76	45,58
H4	1979	[29]	45	960	50,7
H5	1994	[43]	82	24000	64,04
HB	--	50	142	104000	57,07
rapports des concentrations mesurées et calculées				1,32	1,33
H6	2064	60	264	79000	42,91
		T°C	S‰	CH4 mesuré	CH4 calculé
BASSIN W 684					
H7	913	21,90	40,6	--	
H8	1813	22,05	40,6	50	ref.
H9	1925	22,15	41,0	74	--
H10	1940	22,50	42,0	78	51,9
H11	2000	36,50	44,0	730	70,8
HB	--	50	142	117000	64,49
rapports des concentrations mesurées et calculées				1,32	1,34
H12	2075	60	264	89000	48,12

Tableau 2

Solubilités relatives du méthane calculées en fonction de la température et de la salinité des échantillons des palanquées 683 et 684. Les rapports des concentrations relatives calculées pour ces eaux sont comparés aux rapports des concentrations mesurées. HB : valeurs de la saumure supérieure d'après Burke *et al.* (1981).

Relative methane solubilities calculated from the temperature and salinity data of hydrocasts 683 and 684. The ratios of the calculated relative concentrations are compared with the ratio of the measured concentrations. HB : Upper brine data after Burke et al. (1981).

Les rapports de concentrations relatives calculées pour la saumure supérieure et la saumure inférieure sont de 1,33 et 1,34 pour les profils 683 et 684 respectivement.

Ces rapports sont très comparables avec le rapport des concentrations mesurées [(CH₄) saumure supérieure / (CH₄) saumure inférieure] qui est de 1,32 pour les deux profils.

— Ce résultat indique clairement que le méthane est plus soluble dans la saumure supérieure que dans la saumure inférieure.

— En conséquence, les concentrations en méthane plus élevées obtenues dans la saumure peuvent *a priori* être interprétées en terme d'équilibre thermodynamique entre les saumures avant de faire appel à une origine bactérienne plus difficile à contraindre si les rapports C1/C2 + C3 sont modifiés par des différences de solubilité des gaz méthane, éthane, propane entre les deux saumures. Les données expérimentales sur la solubilité de l'éthane et du propane dans des saumures concentrées sont insuffisantes actuellement pour qu'un calcul similaire à celui que nous avons fait pour le méthane puisse être établi.

D'autres arguments suggèrent la validité de notre hypothèse.

— Watson et Waterbury (1969) suggèrent que si une activité microbiologique existe dans la fosse Atlantis II, elle se situe dans un fin niveau de 1 à 2 m à 1980 m de profondeur dans la zone de transition entre la saumure supérieure et l'eau de mer, les deux saumures étant complètement stériles. Ce niveau a été mis en évidence

LES EAUX INTERSTITIELLES

Résultats

— Les résultats d'hydrocarbures légers dans les saumures interstitielles des sédiments des carottes 683 et 684 sont donnés dans le tableau 3.

Echantillon	Profondeur en cm	µl/l			C1/(C2+C3)
		Méthane C1	Ethane C2	Propane C3	
83-1	95	26	3,5	0,8	6
83-2	245	56	2	--	[28]
83-3	395	80	11	0,4	6
83-4	545	58	9	0,13	6
83-6	958	45	10	0,4	4
83-7	1203	169	26	1,5	6
83-8	1578	54	9,7	0,5	5
84-1	40	23	2,9	0,9	6
84-2	200	44	7,6	1	5
84-3	415	28	1,5	0,01	18
84-4	550	43	1,2	0,04	33
84-5	856	40	2	0,04	20
84-6	1051	20	1,4	0,07	13
84-7	1156	41	2,6	0,2	15
84-8	1360	47	7,1	0,17	6

Tableau 3

Concentrations en hydrocarbures légers (C1-C3) dissous dans les eaux interstitielles des sédiments des carottes 683 (Bassin SW) et 684 (Bassin W).

Light hydrocarbon (C1-C3) concentrations in the interstitial water samples of cores 683 (SW basin) and 684 (W basin).

