

# Répartitions horizontale et verticale du cuivre, du manganèse et du cadmium dans le secteur indien de l'Océan Antarctique

Écosystème oligotrophe  
Métaux traces  
Cuivre, manganèse, cadmium  
Résine Chélex

Oligotrophic system  
Trace metals  
Copper, manganese, cadmium  
Chelex resin

Guy BORDIN, Pierre APPRIOU, Paul TREGUER  
Laboratoire de Chimie des Écosystèmes Marins, JE CNRS 91 46 92,  
Institut d'Études Marines, Université de Bretagne Occidentale, 6, avenue Le Gorgeu,  
29287 Brest Cedex, France.

Reçu le 30/10/86, révisé le 7/7/87, accepté le 4/8/87.

## RÉSUMÉ

Pendant la campagne Antiproduct 3 qui s'est déroulée au cours de l'été austral 1984 dans le secteur indien de l'Océan Antarctique, nous avons étudié les profils verticaux et les répartitions horizontales de trois métaux : le cuivre, le manganèse et le cadmium. Les profils verticaux de ces éléments peuvent être, selon le schéma classique, comparés à ceux de sels nutritifs; celui du cadmium est ainsi voisin des nitrates, tandis que celui du cuivre est à rapprocher des silicates. Les coupes font clairement apparaître les mouvements des masses d'eaux et en particulier, la remontée de l'eau circumpolaire profonde. En ce qui concerne les répartitions horizontales, on relève les teneurs les plus élevées au voisinage des îles situées au nord du secteur étudié, ainsi que dans une zone qui correspond à la fonte de la glace de mer.

*Oceanol. Acta*, 1987, 10, 4, 411-420.

## ABSTRACT

Vertical and horizontal distributions of copper, manganese and cadmium in the Indian sector of the Antarctic Ocean

We have studied the vertical and horizontal distributions of copper, manganese and cadmium during the Antiproduct III cruise which took place during the 1984 southern-hemisphere summer in the Indian sector of the Antarctic Ocean. The profiles of these three metals are comparable with nutrient profiles (relationship between cadmium and nitrate or copper and silicate) and they clearly show the upwelling of deep circumpolar water. The horizontal distributions in the surface waters show the highest concentrations in the vicinity of islands, in the northern part of the studied zone, and in a sector corresponding to melting sea ice.

*Oceanol. Acta*, 1987, 10, 4, 411-420.

## INTRODUCTION

Au cours de la dernière décennie, des progrès importants ont été réalisés dans la résolution des problèmes associés au prélèvement, au stockage et à l'analyse des métaux traces dans le milieu océanique. Ceci a naturellement induit une augmentation rapide des données réalistes relatives à ces composés. Cependant, si les distributions métalliques dans les Océans Pacifique, Atlantique, voire Arctique, sont bien établies, l'Océan Austral reste sur ce plan beaucoup moins bien étudié, si l'on excepte le cuivre avec les travaux de Boyle et Edmond (1975) et de Monteiro et Orren (1985).

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude des répartitions verticale et horizontale du cuivre, du manganèse et du cadmium en tentant d'atteindre des objectifs aussi différents que la simple accumulation de données dans un écosystème peu connu, l'identification des processus principaux qui gouvernent leur comportement biogéochimique ou l'utilisation de ces éléments comme traceurs de masses d'eaux. En ce qui concerne ces dernières, nous en rappelons brièvement les mouvements définis par Sverdrup *et al.* (1942), en nous référant à la figure 1 d'après Gordon et Taylor (1975). En remontant du Sud au Nord et du fond vers la surface, trois grands ensembles d'eaux peuvent être observés :

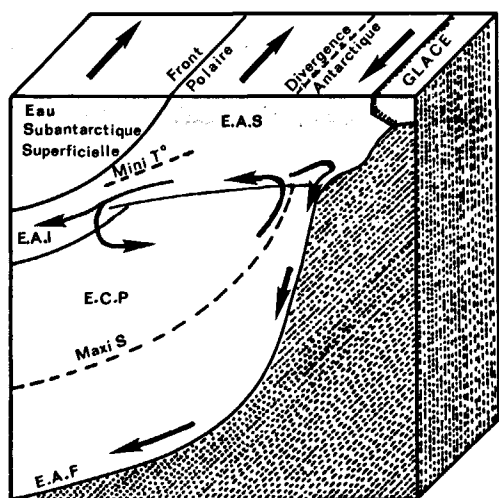


Figure 1  
Circulation des masses d'eaux dans l'Océan Austral.  
*Water-mass circulation in the Southern Ocean.*

