

Influence hydrothermale dans les sédiments de fosses de la mer Rouge par l'étude de quelques éléments traces

Marie-Claire PIERRET ^{a*}, Norbert CLAUER ^a, Gérard BLANC ^b

^a Centre de géochimie de la surface, école et observatoire des sciences de la terre, UMR-CNRS 7517, 1, rue Blessig, F-67084 Strasbourg cedex, France

^b Département de géologie et d'océanographie, UMR-CNRS 5805, avenue des Facultés, F-33405 Talence cedex, France

Reçu le 24 janvier 2000, reçu en forme révisée le 11^{er} juillet 2000, accepté le 12 juillet 2000

Abstract – Hydrothermal impact on sediments of Red-Sea deeps by the study of some trace metals. The Cu, Ni, Fe, Cr and Zr concentrations were evaluated to study the influence of hydrothermal activity on the sediments of six Red-Sea deeps. Comparison between the Ni/Fe and Cu/Fe ratios supports distinction between hydrothermal and non-hydrothermal sediments, whereas anti-correlation between Zr and Cr concentrations results from hydrothermal influence. The results allow us to envisage that the sediments of the Suakin Deep did not undergo a hydrothermal activity and that this hydrothermal influence was weak in the Valdivia Deep. The sediments of Port-Soudan Deep recorded a hydrothermal activity, whereas this activity was the strongest in the Thetis and Atlantis II deeps. © 2000 Ifremer/CNRS/IRD/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

sediment / Red sea / deeps / hydrothermalism / metals

Résumé – Les teneurs en Cu, Ni, Fe, Cr et Zr servent ici à évaluer l'influence d'une activité hydrothermale sur les sédiments de six fosses de la mer Rouge. Ainsi, l'enrichissement en fer (Fe) et en cuivre (Cu) des fluides hydrothermaux provenant du lessivage de la croûte océanique se retrouve dans les sédiments hydrothermaux alors que le nickel (Ni) est essentiellement apporté par l'eau de mer. La comparaison des rapports Ni/Fe et Cu/Fe représente donc un bon paramètre de discrimination entre les sédiments biodétritiques et ceux d'origine hydrothermale. Le chrome (Cr) et le zirconium (Zr) proviennent essentiellement du matériel détritique dans les sédiments marins normaux et sont corrélés, alors que l'absence de corrélation entre ces deux métaux est un indice d'une activité hydrothermale. Les résultats cumulés montrent que les sédiments de la fosse Suakin n'ont pas subi d'influence hydrothermale, et que celle-ci est très faible dans la fosse Valdivia. Les sédiments de la fosse Port-Soudan ont aussi enregistré les effets d'arrivées hydrothermales, mais l'activité hydrothermale est la plus importante et la plus nette dans la fosse Thétis et, surtout, dans celle d'Atlantis II. © 2000 Ifremer/CNRS/IRD/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

sédiment / mer Rouge / fosses / hydrothermalisme / métaux

1. INTRODUCTION

La mer Rouge est un océan étroit qui occupe le rift résultant de l'éloignement des plaques arabe et africaine. Elle offre la possibilité d'étudier la transition du rift continental vers un rift océanique. La

* Correspondance et tirés à part :

E-mail address: pierret@illite.u-strasbg.fr (M.-C. Pierret).

croûte océanique est continue seulement dans la partie méridionale de la vallée axiale (*figure 1*); au delà, elle devient discontinue et la partie centrale comprend une vingtaine de fosses, assimilées à des cellules d'océanisation (Bäcker et Schoell, 1972). Ces dépressions bathymétriques représentent une des grandes originalités de la mer Rouge et se caractérisent par la présence de saumures chaudes et/ou de sédiments métallifères. Les processus responsables de la formation de ces saumures et sédiments ont été essentiellement étudiés dans Atlantis II, la fosse la plus importante et la plus minéralisée, et sont associés à l'activité hydrothermale qui y règne (Anschutz et Blanc, 1993a,b, 1995a,b; Bäcker et Richter, 1973; Blanc et al., 1998; Degens et Ross, 1969; Pottorf et Barnes, 1983; Zierenberg et Schanks, 1986). L'exis-

tence des saumures est imputée au lessivage d'épais niveaux évaporitiques miocènes (principalement composés de halite et d'anhydrite) entraînant la formation de solutions salées plus denses que l'eau de mer et qui restent alors piégées dans ces fosses. Peu d'études ont été publiées sur des fosses autres que celles de la zone Atlantis II et peu de comparaisons ont été réalisées entre les différentes fosses.

En 1992, des sédiments et des saumures ont été échantillonnés pour la première fois dans plusieurs fosses de la partie médiane de la zone axiale de la mer Rouge au cours de la mission Redsed (fosses Suakin, Port-Soudan, Chain, Valdivia, Atlantis II et Thétis). Ce matériel permet d'étudier et de comparer plusieurs fosses, et ainsi de vérifier si l'influence hydrothermale est identique dans toutes les fosses de la mer Rouge et si les modèles de fonctionnement décrits pour la fosse Atlantis II sont applicables aux autres fosses. En fait, le taux de minéralisation varie d'une fosse à l'autre, ce qui implique de prendre en compte plusieurs processus de sédimentation dont les effets varient d'un site à l'autre (Pierret, 1998). Ainsi, à la sédimentation biodétritique habituelle de la mer Rouge se superpose une sédimentation chimique variable à partir des saumures. L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement de certains éléments, comme les métaux Fe, Ni, Cu et Cr et le Zr dans les différents contextes de sédimentation qu'offrent ces six fosses échantillonnées de la mer Rouge, d'en déduire l'impact des manifestations hydrothermales et de les comparer.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Des saumures et des sédiments ont été collectés dans plusieurs fosses de la partie médiane de la mer Rouge (Thétis, Valdivia, Atlantis II, Chain, Port-Soudan et Suakin), dans le cadre de la mission Redsed effectuée en 1992 à bord du *NO Marion Dufresne*. Les sept carottes échantillonnées et utilisées dans ce travail, sont localisées sur la *figure 1*. Un carottage supplémentaire a été réalisé à environ dix kilomètres à l'ouest de Suakin, dans la plaine qui surplombe la fosse Suakin (carotte 1016). Les sédiments de cette carotte hors fosse reflètent le fond biodétritique de la mer Rouge et sont considérés comme la référence non hydrothermale. Dans la présente étude, vingt et un échantillons de sédiments de la carotte 1016 ont été