— Les concentrations en CH₄ (25 à 80 µl/l) mesurées dans les eaux interstitielles des sédiments métallifères sont inférieures aux concentrations en CH₄ de la saumure inférieure (79 à 89 µl/l respectivement pour les deux bassins SW et W). Cependant l'échantillon 83-8 prélevé à 1203 cm dans la carotte 683 montre une concentration nettement plus élevée (169 µl/l).

— Les profils des concentrations en méthane en fonction de la profondeur (fig. 3) ne sont pas identiques dans les deux bassins. Le profil effectué dans le bassin W montre de faibles variations le long de la colonne sédimentaire avec une moyenne de concentration ($X = 35,75 \pm 10,4$ µl/l). Cette moyenne est plus faible que celle calculée dans le bassin SW, sans tenir compte du point anormal à 169 µl/l ($X = 53,1 \pm 17$ µl/l).

— Les concentrations en méthane mesurées dans la couche sédimentaire superficielle des deux bassins SW (26 µl/l à 95 cm) et W (23 µl/l à 40 cm) sont comparables aux concentrations trouvées par Burke *et al.* (1981) dans le bassin Est (22 à 30 µl/l dans les premiers 50 cm).

Dans les deux bassins W et SW, éthane et propane sont présents à des concentrations non négligeables (tab. 3). Les rapports C1/C2+C3 sont compris dans une gamme de 5 à 33. Ces rapports très faibles suggèrent comme dans la saumure inférieure une origine thermogénique pour le méthane. Ces rapports sont nettement plus faibles que ceux publiés par Burke *et al.* (1981) pour les cinquante premiers centimètres des sédiments dans les bassins SW et E ($200 < C1/C2 + C3 < 600$).

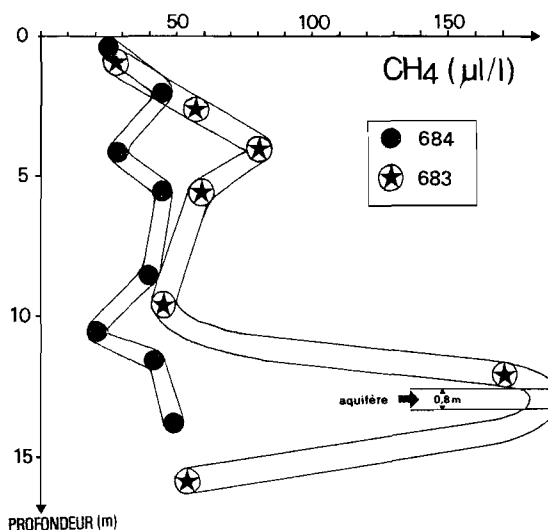


Figure 3

Profils concentration-profondeur de méthane dissous dans les eaux interstitielles des carottes 683 et 684.

Methane concentration-depth profiles in the sediment interstitial waters of cores 683 and 684.

Discussion

— Le premier point qui ressort de ces résultats est la plus forte concentration en méthane (169 µl/l) mesurée dans un échantillon situé juste au-dessus de la poche d'eau rencontrée dans la carotte 683. En accord avec les résultats chimiques et isotopiques (Blanc et Boulégue, soumis), ce résultat apporte un argument supplémentaire à l'hypothèse d'une arrivée récente de fluide dans la série sédimentaire de la partie inférieure de la carotte 683. La concentration de CH₄ égale à 45 µl/l mesurée à 3,5 m au-dessus de cette zone d'apport de fluide montre le caractère récent de cet événement.

— Le deuxième résultat significatif est la faiblesse des valeurs du rapport C1/C2+C3 dans les deux carottes. Les rapports ($4 < C1/C2 + C3 < 33$) suggèrent une origine thermogénique pour le méthane. Cette interprétation s'oppose à celle proposée par Burke *et al.* (1981), ces auteurs suggérant une origine biogénique *in situ* pour le méthane. Les teneurs de carbone organique mesurées dans la carotte 683 sont inférieures à 0,2 % (tableau 4). Ces valeurs sont très faibles et rendent illusoire toutes précisions concernant les paramètres de qualité de cette matière organique. « Cependant, il semble s'agir d'une matière organique résiduelle très dégradée que l'on pourrait qualifier de bruit de fond détritique » (A. Y. Huc, IFP, communication personnelle).