— Sur le fond et les pentes du socle antarctique, une eau froide et dense, l'Eau Antarctique de Fond (EAF), de caractéristiques légèrement différentes selon son origine (Mer de Weddell, de Ross, de Davis ou d'Amery). Cependant, quelle qu'en soit la source, la température potentielle de cette eau est comprise entre  $-0,2^{\circ}$  et  $-0,9^{\circ}\text{C}$ , sa salinité entre 34,65 et 34,71 (Jacobs, Georgi, 1977; Edmond *et al.*, 1979).

— Au-dessus, une masse d'eau importante, plus chaude, qui remonte vers la surface au niveau de la divergence antarctique : l'Eau Circumpolaire Profonde (ECP), caractérisée par son maximum de salinité ( $> 34,75$ ) et une température comprise entre 1 et  $2,5^{\circ}\text{C}$ . A la divergence, elle est entraînée sous l'action de la force de Coriolis, soit vers le Nord et vers l'Est, soit vers le Sud et vers l'Ouest. L'eau Antarctique Superficielle (EAS), soumise au processus de congélation hivernale, se refroidit et coule le long des pentes continentales vers le fond de l'océan. C'est ce mouvement de l'Eau Antarctique de Fond qui, par compensation, oblige l'Eau Circumpolaire Profonde à son ascension vers la surface.

— Dans la zone antarctique, les eaux superficielles froides et moins salines ( $S = 34,0$  à  $33,7$  de la divergence au front polaire; Gordon, Goldberg, 1970) surmontent la masse d'eau circumpolaire. Elles présentent une composante de dérive orientée au Nord qui plonge au front polaire pour donner naissance à l'Eau Antarctique Intermédiaire (EAI;  $S = 34,40$ ). Plus au Nord, en zone subantarctique, cette eau intermédiaire est surmontée par l'eau subantarctique superficielle.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Dates et localisation de la campagne

La campagne Antiproduct 3 s'est déroulée du 2 janvier au 6 mars 1984 à bord du « Marion-Dufresne », navire des « Terres Australes et Antarctiques Françaises ».

Le secteur étudié est situé dans la partie indienne de l'Océan Austral et plus précisément, entre les îles Kerguelen et l'Antarctide (baie de Prydz; fig. 2). L'ensemble des stations hydrologiques avec leurs coordonnées géographiques pour lesquelles un prélèvement « métaux » a été effectué est indiqué dans le tableau 1. Pour 16 d'entre elles, un prélèvement en surface et un autre à 100 m ont été analysés, alors que pour 4 autres situées sur le trajet Nord-Sud, toute la colonne d'eau a été échantillonnée.

### Prélèvements et analyses

Les prélèvements ont été effectués au moyen de bouteilles GO-FLO ou Niskin, ces dernières étant modifiées par remplacement du caoutchouc intérieur par un tuyau en silicone selon les recommandations de Bewers et Windom (1982). Dans ces conditions, aucun écart systématique entre les deux types de bouteilles n'a été relevé. Les échantillons sont collectés sans filtration dans des flacons en polyéthylène soigneusement lavés par trempage dans un bain d'acide nitrique dilué puis lavage à l'eau ultrapure (Milli RO-Milli Q de Millipore). Ils sont ensuite acidifiés par addition de 5 ml d'acide nitrique Merck Suprapur pour un litre d'eau de mer, et congelés à  $-20^{\circ}\text{C}$  jusqu'au retour au laboratoire et analyse.