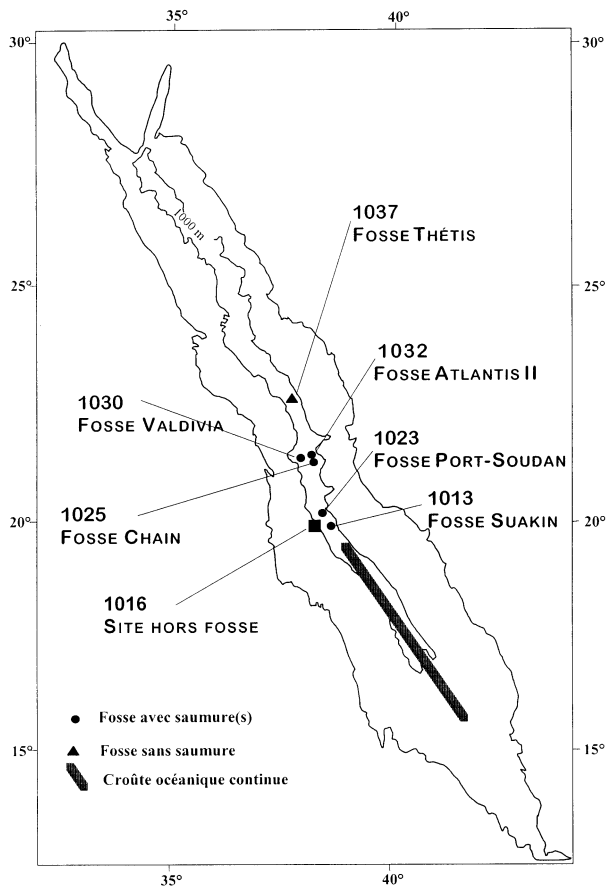


Figure 1. Carte de la mer Rouge avec localisation des différents sites échantillonnés et des carottes correspondantes.

Figure 1. Map of the Red Sea with location of the different sample sites and corresponding cores.

analysés (14,4 m de longueur, site hors fosse), huit de la carotte 1025 (2,8 m de longueur, fosse Chain), seize de la carotte 1030 (11,6 m de longueur, fosse Valdivia), vingt de la carotte 1037 (6,2 m de longueur, fosse Thétis), vingt-deux de la carotte 1013 (5,8 m de longueur, fosse Suakin), dix-neuf de la carotte 1023 (6,3 m de longueur, fosse Port-Soudan) et cinquante-trois de la carotte 1032 (23,3 m de longueur, fosse Atlantis II).

Ces sédiments ont fait l'objet d'une étude minéralogique et géochimique détaillée (Pierret, 1998). Cet article présente seulement les teneurs en Cu, Ni, Fe, Cr et Zr parce qu'ils représentent des discriminants potentiels de l'activité hydrothermale qui a pu exister dans le contexte des fosses étudiées.

Les échantillons ont été dessalés et séchés. Puis ces sédiments ont été broyés et leur composition minéralogique déterminée par diffraction des rayons X. Les concentrations en éléments majeurs, en éléments traces et en terres rares ont été acquises par fusion alcaline (Samuel et al., 1985). Le fer a été dosé par spectrométrie d'émission atomique à arc, Cu et Ni par ICP-AES, et les terres rares, Zr et Cr par ICP-MS. La précision des analyses, évaluée grâce à des mesures de standards internationaux de sédiments marins (MAG1, SD01 et SD02), est inférieure ou égale à 5% pour tous les éléments. La reproductibilité des mesures est de l'ordre de 2 à 5%. Les proportions relatives des minéraux ont été déterminées par compilation de deux méthodes : une basée sur l'intensité des pics rayons X et une qui conjugue les données minéralogiques et les concentrations chimiques. Ainsi, des profils lithostratigraphiques ont-ils été décrits pour chacune des fosses, permettant de différencier des unités lithologiques (Pierret, 1998 ; Pierret et al., 2000) (*tableau I*).

3. RÉSULTATS

Les teneurs en Fe, Ni, Cu, Cr et Zr sont variables d'un site à l'autre, avec des concentrations en Fe comprises entre 2,5% pour les sédiments biodétritiques normaux de la mer Rouge jusqu'à une moyenne de 50% dans l'unité U3 de la fosse Thétis. Les teneurs en Ni, Cu, Cr et Zr s'échelonnent entre respectivement 43, 22, 26 et 13×10^{-6} pour les valeurs les plus faibles et respectivement 273, 8165, 107 et

158×10^{-6} pour les plus élevées (*tableau I*). L'écart le plus important est observé pour le Cu avec un facteur de 378 entre les valeurs minimale et maximale, alors que celui-ci est compris entre 3 et 20 pour les autres éléments. La moyenne des vingt et un échantillons provenant du site hors fosse reflète le fond biodétritique normal de la mer Rouge sans apports hydrothermaux, avec des teneurs faibles en Fe, Ni et Cu et un rapport Ni/Fe élevé. Les sédiments hydrothermaux de la fosse Atlantis II se caractérisent par des teneurs en Fe et en Cu importantes associées à des teneurs en Zr faibles avec des rapports Cu/Fe élevées (entre 35 et 510) et Ni/Fe faibles (1,3 à 8,8). À l'opposée, les sédiments de la fosse Suakin ont les teneurs les plus faibles en Cu et les plus élevées en Ni et en Zr ce qui se traduit par des rapports Cu/Fe faibles (3,8 à 5) et Ni/Fe élevés (17 à 33, *tableau I*). Les autres sédiments ont des comportements intermédiaires (*figure 2*). La *figure 2a* illustre la différence entre le groupe des sédiments d'Atlantis II et les autres. Dans les fosses Thétis et Port-Soudan et dans l'unité U2 de Chain, des rapports Ni/Fe bas sont associés à des rapports Cu/Fe élevés, alors que les sédiments biodétritiques (carotte 1016) se caractérisent par un rapport Ni/Fe plus important que le rapport Cu/Fe (*figure 2a*). Dans le diagramme donnant la variation de [Zr] en fonction de [Cr], les sédiments des fosses Atlantis II et Thétis appartiennent à un domaine (espace grisé sur la *figure 3*) qui se différencie des autres points pour lesquels Zr et Cr sont mieux corrélés et où les teneurs en Zr sont plus importantes (*figure 3*).