D'autre part, la production thermogénique d'hydrocarbures légers dans une colonne sédimentaire n'est possible qu'à une température supérieure à 60°C (Schoell, 1984).

Les températures mesurées dans les sédiments sont comprises entre 54 et 62°C (Erickson et Simmons, 1969). Ces températures sont limites pour qu'un cracking de matière organique existe dans ces sédiments métallifères. De plus, l'analyse fine du matériel organique résiduel du bassin SW suggère un régime thermique modéré au cours l'histoire de la fosse Atlantis II (Simoneit *et al.*, 1987). En comparaison avec d'autres sites

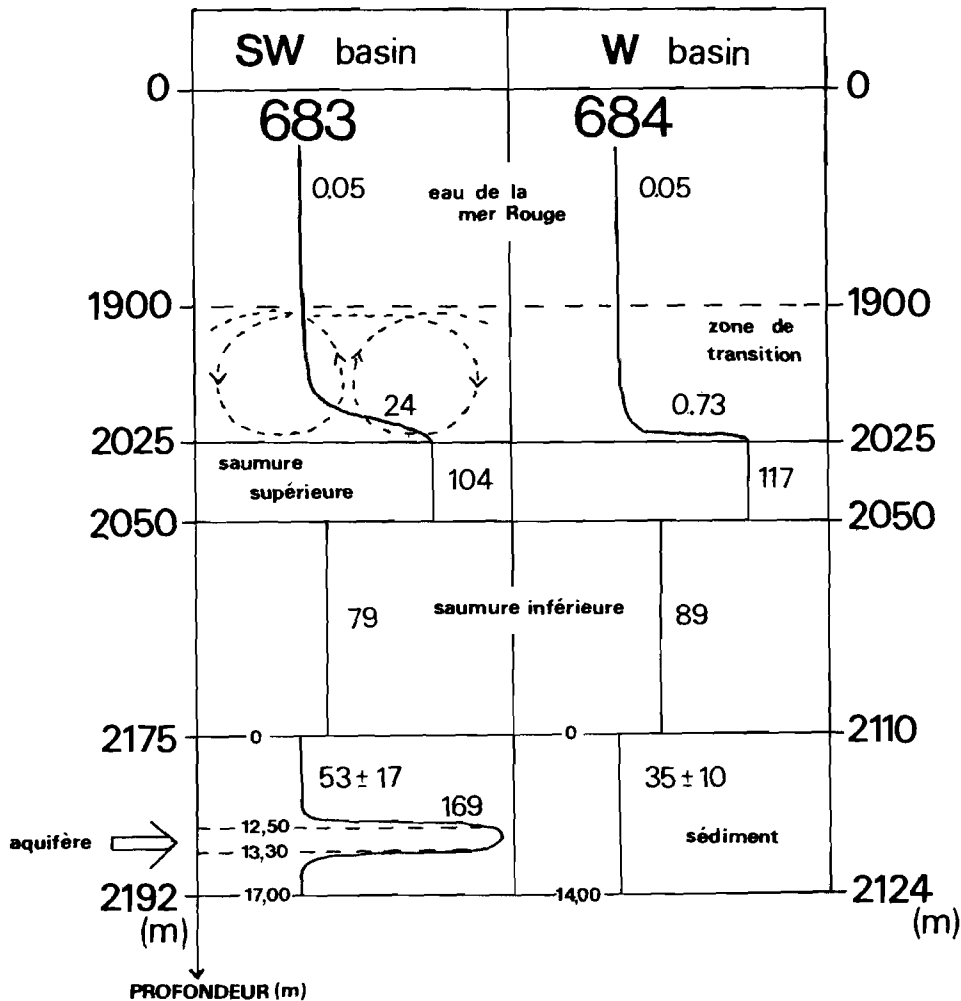


Figure 4

Profil schématique de l'ensemble des données acquises sur le méthane (échelle non conservée).