Les procédures d'analyse font appel à une préconcentration sur résine Chélex 100 suivie d'une élution

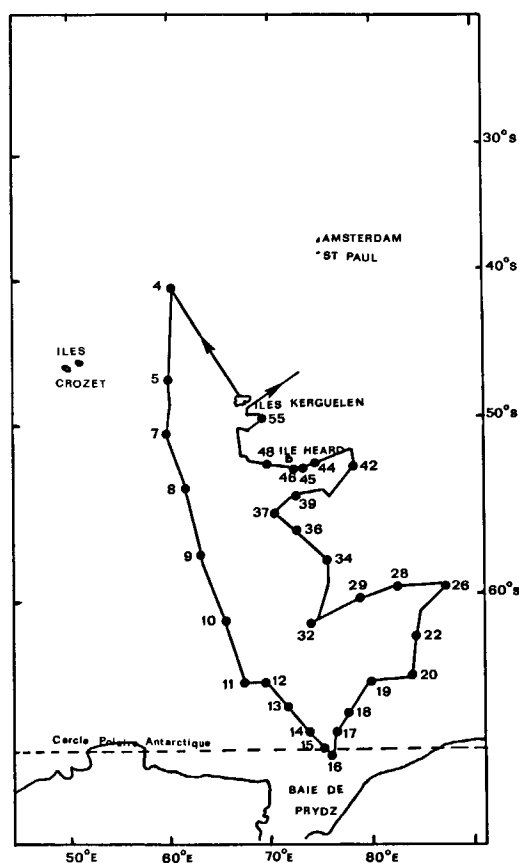


Figure 2  
Secteur géographique et localisation des stations étudiées au cours de la campagne Antiproduct III.  
*General situation and position of the stations made during the Antiproduct III cruise.*

séquentielle des alcalins et alcalino-terreux d'une part, et des métaux de transition d'autre part, selon la technique décrite par Kingston *et al.* (1978), Bordin (1985), Paulson (1986), avec lequel nous avons collaboré au Pacific Marine Environmental Laboratory à Seattle, pour la mise au point de la méthode. Toutes les opérations de préconcentration se font sous une hotte à flux laminaire horizontal. Les éléments de transition sont analysés par spectrophotométrie d'absorption atomique sans flamme sur un appareil Varian type AA 475 muni d'un four CRA 90 et d'un échantillonneur automatique AS 30. La précision globale, compte tenu de la reproductibilité de l'extraction et de la précision de l'analyse, peut être estimée à 10%. Les limites de détection fixées à 3 fois la valeur de la déviation standard du blanc sont respectivement de 0,09, 0,06 et 0,009 nmol. kg<sup>-1</sup> pour le Cu, le Mn et le Cd. Ces valeurs sont comparables à celles fournies par Paulson (1986). La valeur correspondant au cadmium est relativement élevée comparativement aux plus faibles teneurs observées, ce qui entraîne, en particulier pour les eaux de surface, une forte incertitude.

La salinité est mesurée à l'aide d'un salinomètre Guildline Autosol 8400 à induction (précision  $\pm 0,005$ ). L'oxygène dissous est dosé par la méthode de Winkler (Strickland, Parsons, 1968; précision  $\pm 0,02$  ml. l<sup>-1</sup>).

Les sels nutritifs sont déterminés sur Auto Analyzer II selon Tréguer et Le Corre (1975; précision: nitrates  $\pm 0,1$   $\mu$ M-N; silicates  $\pm 0,5$   $\mu$ M-Si).

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les principaux paramètres étudiés au cours de la Campagne Antiprod 3 sont rassemblés dans le tableau 1.

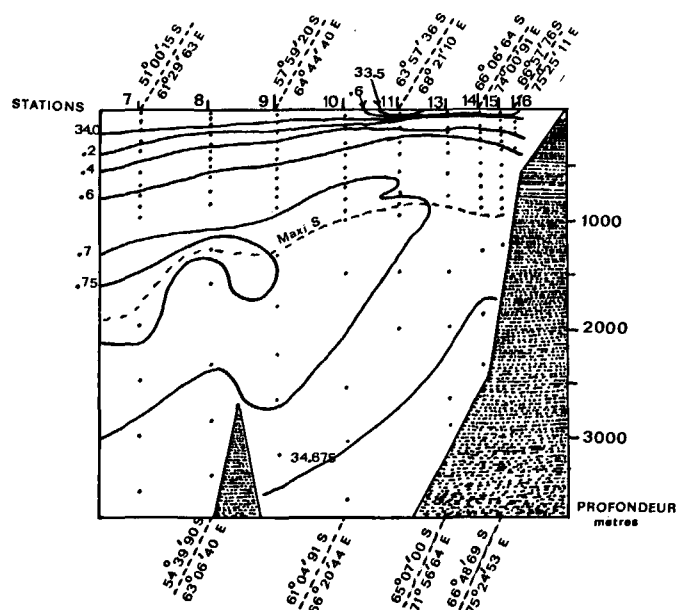


Figure 3  
Coupe verticale de la salinité.  
Vertical profile of salinity.