4. DISCUSSION

4.1. Signification des teneurs

Lors de la circulation hydrothermale à travers la croûte océanique, les caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer se modifient. Les interactions eau/roche diffèrent suivant la profondeur, et lorsque la zone de réaction est atteinte les métaux tels que Fe, Cu, Zn et Pb sont lessivés (Alt, 1995 ; Chiba, 1995) enrichissant le fluide hydrothermale en ces éléments (Von Damm, 1995). Ainsi, les sédiments associés à l'hydrothermalisme océanique, c'est-à-dire ceux qui se forment à proximité des zones de décharges des

Tableau 1. Répartition minéralogique globale dans les différentes unités des sept carottes échantillonnées dans six fosses et un site hors fosse de la mer Rouge.
Table 1. Mineralogical distribution in the different units of the seven cores sampling in six deeps and in the 'out-deep' site from the Red Sea.

Site/N° de la carotte	Unité	Ca-Mg carbonates	Fe-Mn carbonates	Silicates	Fe-Mn Oxydes	Fe, Zn, Cu Sulfures	Ca Sulfates	Eu/Eu*	Ni/Fe	Cu/Fe	[Fe] %	[Ni] ppm	[Cu] ppm	[Cr] ppm	[Zr] ppm
Hors fosse/1016 Suakin/1013	U1	65	—	30	5	—	—	1,3	21,9	11,8	2,5	54,8	29,5	57,2	95,3
	U2	55	2	37	6	—	—	1,6	28,4	4,5	4,8	136,3	21,6	78,3	97,3
	U3a	47	1	28	24	—	—	1,3	17,1	3,8	16	273,6	60,8	61,7	92,3
	U3b	35	7	48	10	—	—	1,4	33,1	4,9	6,5	215	31,9	98	158
Port-Soudan/1023	U1	62	8	26	4	17	—	1,4	19	5	11	209	55	63,7	92,8
	U2	30	14	47	6	—	—	1,6	12,3	17,8	5,6	68,9	99,7	43,8	60,1
	U3	50	4	40	6	—	—	1,6	7,9	24,2	10	79	242	68,9	100
Valdivia/1030 Cham/1025	U1	60	—	35	5	0-1	—	1,4	18	16,3	4	72	65,2	57,2	73,2
	U2	55	2	30	6	—	—	1,3	20,1	8,6	3,4	68,3	29,2	65,6	89,3
Atlantis II/1032	U3	39	—	46	9	6	—	2,4	2,3	10,9	18,8	43,2	204,9	35	46
	U4	80	—	13	7	—	—	1,3	17,1	14,9	6,4	109,4	95,4	107	158
	U0	—	—	40	40	15	—	1,2	24,1	23,2	2,6	62,7	60,3	35	37,8
	U1	2	28	—	60	11	—	1,9	4,4	34,9	23,4	103	816,7	88,5	95
Thétis/1037	U2	—	12	7	10	—	—	6,1	1,7	61,4	36	61,2	2,210,4	32,2	21,7
	U3	—	13	12	85	—	—	8,8	510,3	16	140,8	8	164,8	26	19,1
	U4	—	3	30	15	8	—	8,4	1,3	58,8	45	58,5	2,646	30,6	13,1
	U1/U2(*)	40	—	10	50	—	—	4,9	2,2	234,8	24	52,8	5,635,2	40,2	16,9
U3	—	—	0-15	85-100	—	—	—	1,3	5,3	19,5	16,5	87,5	321,8	41,6	51,9
								4,7	1,2	21,7	50	60	1,085	54,3	34,6

(*) La différence entre les unités U1 et U2 vient de la nature des oxydes (hématite et goéthite) et des carbonates (calcite et Ca-kutnahorite). Données moyennes de l'anomalie en Eu normalisée par rapport au PAAS, des rapports Ni/Fe et Cu/Fe (Ni et Cu en $\times 10^{-6}$, Fe en pourcentage), ainsi que des concentrations en Cr et Zr ($\times 10^{-6}$).

(*) The difference between the units U1 and U2 comes from the mineralogy of the oxides (hematite and goethite). Average data of Eu anomaly (PAAS normalised), Ni/Fe and Cu/Fe ratios (Ni and Cu in 10^{-6} , and Fe in percent), and Cr and Zr concentrations ($\times 10^{-6}$).