1. Concentrations de CH_4 dissous plus élevées dans la zone de transition du bassin SW que dans le bassin W à altitude égale.
- 2, 3. Concentrations de CH_4 plus élevées dans la saumure supérieure que dans la saumure inférieure.
4. La concentration la plus élevée de méthane dissous est mesurée dans les eaux interstitielles au niveau d'un aquifère récent dans les sédiments métallifères du bassin SW. L'origine est très certainement en relation avec un apport latéral actuel de fluide provenant de la série miocène.

Schematic profile of the all methane data of this study.

1. The dissolved methane concentrations in the SW basin transitional zone are higher than those of the W basin at the same depth.
- 2, 3. Methane concentrations in the upper brine are higher than those lower brine.
4. The highest methane concentration is determined in the interstitial water sampled near a recent aquifer in the SW basin metalliferous sediments. The origin of this aquifer is probably related to a recent lateral discharge of fluid originating in the Miocene sequence.

Annexe : Principe de calcul de la solubilité relative du méthane en fonction de la température et de la salinité

Nous pouvons écrire les potentiels chimiques du méthane (μ) aux températures T_i et aux salinités S_i dans les saumures inférieure et supérieure et dans l'eau de mer sus-jacente selon :

Exemple pour le bassin SW.

- eau de mer

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_1 = \mu_{0,1} + RT_1 \ln(\gamma_1, N_1) \\ T_1 = 22^\circ\text{C}; \quad S_1 = 40,6\text{‰}; \quad (\text{CH}_4)_{\text{mesurée}} = 45 \text{ nl/l} \end{array} \right.$$

2025 m

- saumure supérieure

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_2 = \mu_{0,2} + RT_2 \ln(\gamma_2, N_2) \\ T_2 = 50^\circ\text{C}; \quad S_2 = 142\text{‰}; \quad (\text{CH}_4)_{\text{mesurée}} = 104\,000 \text{ nl/l} \end{array} \right.$$

2050 m

- saumure inférieure

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_3 = \mu_{0,3} + RT_2 \ln(\gamma_3, N_3) \\ T_3 = 60^\circ\text{C}; \quad S_3 = 264\text{‰}; \quad (\text{CH}_4)_{\text{mesurée}} = 79\,000 \text{ nl/l} \end{array} \right.$$

A l'équilibre thermodynamique :