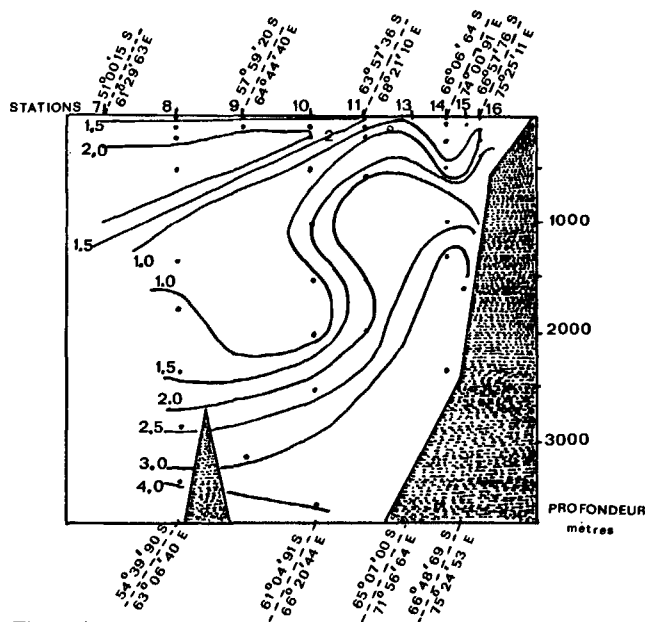


Figure 4  
Coupe verticale du cuivre (teneurs en nmol. kg<sup>-1</sup>).  
Vertical profile of copper (concentrations in nmol. kg<sup>-1</sup>).

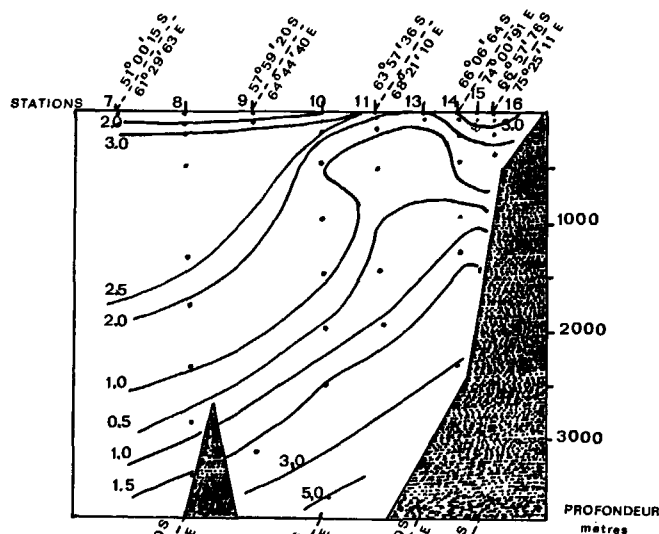


Figure 5  
Coupe verticale du manganèse (teneurs en nmol. kg<sup>-1</sup>).  
Vertical profile of manganese (concentrations in nmol. kg<sup>-1</sup>).

### Radiale Nord-Sud (stations 7 à 16)

Les analyses des prélèvements effectués entre les stations 7 et 16 ont abouti à l'établissement des coupes verticales du cuivre, du manganèse et du cadmium représentées respectivement sur les figures 4, 5 et 6, tandis que la figure 3 montre la coupe verticale correspondante de la salinité.

L'étude de ces trois coupes de métaux met en évidence, d'une part un certain nombre de traits communs aux trois éléments et d'autre part, des comportements particuliers à chacun d'entre eux.