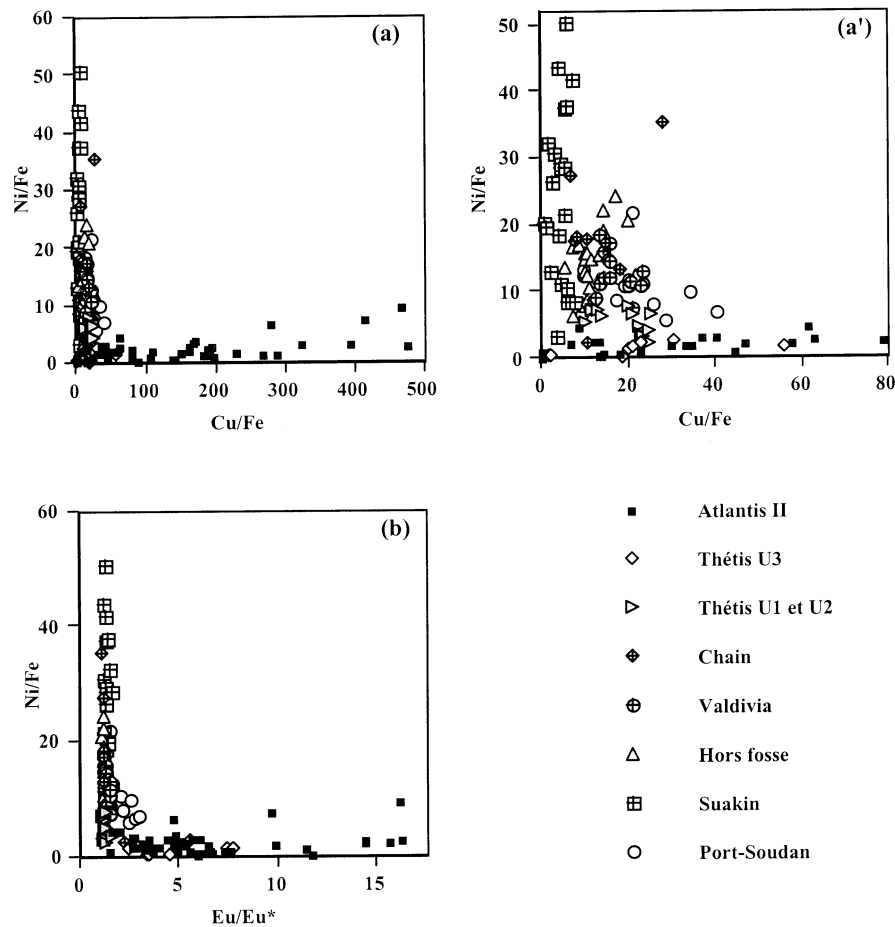


Figure 2. Étude des rapports Cu/Fe et Ni/Fe. Les rapports sont donnés pour Fe en pourcentage et Cu et Ni en $\times 10^{-6}$ (a) Variations du rapport Ni/Fe en fonction du rapport Cu/Fe, (a') même figure que la précédente mais avec dilatation de l'échelle et (b) variation du rapport Ni/Fe en fonction de l'anomalie en Eu (normalisation par rapport au PAAS).

Figure 2. Study of the Cu/Fe and Ni/Fe ratios, Fe in percent and Cu and Ni $\times 10^{-6}$. (a) Ni/Fe ratio versus Cu/Fe ratio, (a') same figure as precedent with an extending scale, and (b) Ni/Fe ratios versus Eu anomaly (PAAS normalised).

fluides hydrothermaux, sont nettement enrichis en Cu, Fe, Zn et Pb par rapport aux sédiments marins normaux. Les teneurs en Cu y sont comprises entre 1 et 15 %, alors que les teneurs en Ni sont entre 2 et 50×10^{-6} (Fouquet et al., 1991 ; Hannington et al., 1991, 1995 ; Haymond et Kastner, 1981 ; Hekinian et Fouquet, 1985 ; Marchig et al., 1982 ; Metz et al., 1988 ; Turner et al., 1993). En revanche, les teneurs en Ni sont environ trois fois plus importantes qu'en Cu dans l'eau de mer (Bruland et Franks, 1983) ; les organismes marins, ainsi que le matériel détritique comme les argiles, sont généralement plus riches en Ni qu'en Cu (Calvert et Pedersen, 1993 ; Collier et Edmond, 1983). Ainsi, Ni est plus concentré que Cu

dans les sédiments marins et, en particulier, dans des conditions anoxiques. Ces éléments sont incorporés aux sédiments par adsorption, ou sous forme de sulfures dans des conditions anoxiques (Calvert et Pedersen, 1993). En contexte hydrothermal, Cu, Zn, Pb et Fe incorporés dans le sédiment précipitent depuis le fluide hydrothermal, alors que la teneur en Ni est principalement contrôlée par l'eau de mer (Hekinian et al., 1993 ; Metz et al., 1988), ce qui explique les faibles teneurs en Ni dans les dépôts hydrothermaux. Plus encore que les teneurs, les rapports de concentrations peuvent être discriminants. Les sédiments marins moyens ont des rapports Ni/Fe et Cu/Fe de respectivement 12,7 et 7,3 [calculés

d'après les valeurs moyennes de (Metz et al., 1988)]. Les dépôts hydrothermaux (sulfures massifs, fumeurs noirs et blancs) et les sédiments hydrothermaux ont des rapports Ni/Fe qui oscillent entre 0,2 et 2,5 et entre 0,4 et 1, et des rapports Cu/Fe entre 150 et 7000, et entre 400 et 800 (Fouquet et al., 1991; Hannington et al., 1991, 1995; Haymond et Kastner, 1981; Hekinian et Fouquet, 1985; Marchig et al., 1982; Metz et al., 1988; Turner et al., 1993).

Comme il existe des sédiments métallifères à la fois diagénétiques et hydrothermaux, il a été proposé de différencier ces deux types à partir des valeurs en Cr et en Zr (Marchig et al., 1982). L'origine du Cr des sédiments non hydrothermaux se trouve dans le matériel continental; il est alors corrélé avec d'autres éléments traceurs du détritique tels que Th, Al et Zr. Le Cr et le Zr sont, par contre, liés différemment dans les fluides hydrothermaux où Cr est plus enrichi que Zr (Turner et al., 1993). Les teneurs de ces deux éléments sont plus faibles dans les sédiments métallifères ayant une origine hydrothermale que dans des sédiments marins et ne sont pas corrélés (Blanc, 1994; Hekinian et al., 1993; Hekinian et Fouquet, 1985; Metz et al., 1988). En effet, les apports détritiques dans les sédiments se trouvent dilués en contexte hydrothermal par les minéraux précipitant du fluide hydrothermal et la corrélation Cr/Zr liée au

détritique disparaît. Ainsi, une corrélation positive entre Cr et Zr reflète l'héritage sédimentaire détritique, et l'absence de relation entre Cr et Zr, associé à des teneurs en Cr et surtout en Zr plus faibles que dans les sédiments marins moyens, est un indicateur d'une origine hydrothermale.