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3.$$

RÉFÉRENCES

- Bäcker H., M. Schoell (1972). New deeps with brines and metalliferous sediments in the Red Sea., *Nature Physical Science*, **240**, 153-158.
- Baross I. A., M. D. Lilley and L. I. Gordon (1982). Is the CH₄, H₂ and CO venting from submarine hydrothermal systems produced by thermophilic bacteria?, *Nature*, **298**, 366-368.
- Bernard B. B., J. M. Brooks and W. M. Sackett (1976). Natural gas seepage in the gulf of Mexico. *Earth and planetary sciences Letters*, **31**, 48-54.
- Bernard B. B., J. M. Brooks and W. M. Sackett (1978). Light hydrocarbons in recent Texas continental Shelf and slope sediments. *J. Geophys. Res.*, **83**, 4053-4061.
- Blanc G., J. Boulègue, D. Badaut and P. Stouff (1986). Premiers résultats de la campagne océanographique Hydrotherm du Marion Dufresne sur la fosse Atlantis II (mer Rouge), *C.R. Acad. Sc., Paris, série II*, **302**, 175-180.
- Blanc G., J. M. Gieskes and P. J. Vrolijk (1988). Advection de fluides interstitiels dans les séries sédimentaires du complexe d'accrétion de la Barbade (leg 110 O.D.P.), *Bull. Soc. géol. Fr.*, **8**, 453-460.
- Blanc G. and J. Boulègue (1989). New evidences of the fluid discharge in the present time into the Atlantis II Deep (Red Sea). Physical, chemical and isotopic constraints, (soumis *E.P.S.L.*).
- Boulègue J., J. T. Liyama, J. L. Charlou, H. Wakita and J. Jedwab (1987). Nankai Trough and Japan Trench: geochemistry of fluids sampled by submersible "Nautile". *Earth planet. Sci. Lett.*, **83**, 363-375.
- Burke R. A., J. M. Brooks and W. M. Sackett (1981). Light hydrocarbons in Red Sea Brines and sediment, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **45**, 627-634.
- Charlou J. L., H. Bougault and L. Dimitriev (1986). CH₄ between 12°N and 15°N over the Mid-Atlantic Ridge. *E.O.S.*, **67**, 365.
- Claypool G. E. and I. R. Kaplan (1974). The origin and distribution of methane in marine sediments, in: *Natural Gases in Marine Sediments*, Edited by I. R. Kaplan, Plenum Press, p. 99-140.
- Coleman D. D., J. B. Risatti and M. Schoell (1981). Fractionation of carbon and hydrogen isotopes by methane-oxidizing bacteria. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **45**, 1033-1037.
- Craig H. (1969). Geochemistry and origin of Red Sea brines, in: *Hot brines and Recent Heavy Metal Deposits in the Red Sea*, Edited by E. T. Degens and D.A. Ross; Springer Verlag, p. 208-242.
- Cramer S. D. (1984). Solubility of methane in Brines from 0 to 300°C. *Ind. Eng. Process. Des. Dev.*, **23**, 533-538.
- Dupré B., G. Blanc, J. Boulègue and C. J. Allègre (1988). Metal remobilization at a spreading centre studied using lead isotopes. *Nature*, **23**, 165-167.
- Erickson A. J. and G. Simmons (1969). Thermal measurements in the Red Sea hot brine pools, in: *Hot Brines and Recent Heavy Metal Deposits in the Red Sea*, Edited by E. T. Degens and D. A. Ross, Springer Verlag, p. 251-253.
- Espitalié J., G. Deroo and F. Marquis (1985). La pyrolyse Rock-eval et ses applications. *Revue de l'institut français du pétrole*, **40**, 563-579.
- Georgioulis L. and G. Ford (1981). Arab silver from the Red Sea mud, *New Scientist*, 470-472.
- Gieskes J., G. Blanc and P. Vrolijk (1989). Hydrochemistry in the Barbados accretionary complex: Leg 110 ODP, *Paleo. Paleo. Paleo.*, **71**, 83-96.
- Girdler R. W. and P. Styles (1974). Two stages Red Sea floor spreading. *Nature*, **247**, 1-11.
- Grimaud D., G. Blanc, J. L. Charlou, P. Jean-Baptiste and L. Dimitriev (1990). Manganese, methane and helium anomalies in sea water above the mid-Atlantic Ridge: Evidence of hydrothermal activity. *Marine Chemistry*, (in press).
- Hartmann M. (1980). Atlantis II Deep geothermal brine system. Hydrographic situation in 1977 and changes since 1965. *Deep-Sea Research*, **27A**, 161-171.
- Hartmann M. (1985). Atlantis II Deep geothermal brine system. Chemical processes between hydrothermal brines and Red Sea deep water. *Marine Geology*, **64**, 157-177.