#### Traits communs

Le mouvement ascensionnel des eaux profondes circumpolaires jusqu'à la divergence antarctique apparaît

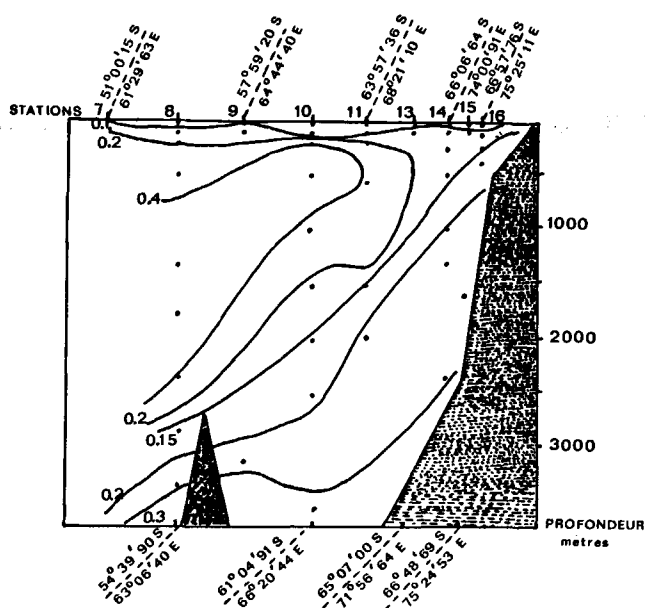


Figure 6  
Coupe verticale du cadmium (teneurs en nmol.kg<sup>-1</sup>).  
Vertical profile of cadmium (concentrations in nmol.kg<sup>-1</sup>).

clairement sur les figures 3 à 6. On observe ensuite, d'une manière plus nette dans le cas du cuivre, une retombée des eaux soumises au processus de congélation hivernale le long des pentes continentales vers le fond de l'océan. Cette eau va induire l'Eau Antarctique de Fond qui, bien qu'ayant sa source principale en Mer de Weddell (Foster, Carmack, 1976) semble se former tout autour du continent.

On note par ailleurs la présence d'une couche d'eau profonde d'épaisseur variable selon la latitude et la nature du métal, de teneurs métalliques relativement plus élevées (Cu 1,5 à 2,6 nmol.kg<sup>-1</sup>; Mn 2,5 à 3 nmol.kg<sup>-1</sup>; Cd 0,30 à 0,40 nmol.kg<sup>-1</sup>). Cette couche d'eau remonte sous l'influence de l'eau profonde pour atteindre la surface (exception faite du cadmium) au voisinage de la station 11.

Cette eau a déjà été mise en évidence par l'étude d'autres paramètres et serait d'origine nord-indienne (Callahan, 1972; Le Jehan, Tréguer, 1985). Danielsson (1980) a ainsi relevé dans l'Océan Indien des concentrations en cuivre comprises entre 3 et 4,4 nmol.kg<sup>-1</sup> entre 1000 et 2500 m, et les effets de dilution pourraient expliquer que le maximum de cuivre ne soit plus ici que de 2,6 nmol.kg<sup>-1</sup> (station 8, 500 m).

#### Comportements particuliers

##### Cuivre

Hors des conditions de non-équilibre qui existent dans la couche euphotique, le cuivre et les silicates ont, dans l'Océan Austral comme dans les autres océans de la planète, des comportements analogues (Monteiro, Orren, 1985). La figure 7, obtenue en ne tenant compte que des points correspondant à des profondeurs supérieures à 300 m, met en évidence une certaine relation existant entre les deux paramètres.

Le rapport atomique Cu/Si s'établit à  $3,1 \cdot 10^{-5}$ , relativement proche de  $2,5 \cdot 10^{-5}$ , chiffre donné par Danielsson (1980) ou Monteiro et Orren (1985). Ce

Tableau 1

Situation géographique et paramètres chimiques des stations.  
Geographical positions and chemical data for the various stations.