4.2. L'origine des sédiments des fosses

Les sédiments du site hors fosse représentent la signature biodétritique de la mer Rouge et se caractérisent par des rapports Ni/Fe compris entre 6,2 et 24, toujours supérieurs aux rapports Cu/Fe compris entre 5,7 et 17,2 typiques de sédiments non hydrothermaux et par une corrélation entre Cr et Zr de 0,8 ce qui est en accord avec la valeur proposée pour les sédiments marins non hydrothermaux (Marchig et al., 1982). Les dépôts et les sédiments hydrothermaux des dorsales océaniques sont très nettement enrichis en Fe, Cu, Zn, Cd, Mn, V et Pb par rapport aux sédiments marins normaux. En revanche, ils ont des teneurs plus faibles en Ni, en Cr, en Y et en Zr (Fouquet et al., 1991; Hannington et al., 1991, 1995; Haymond et Kastner, 1981; Hekinian et Fouquet, 1985; Marchig et al., 1982; Metz et al., 1988; Turner et al., 1993). Les sédiments des fosses Atlantis II et Thétis se caractérisent par des teneurs élevées en certains métaux (Fe, Mn, Cu et Zn) et des concentrations en Cr et en Zr plus faibles que les sédiments biodétritiques (*tableau 1; figure 3; (Pierret, 1998)* révélant leur nature hydrothermale.

Les sédiments de la fosse Atlantis II présentent les rapports Cu/Fe (*figure 2a*), de l'ordre de ceux des sédiments hydrothermaux des rides océaniques plus matures, conjugués à des rapports Ni/Fe les plus bas. L'activité hydrothermale importante dans la fosse Atlantis II est donc bien caractérisée par de forts rapports Cu/Fe alliés à de faibles rapports Ni/Fe. L'échelle de cette première figure a été réduite dans le diagramme 2a' afin de distinguer plus aisément le comportement des autres sédiments. Les échantillons des unités U1, U2 et U3 de la fosse Thétis, ainsi que ceux de la fosse Port-Soudan ont des rapports Cu/Fe qui suggèrent une nature hydrothermale des sédiments, même si celle-ci est moindre que dans la fosse Atlantis II. Les sédiments de la fosse Chain sont dispersés car ils ont une large gamme de rapports Ni/Fe (*figure 2a'*). Les rapports Ni/Fe sont supérieurs

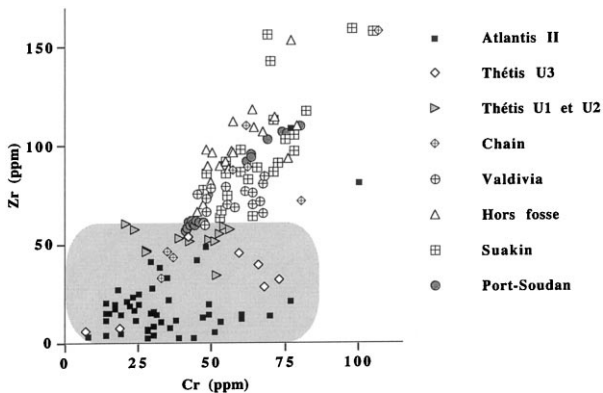


Figure 3. Variations de la teneur en Zr ($\times 10^{-6}$) en fonction de la teneur en Cr ($\times 10^{-6}$) dans les sédiments des fosses Atlantis II, Thétis, Chain, Valdivia, Suakin, Port-Soudan et dans le site hors fosse. La zone grisée représente le domaine des sédiments hydrothermaux.

Figure 3. Zr contents ($\times 10^{-6}$) versus Cr contents ($\times 10^{-6}$) in the sediments of Atlantis II, Thetis, Chain, Valdivia, Suakin and Port-Soudan deeps and in the 'out-deep' site. The grey field represent the area of hydrothermal sediments.

à ceux des rapports Cu/Fe sauf dans l'échantillon de U3 où les rapports Cu/Fe et Ni/Fe sont respectivement 11 et 2,3. Or cette unité est la seule à avoir une nature hydrothermale, démontrée notamment par l'anomalie en Eu (Eu/Eu* normalisée par rapport au PAAS = 2,36 ; Pierret, 1998 ; Pierret et al., 1998). En effet, les sédiments d'origine hydrothermale sont caractérisés par des anomalies positives en Eu due à la chimie des fluides hydrothermaux (Courtois et Treuil, 1977 ; German et al., 1997 ; Marchig et al., 1982 ; Michard et al., 1983 ; Mills et Elderfield, 1995). La *figure 2b* représente l'évolution des rapports Ni/Fe en fonction de l'anomalie en Eu. Elle montre que les sédiments des fosses Atlantis II, Port-Soudan, Thétis et ceux de l'unité U2 de la fosse Chain sont caractérisés par les plus faibles rapports Ni/Fe associés aux anomalies en Eu les plus importantes (*tableau 1*), reflétant ainsi une influence hydrothermale. D'autre part les échantillons des fosses Atlantis II et Thétis, ainsi que ceux de l'unité U2 de la fosse Chain, se démarquent clairement des autres (zone grisée sur la *figure 3*) et révèlent leur nature hydrothermale par de faibles teneurs en Zr et la non corrélation entre Cr et Zr. En effet, la forte sédimentation chimique liée dans ces fosses à l'arrivée de fluides minéralisés, dilue les apports détritiques. Par exemple, le taux de sédimentation est évalué à 200 cm 1000⁻¹ ans dans le bassin occidental de la fosse Atlantis II (Bäcker et Schoell, 1972), alors qu'il n'est que de 3 à 4 cm 1000⁻¹ ans ailleurs en mer Rouge (Rohling et al., 1998). La part de la sédimentation chimique sur la sédimentation biodétritique est très importante dans ce cas et les teneurs en Zr marqueur du détritique deviennent alors faibles dans les sédiments et ne sont plus corrélées au Cr apporté par les fluides hydrothermaux.

La nature hydrothermale des sédiments de la fosse Port-Soudan, en particulier de ceux des unités U2 et U3, a été clairement mis en évidence par les anomalies en Eu (*figure 2b*) et les rapports Cu/Fe et Ni/Fe. Pourtant, la corrélation Cr/Zr est excellente (0,99) dans les sédiments de cette fosse et les teneurs sont proches de celles des sédiments biodétritiques. Cette corrélation implique que le Cr et le Zr ont la même source ; ceci est envisageable si l'on suppose que le fluide hydrothermal qui s'épanche dans la fosse Port-Soudan contient peu de Cr et de Zr, et que ces éléments sont essentiellement apportés par du matériel détritique. Il a, en effet, été montré que la fosse Port-Soudan est alimentée par un fluide hydrother-

mal qui a réagi avec le basalte à des températures n'excédant pas 150 °C (Pierret, 1998), donc à de faibles profondeurs. Il semble alors que l'eau de mer n'a probablement pas atteint la zone de réaction où les métaux de la croûte sont lessivés (Alt, 1995). Le fluide résultant est alors vraisemblablement moins riche en métaux (et donc en Cr) que les fluides qui se sont déchargés dans la fosse Atlantis II. La bonne corrélation entre Zr et Cr dans les sédiments de la fosse Port-Soudan est due aux faibles teneurs en Cr du fluide hydrothermal qui a alimenté la dépression et qui provient du matériel détritique. En effet, les sédiments des unités U2 et U3 de la fosse Port-Soudan contiennent 40 à 50 % de silicates (argiles, quartz, plagioclases, *tableau 1*; Pierret, 1998) et moins de carbonates que les sédiments normaux, probablement en partie dissous par la saumure acide. La fraction détritique étant plus importante, la corrélation est meilleure que pour les sédiments hors fosse.