- Lerman A. (1979). *Geochemical Processes: Water and Sediment Environments*. Wiley, New York, 481 p.
- Mclver R. D. (1974). Residual gas contents of organic-rich canned sediment samples from Leg 23. *Init. Rep. Deep Sea Drilling Project*, **23**, 971-973.
- Naumov V. B., A. Khakimov and I. L. Khodkovski (1974). Thermodynamic data tables. *Geochem. Int.*, **1**, 31-41.
- Pak H., J. R. Zaneveld and J. Kitchen (1980). Intermediate nepheloid layers observed off Oregon and Washington. *J. Geophys. Res.*, **85**, 6697-6708.
- Pautot G., P. Guennoc, A. Coutelle and N. Liberis (1984). Discovery of a large brine deep in the northern Red Sea. *Nature*, **310**, 133-136.
- Pottorf R. J. and H. L. Barnes (1983). Mineralogy, geochemistry and ore genesis of hydrothermal sediments from the Atlantis II deep, Red Sea. *Economic Geology*, **5**, 198-223.
- Ramboz C., E. Oudin and Y. Thisse (1988). Geysier-type discharge in Atlantis II Deep (Red Sea): evidence from fluid inclusions in epigenetic anhydrite. *Canad. Mineral.*, **26**, 765-786.
- Ryan W. B. F., E. M. Thorndike, K. Ewing and D. A. Ross (1969). Suspended matter in the Red Sea brines and its detection by light scattering, in: *Hot Brines and Recent Heavy Metal Deposits in the Red Sea*, Edited by E. T. Degens and D. A. Ross, Springer Verlag, p. 153-157.
- Schoell M. (1984). Recent advances in petroleum isotope geochemistry. *Organic Geochem.*, **6**, 645-663.
- Schoell M. and M. Hartmann (1973). Detailed temperature structure of the hot brines in the Atlantis II deep area (Red Sea). *Marine Geology*, **14**, 1-14.
- Schoell M. and E. Faber (1978). New isotopic evidence for the origin of Red Sea brines. *Nature*, **275**, 436-438.
- Scranton M. I. and P. G. Brewer (1977). Occurrence of methane in the near-surface waters of the western subtropical North-Atlantic. *Deep Sea Research*, **24**, 127-138.
- Shanks W. C. III (1983). Economic and exploration significance of Red Sea metalliferous brine deposits, in: *Cameron Volume on Unconventional Mineral Deposits*, Edited by W. C. Shanks, III, Society of Mining Engineers, p. 151-171.
- Shanks W. C. III and J. L. Bischoff (1980). Geochemistry, sulfur isotope composition and accumulation rates of the Red Sea geothermal deposits. *Econ. Geol.*, **75**, 445-459.
- Simoneit B. R. T., J. O. Grimalt, J. M. Hayes and H. Hartman (1987). Low temperature hydrothermal maturation of organic matter in sediments from the Atlantis II Deep, Red Sea. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **51**, 879-894.
- Simoneit B. R. T., R. P. Philip, P. D. Jenden and E. M. Galimov (1984). Organic geochemistry of Deep Sea Drilling Project sediments from the Gulf of California-Hydrothermal effects on unconsolidated diatom ooze. *Org. Geochem.*, **7**, 173-205.
- Swinnerton J. W. and V. J. Linnenbom (1967 a). Gaseous hydrocarbons in Sea Water: determination, *Science*, **156**, 119.
- Swinnerton J. W. and V. J. Linnenbom (1967 b). Determination of the C1 to C4 hydrocarbons in sea water by gas chromatography. *J. Gas Chromatography*, **5**, 570-576.
- Swinnerton J. W. and V. J. Linnenbom (1969). Low molecular weight hydrocarbon analyses of Atlantis II waters, in: *Hot Brines and Recent Heavy Metal Deposits in the Red Sea*, Edited by E. T. Degens and D. A. Ross, Springer Verlag, p. 153-157.
- Turner J. S. (1969). A physical interpretation of the observations of hot brine layers, in: *Hot Brines and Recent Heavy Metal Deposits in the Red Sea*, Edited by E. T. Degens and D. A. Ross, Springer Verlag, p. 164-173.
- Watson S. W. and J. B. Waterburg (1969). The sterile hot brine of the Red Sea., in: *Hot Brines and Recent Heavy Metal Deposits in the Red Sea*, Edited by E. T. Degens and D. A. Ross, Springer Verlag, p. 272-281.
- Welhan J. A. and H. Craig (1979). Methane and hydrogen in East Pacific Rise hydrothermal fluids. *Geophys. Res. Lett.*, **6**, 829-831.
- Wiesenberg D. A., J. M. Brooks and B. B. Bernard (1985). Biogenic hydrocarbon gases and sulfate reduction in the Orca Basin brine. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **49**, 2069-2080.