Station	Latitude (S)	Longitude (E)	Profondeur (m)
7	51°00'15	61°29'63	0
			99
			3487
8	54°39'90	63°06'40	0
			112
			222
			519
			1288
			1769
			2331
			3346
9	57°59'20	64°44'40	0
			89
			3125
10	61°04'91	66°20'44	0
			102
			203
			542
			994
			1508
			2000
			3551
11	63°57'36	68°21'10	0
			103
			203
			574
			1483
			1989
13	65°07'00	71°56'64	0
			99
14	66°06'64	74°00'91	0
			100
			250
			505
			994
			1334
15	66°48'69	75°24'53	0
			1636
16	66°57'76	75°25'11	0
			148
			233
			343
17	66°06'81	76°46'21	0
			95
			150
18	65°08'69	78°20'45	0
			95
20	63°48'44	83°56'92	0
			83
29	60°40'00	79°17'13	0
			100
34	58°34'39	76°19'14	0
			100
36	56°52'78	73°19'99	0
			102
39	54°55'42	73°50'25	0
			100
44	53°19'66	75°48'16	0
			80
45	53°09'98	74°07'64	0
			100
48	53°05'30	71°36'39	0
			110
55	50°31'80	70°45'16	0
			180

Salinité	Chlorophylle-a (mg. m <sup>-3</sup> )	Nitrates + Nitrites (µM-N)	Silicates (µM-Si)	Cuivre (nmole. kg <sup>-1</sup> )	Manganèse (nmole. kg <sup>-1</sup> )	Cadmium (nmole. kg <sup>-1</sup> )
33.841	0.27	25.4	10.2	0.63	1.49	0.10
33.848	0.41	25.7	10.9	1.75	2.18	0.21
34.889	-	33.4	126.0	1.07	1.46	0.17
33.928	0.17	27.6	14.0	1.21	1.55	0.08
33.989	0.25	29.7	39.1	1.88	2.27	0.16
34.125	0.03	32.4	49.3	1.58	3.15	0.21
34.552	-	35.7	77.6	2.56	2.77	0.41
34.750	-	31.2	83.2	1.00	2.79	0.13
34.744	-	31.3	95.2	1.30	1.59	0.31
34.715	-	32.4	112.0	1.26	0.78	0.42
34.693	-	33.1	122.0	2.43	-	-
34.680	-	33.6	131.0	4.03	1.49	0.32
33.954	0.15	27.9	33.0	1.30	1.68	0.11
33.979	0.21	28.5	36.6	2.00	2.20	0.13
34.698	-	-	126.0	2.88	2.49	0.29
33.785	0.04	26.3	33.9	0.86	2.00	0.02
33.989	0.16	29.5	44.2	1.73	3.31	0.03
34.444	0.02	36.5	72.3	1.79	2.00	0.47
34.664	-	34.3	82.5	0.73	1.00	0.57
34.745	-	31.5	87.6	1.68	1.49	0.35
34.736	-	31.6	98.6	0.80	1.02	0.15
34.716	-	32.7	110.0	0.75	0.40	-
34.701	-	33.5	120.0	2.53	1.66	0.17
34.676	-	33.7	127.0	4.05	5.11	0.33
33.497	0.17	28.0	49.4	1.78	3.30	0.13
34.256	0.30	30.6	59.7	0.28	0.73	0.11
34.433	0.03	31.7	69.6	1.13	1.07	0.21
34.701	-	32.5	91.9	2.34	0.73	0.05
34.695	-	33.1	114.0	2.27	0.71	0.19
34.689	-	34.2	126.0	2.06	1.02	0.21
33.689	0.07	28.7	54.0	3.26	2.24	0.09
34.322	0.19	31.1	62.9	0.88	1.24	0.14
33.696	0.09	29.2	58.4	1.98	3.51	0.12
34.283	0.30	31.3	63.9	2.78	3.04	0.14
34.562	-	32.9	82.3	2.48	2.97	0.12
-	-	32.5	98.9	0.75	-	0.13
34.686	-	33.6	117.0	2.54	0.73	0.21
34.678	-	33.7	122.0	3.19	1.42	0.21
34.674	-	33.3	122.0	1.66	3.53	0.29
33.443	0.11	29.0	59.3	1.37	1.47	0.07
34.233	0.16	30.5	63.7	0.84	0.57	0.11
34.677	-	34.0	124.0	2.14	1.29	0.23
33.464	0.12	29.0	58.4	1.77	2.84	0.10
-	0.04	-	64.1	1.38	3.42	0.11
-	-	32.4	67.1	1.75	1.97	0.17
34.444	-	-	89.9	1.23	2.26	0.19
34.544	0.08	29.6	57.8	0.96	1.49	0.07
34.311	0.22	32.6	64.7	2.22	4.22	0.29
34.357	0.27	32.8	67.1	3.38	-	0.47
33.659	0.10	30.0	55.1	1.48	2.17	0.14
34.333	0.25	31.5	63.8	0.38	0.93	0.12
-	0.10	-	-	0.92	1.53	0.17
34.216	0.37	30.8	67.2	2.32	3.09	0.15
-	0.13	24.2	50.7	3.53	0.98	0.20
34.369	0.40	34.3	74.2	1.94	3.20	0.13
33.905	0.11	29.1	43.9	1.80	1.15	0.11
34.163	0.25	32.9	63.2	1.83	1.18	0.13
33.897	0.08	27.5	22.6	2.33	0.84	0.06
33.979	0.15	31.1	32.7	1.40	1.17	0.14
33.890	0.25	27.2	11.7	3.18	2.11	0.13
33.917	0.43	27.9	20.0	4.94	3.02	0.14
33.886	0.14	27.1	15.5	3.08	2.59	0.15
33.892	0.18	27.2	15.5	1.41	1.58	0.11
33.884	0.50	25.7	14.0	0.73	2.22	0.22
33.957	0.32	28.0	26.3	1.78	1.67	0.21
33.857	0.32	24.8	6.5	0.28	1.60	0.16
33.887	0.13	25.5	11.3	1.84	0.97	0.14
33.892	0.45	-	5.0	1.40	2.71	0.21
33.951	1.15	-	22.9	1.51	0.16	0.22