Les points correspondants aux sédiments de la fosse Valdivia ont une position intermédiaire (*figure 2a'*) et sont situés entre ceux de la carotte hors fosse (1016) et les sédiments hydrothermaux, avec des rapports Cu/Fe (11 à 23) supérieurs aux rapports Ni/Fe (7,2 à 18,3). Ainsi, bien que la minéralogie des sédiments de Valdivia soit proche de celle des sédiments biodétritiques de la mer Rouge, l'étude des rapports Ni/Fe et Cu/Fe laisse supposer une légère influence hydrothermale. Les analyses des boues de cette carotte sont peu dispersées sur le diagramme Zr–Cr (*figure 3*), sans corrélation nette entre Cr et Zr ($R^2 = 0,25$) et avec des teneurs en Zr systématiquement inférieures à celles trouvées dans le sédiment de la carotte hors fosse pour des valeurs semblables en Cr. Ce comportement pourrait être un indice en faveur d'une influence hydrothermale enregistrée dans les sédiments de la fosse Valdivia, mais celle-ci serait bien plus faible que pour les fosses Atlantis II et Thétis.

Les sédiments de la fosse Suakin ont un comportement singulier ; ils se caractérisent par les rapports Cu/Fe les plus faibles (0,8 à 6,9) et les rapports Ni/Fe les plus élevés (8 à 130 ; *figure 2a'*) et ont un comportement opposé à ceux de la fosse Atlantis II. Ces observations confirment l'improbabilité d'une origine hydrothermale pour ces sédiments (Pierret et al., 2000), ce qui est conforté par les variations du rapport Ni/Fe en fonction de l'anomalie en Eu (*figure 2b*). La corrélation Cr/Zr est de 0,8 pour les sédi-

ments de la fosse Suakin confirmant l'hypothèse d'une nature diagénétique sans apport hydrothermal (Pierret et al., 2000). Cependant, il reste à expliquer pourquoi les sédiments de la fosse Suakin, et dans une moindre mesure ceux de la fosse Chain, peuvent avoir des rapports Ni/Fe si élevés, atteignant respectivement 130 et 35,2. Les sédiments marins classiques ont, en moyenne, des rapports Ni/Fe plus faibles de l'ordre de 13 (Metz et al., 1988) et ceux de la carotte hors fosse (1016) représentant le fond biodétritique en mer Rouge, oscillent entre 6,2 et 24. Deux possibilités peuvent être envisagées pour expliquer les valeurs dans les sédiments de Suakin et Chain : (1) un processus a enrichi la phase solide en Ni (précipitation minérale, diagenèse), ou (2) une source externe a fourni plus de Ni que de Cu. Cette seconde hypothèse semble la plus vraisemblable, car la source externe peut être constituée par les débris volcaniques observés dans ces fosses (Pierret, 1998 ; Pierret et al., 2000). Des basaltes et des produits volcaniques ont été analysés en mer Rouge (Altherr et al., 1988 ; Coleman et McGuire, 1988), et les rapports Ni/Fe de ces composés sont élevés et varient de 4 à 80, alors que les rapports Cu/Fe compris entre 6 et 15, sont de l'ordre de ceux des sédiments marins normaux. Ainsi, les verres qui se déposent dans les fosses, peuvent avoir été altérés, ce qui a pu libérer du Ni supplémentaire et donc entraîner une augmentation des rapports Ni/Fe. Du matériel éruptif a également été identifié dans les sédiments normaux de la mer Rouge (Boger et Faure, 1976 ; Boger et al., 1980), dont la carotte hors fosse 1016 (Pierret, 1998). Ceci pourrait expliquer pourquoi les rapports Ni/Fe sont parfois plus élevés dans les sédiments biodétritiques de la mer Rouge que dans les sédiments marins habituels. Peu d'éléments permettent de discuter ici de la première hypothèse, qui reste une possibilité.

De même certains échantillons ont des teneurs importantes en Cr et en Zr (unité U3 de la fosse Chain et quelques sédiments des carottes 1013 et 1016, *figure 3*), toujours associées à de fortes teneurs en silicates et se trouvent dans les carottes qui contiennent des fragments de matériel éruptif. Or les basaltes et les verres peuvent être particulièrement riches en Cr (jusqu'à 1000×10^{-6}) et en Zr (jusqu'à 400×10^{-6}) (Altherr et al., 1988 ; Coleman et McGuire, 1988). La présence de tel matériel peut donc enrichir les sédiments en Cr et Zr. Par exemple, l'unité U0 de la carotte 1032 de la fosse Atlantis II est formée de

basalte altéré, et elle est la plus riche en Si (13 à 14 %), Cr ($80 \text{ à } 100 \times 10^{-6}$), Zr ($80 \text{ à } 110 \times 10^{-6}$) et en silicates (argiles, plagioclases, feldspath potassique et pyroxène) de toute la carotte (*tableau I*). Ainsi, le lien entre Cr, Zr et Si peut provenir d'une abondance de matériel détritique comme de matériel volcanique. La présence de débris éruptifs dans les carottes 1013 (fosse Suakin), 1016 (site hors fosse) et 1025 (fosse Chain) semble entraîner des enrichissements en certains éléments traces tels que Ni, Cr et Zr.