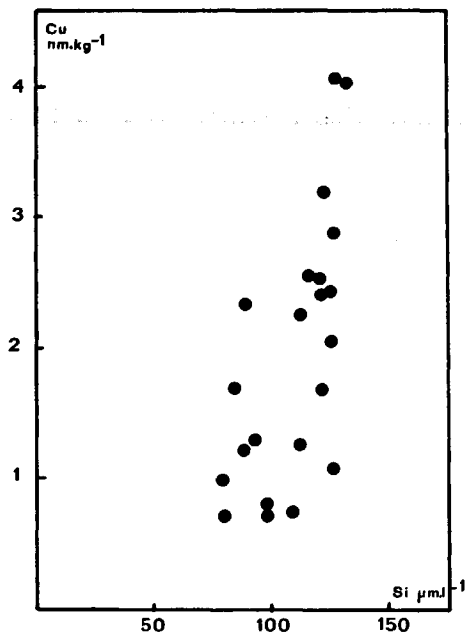


Figure 7  
Corrélation entre cuivre et silicates pour les points de prélèvement situés à plus de 300 m de profondeur.  
*Correlation between copper and silicates for samples deeper than 300 m.*

rapport cependant monte à  $4,5 \cdot 10^{-5}$  si l'on ne tient compte que des points de profondeur supérieure à 1 000 m, ce qui est en accord avec les résultats de Boyle *et al.* (1977), de Bruland (1980) et de Bruland et Franks (1983), qui ont montré que la régénération du cuivre était plus lente que celle des nutriments.

### Manganèse

La coupe verticale du manganèse laisse apparaître un comportement nettement différent du schéma classique, qui consiste en une décroissance très rapide de la teneur en métal dans les 200 premiers mètres, à laquelle succède une quasi-constance jusqu'au fond en l'absence de phénomène particulier tel que apports hydrothermaux (Klinkhammer, 1980; Klinkhammer, Bender, 1980; Jones, Murray, 1985; Boulègue, Hamelin, 1983), ou remise en solution à partir des sédiments abyssaux (Landing, Bruland, 1980; Bruland, Franks, 1983).

En effet, par suite de la présence de la couche d'eau subsuperficielle présumée d'origine indienne et concentrée en manganèse ( $2$  à  $3 \text{ nmol. kg}^{-1}$ ) d'une part, et de celle d'autre part d'une strate inférieure de concentration encore plus forte, d'origine probablement sédimentaire puisque jusqu'à présent aucune activité hydrothermale n'a été relevée dans la zone étudiée, on observe une couche intermédiaire à minimum de métal ( $0,5$  à  $1 \text{ nmol. kg}^{-1}$ ). Cette valeur est comparable à celles relevées dans les Océans Atlantique ou Pacifique (Bruland, Franks, 1983; Landing, Bruland, 1980; Klinkhammer, 1980). L'épaisseur de cette strate varie de 500 m à la station 8 à presque 2 000 m à la station 11, avant de diminuer à nouveau par suite de la retombée des eaux froides et denses près du continent. Aucune correspondance entre maximum de manganèse et minimum d'oxygène ne peut être relevée.