5. CONCLUSION

La nature hydrothermale des sédiments des fosses Atlantis II et Thétis est confirmée par de faibles rapports Ni/Fe conjuguées à des rapports Cu/Fe élevés, par de faibles teneurs en Zr et par l'absence de corrélation entre Cr et Zr. Les sédiments de la fosse Port-Soudan, caractérisés par des rapports Ni/Fe inférieurs et des anomalies positives en Eu supérieures à ceux des sédiments biodétritiques du site hors fosse, révèlent eux-aussi une nature hydrothermale. Cependant, celle-ci ne se traduit pas par une absence de corrélation entre Cr et Zr, ceci peut s'expliquer par la nature du fluide hydrothermal ayant alimenté la fosse Port-Soudan et qui n'aurait pas circulé aussi profondément que dans les deux cas précédents (Thétis et Atlantis II). La fosse Suakin se caractérise par les plus faibles rapports Cu/Fe et les plus forts rapports Ni/Fe, ainsi que par une corrélation positive entre Cr et Zr. Ces résultats reflètent une absence d'activité hydrothermale dans cette fosse. Les sédiments de l'unité U3 de la carotte Chain présentent un faible rapport Ni/Fe confirmant la nature hydrothermale de cette unité. Les rapports Cu/Fe et Ni/Fe et les teneurs en Zr et Cr des sédiments dans la fosse Valdivia suggèrent une faible participation de matériel d'origine hydrothermal.

Cette étude a donc mis en évidence une origine hydrothermale pour les sédiments des fosses Atlantis II, Thétis et de l'unité U3 de Chain. Les sédiments de la fosse Port-Soudan ont également enregistré une influence hydrothermale, mais celle-ci est moins importante que dans ceux des fosses Atlantis II et Thétis. Des débris éruptifs ont été observés dans les sédiments des carottes 1013, 1016 et 1025 et leurs présences pourraient expliquer les forts rapports Ni/Fe et les fortes concentrations en Zr et Cr enregistrés dans ces trois cas.

Ainsi, les six fosses étudiées contiennent des sédiments de nature différente qui ont enregistré une signature hydrothermale variable d'un site à l'autre, sans véritable tendance géographique. En effet, l'activité la plus intense semble se situer au niveau de la fosse Atlantis II, alors que la fosse méridionale Suakin qui est la plus proche de la croûte océanique continue, contient des sédiments sans influence hydrothermale.

Remerciements

Nous remercions le capitaine et l'équipage du NO *Marion Dufresne* ainsi que Robert Rouault et Jean Samuel du Centre de géochimie de la surface (CNRS-ULP) pour leur aide technique.

RÉFÉRENCES

- Alt, J.C., 1995. Seafloor processes in Mid-Ocean Ridge hydrothermal systems. In: Seafloor hydrothermal systems: physical, chemical, biological and geological interactions, Geophysical Monograph by the American Geophysical Union, pp. 85–114.
- Altherr, R., Henjes-Kunst, F., Puchelt, H., Baumann, A., 1988. Volcanic activity in the Red Sea axial trough—evidence for a large mantle diapir? *Tectonophysics* 150, 121–133.
- Anschutz, P., Blanc, G., 1993a. L'histoire sédimentologique de la fosse Atlantis II (mer Rouge). Les apports de la micropaléontologie. *C.R. Acad. Sci. Paris série II* 317, 1303–1308.
- Anschutz, P., Blanc, G., 1993b. Le rapport NaCl/eau des boues minéralisée de la fosse Atlantis II (mer Rouge). calcul de la teneur en halite des sédiments et implication sur la paléotempérature du milieu. *C.R. Acad. Sci. Paris série II* 317, 1595–1600.
- Anschutz, P., Blanc, G., 1995a. Chemical mass balances in metaliferous deposits from the Atlantis II Deep, Red Sea. *Geochim. Cosmochim. Acta* 59, 4205–4218.
- Anschutz, P., Blanc, G., 1995b. Diagenetic evolution of the DOP facies from the Atlantis II Deep (Red Sea): Evidence of early hydrothermal activity. *Oceanol. Acta* 18, 105–112.
- Bäcker, H., Schoell, M., 1972. New deeps with brines and metalliferous sediments in the Red Sea. *Nature Phys. Sci.* 240, 153–158.
- Bäcker, H., Richter, H., 1973. Die rezente hydrothermal-sedimentäre Lagestätte Atlantis II Tief im Roten Meer. *Geol. Rundsch.* 62, 697–741.
- Blanc, G., Anschutz, P., Pierret, M.C., 1998. Metalliferous sedimentation in the Atlantis II Deep: a geochemical insight. In: Purcer B.H., Bosence D.W.J. (Eds.), *Sedimentation and Tectonics of Rift Basins: Red Sea-Gulf of Aden*. Chapman & Hall, London, pp. 510–524.
- Blanc, G., 1994. Geochemical studies on selected sediment samples from the Lau Backarc Basin: evidence for hydrothermal ponded sediments. *Proc. Ocean Drilling Program* 135, 689–707.
- Boger, P.D., Faure, G., 1976. Systematic variations of silicic and volcanic detritus in piston cores from the Red Sea. *Geochim. Cosmochim. Acta* 40, 731–742.
- Boger, P.D., Boger, J.L., Faure, G., 1980. Systematic variation of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios, Sr compositions, selected major-oxide concentrations, and mineral abundance in piston cores from the Red Sea. *Chem. Geol.* 29, 13–38.
- Bruland, K.W., Franks, R.P., 1983. Mn, Ni, Cu, Zn and Cd in the Western North Atlantic. In: Wong, C.S., Boyle, E., Bruland, K.W., Burton, J.D., Goldberg, E.D. (Eds.), *Trace Metals in Sea Water*. Plenum Press, New York.
- Calvert, S.E., Pedersen, T.F., 1993. Geochemistry of recent oxic and anoxic marine sediments: Implications for the geological record. *Mar. Geol.* 113, 67–88.
- Chiba, H., 1995. Chemical modeling of seawater-rock interaction: Effect of rock-type on the fluid chemistry and mineral assemblage. In: Sakai, H., Nozaki, Y. (Eds.), *Biogeochemical Processes and Ocean Flux in the Western Pacific*. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, pp. 469–486.
- Courtois, C., Treuil, M., 1977. Distribution des terres rares et de quelques éléments traces dans les sédiments récents des fosses de la mer Rouge. *Chem. Geol.* 20, 57–72.
- Coleman, R.G., McGuire, A.V., 1988. Magma systems related to the Red Sea opening. *Technonophysics* 150, 77–100.
- Collier, R.W., Edmond, J.M., 1983. Plankton composition and trace metal fluxes from the surface ocean. In: *Trace Metals in Seawater*, NATO Conf. Ser 4, Vol. 9, Plenum, New York, pp. 789–890.
- Degens, E.T., Ross, D.A., 1969. Hot brines and recent heavy metal deposits in the Red Sea. Springer Verlag, New York.
- Fouquet, Y., Von Stackelberg, U., Charlou, J.L., Donval, J.P., Erzinger, J., Foucher, J.P., Herzig, P., Mühe, R., Soakai, S., Wiedicke, M., Whitechurch, H., 1991. Hydrothermal activity and metallogenesis in the Lau back-arc basin. *Nature* 349, 778–781.
- German, C.R., Bourlés, D.L., Brown, E.T., Hargt, J., Colley, S., Higgs, N.C., Ludford, E.M., Nelsen, T.A., Feely, R.A., Raibeck, G., Yiou, F., 1997. Hydrothermal scavenging on the Juan de Fuca Ridge: ^{230}Th s, ^{10}Be and REEs in ridge-flanks sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta* 61, 4067–4078.
- Hannington, M.D., Herzig, P.M., Scott, S.D., Thompson, G., Rona, R.A., 1991. Comparative mineralogy and geochemistry of gold-bearing sulfide deposits on the mid-ocean ridges. *Mar. Geol.* 101, 217–248.
- Hannington, M.D., Jonasson, I.R., Herzig, P.M., Petersen, S., 1995. Physical and chemical processes of seafloor mineralization at Mid-Ocean Ridges. In: *Seafloor Hydrothermal Systems; Physical, Chemical, Biological and Geological Interactions*. Geophysical Monograph 91. American Geophysical Union, pp. 115–157.

- Haymond, R.M., Kastner, M., 1981. Hot spring deposits on the East Pacific Rise at 21° N: preliminary description of mineralogy and genesis. *Earth Planet. Sci. Lett.* 53, 363–381.
- Hekinian, R., Hoffert, M., Larqué, P., Cheminée, J.L., Stoffers, P., Bideau, D., 1993. Hydrothermal Fe and Si oxyhydroxide deposits from south Pacific intraplate volcanoes and East Pacific Rise axial and off-axial regions. *Econ. Geol.* 88, 2099–2121.
- Hekinian, R., Fouquet, Y., 1985. Volcanism and metallogenesis of axis and off-axial structures on the East Pacific Rise near 13° N. *Econ. Geol.* 80, 221–249.
- Marchig, V., Gundlach, H., Möller, P., Schley, F., 1982. Some geochemical indicators for discrimination between diagenetic and hydrothermal metalliferous sediments. *Mar. Geol.* 50, 241–256.
- Metz, S., Trefry, J.H., Nelsen, T.E., 1988. History and geochemistry of a metalliferous sediment core from the Mid-Atlantic Ridge at 26° N. *Geochim. Cosmochim. Acta* 52, 2369–2378.
- Michard, A., Albarède, F., Michard, G., Minster, J.F., Charlou, J.L., 1983. Rare-earth elements and uranium in high-temperature solutions from East Pacific Rise hydrothermal vent field (13° N). *Nature* 303, 795–797.
- Mills, R., Elderfield, H., 1995. Rare earth element geochemistry of hydrothermal deposits from the active TAG Mound, 26° N Mid-Atlantic Ridge. *Geochim. Cosmochim. Acta* 59, 3511–3524.
- Pierret, M.C., 1998. Les saumures et les sédiments de sept fosses de l'axe de la mer Rouge (19–23° N). Etude minéralogique, géochimique et isotopique. Rôle de l'hydrothermalisme. Thèse, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 352 p. (en dépôt à la soc. géol. France).
- Pierret, M.C., Blanc, G., Bosch, D., 1998. Sr, Pb isotopes and REE analyses of five cores of Red Sea. An insight into hydrothermal input, 8th Goldsmith Conference. *Miner. Mag.* 62, 1176–1177.
- Pierret, M.C., Blanc, G., Clauer, N., 2000. Sur l'origine de la pyrite framboïdale dans les sédiments de la fosse Suakin (mer Rouge). *C.R. Acad. Sci.* 330, 1–8.
- Pottorf, R.J., Barnes, H.L., 1983. Mineralogy, geochemistry, and ore genesis of hydrothermal sediments from the Atlantis II Deep, Red Sea. *Econ. Geol. Monogr.* 5, 198–223.
- Rohling, E.J., Fenton, M., Jorissen, F.J., Bertrand, P., Ganssen, G., Caulet, J.P., 1998. Magnitudes of sea-level lowstands of the past 500,000 years. *Nature* 394, 162–165.
- Samuel, J., Rouault, R., Bensus, Y., 1985. Analyse multiélémentaire standardisée des matériaux géologiques en spectrométrie d'émission par plasma à couplage inductif. *Analisis* 13, 312–317.
- Turner, R.J.X., Ames, D.E., Franklin, J.M., Goodfellow, W.D., Leitch, C.H.B., Höy, T., 1993. Character of active hydrothermal mounds and nearby altered hemipelagic sediments in the hydrothermal areas of middle valley, northern Juan de Fuca Ridge: data on shallow cores. *Can. Mineralog.* 31, 973–995.
- Von Damm, K.L., 1995. Controls on the chemistry and temporal variability of seafloor hydrothermal fluids. In: Humphris, S.E., Zierenberg, R.A., Mullineaux, L.S., Thomson, R.E (Eds.), *Seafloor Hydrothermal Systems: Physical, Chemical, Biological, and Geological interactions*. American Geophysical Union. *Geophysical Monograph* 91, pp. 222–247.
- Zierenberg, R.A., Schanks, W.C. III, 1986. Isotopic constraints on the origin of the Atlantis II, Suakin and Valdivia brines, Red Sea. *Geochim. Cosmochim. Acta* 50, 2205–2214.