### Cadmium

Le cadmium a en général un comportement comparable à celui des sels nutritifs tels que les nitrates et les phosphates (Danielsson, 1980; Boyle *et al.*, 1977; Bruland, Franks, 1983; Bruland *et al.*, 1978; Martin *et al.*, 1976; Jones, Murray, 1984). Dans ce travail, une corrélation entre cadmium et nitrates est également observée, comme le montrent les figures 8 à 11 pour les stations 10 et 8. Les deux paramètres présentent des profils voisins avec des maxima intermédiaires simultanés en métal et en sel nutritif pouvant correspondre à l'eau d'origine indienne signalée par Callahan (1972) par son maximum en nitrate.

La comparaison de la corrélation cadmium-nitrates telle qu'elle apparaît ici avec celles obtenues par divers auteurs dans d'autres océans est détaillée dans le tableau 2.

Il y a dans l'Océan Antarctique une faible consommation des nitrates, l'apport d'azote nécessaire à la production primaire se faisant essentiellement à partir de l'ammonium (à 75% selon Holm-Hanssen, 1985) produit dans la zone euphotique, ce qui implique une reminéralisation importante et rapide de la production primaire dans cette couche de surface. Seule la production primaire provenant de l'assimilation de l'azote nitrique peut être exportée vers les couches profondes, avec une reminéralisation lente et progressive entraînant une faible variation des teneurs en nitrates. En ce qui concerne le cadmium, les concentrations en surface sont très proches de zéro et en accord avec Orren et Monteiro (1985), on peut penser qu'il intervient dans le cycle biologique. Par ailleurs, comme nous le montrerons plus loin, on observe une similitude des distributions horizontales de ce métal et de la chlorophylle, ce qui nous amène à penser que le cadmium pourrait être un élément biolimitant. La régénération du cadmium se fait très rapidement au cours du premier stade de reminéralisation de la production primaire dans la couche euphotique, ce qui entraîne le fort rapport  $\text{Cd}/\text{NO}_3^-$  observé.

Par ailleurs, Harris et Fabris (1979) ont étudié, dans un secteur géographique très proche de celui d'Antiprod 3, avec une station quasi commune (station 14), le cadmium particulaire et Eaton (1974) a estimé qu'en zone océanique, le pourcentage de ce métal se trouvant en phase particulaire est de 20% en surface et de 5% dans les eaux profondes. La comparaison des résultats de Harris et Fabris et de ceux relatifs à ce travail qui se rapportent au métal total (dissous + particulaire) confirme cette analyse d'Eaton. Ainsi, à la station 14, les rapports entre cadmium particulaire déterminé par ces auteurs et cadmium total issu d'Antiprod 3 conduisent à 24% de métal particulaire en surface, 14% à 250 m, 8% à 500 m et 1% à 2 500 m.

### Répartition superficielle entre les îles Kerguelen et le continent antarctique

Dans les considérations précédentes, nous n'avons pas intégré les données de surface dont la variabilité peut

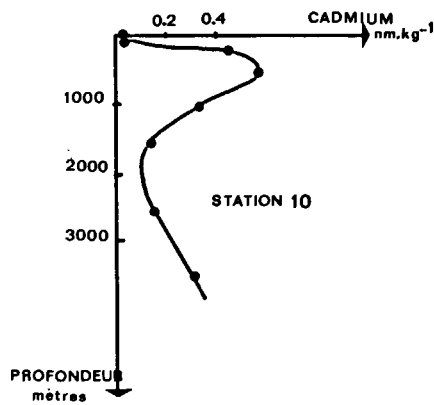


Figure 8  
Profil du cadmium ( $\text{nmol.kg}^{-1}$ ) en fonction de la profondeur à la station 10.  
Cadmium concentration ( $\text{nmol.kg}^{-1}$ ) versus depth at station 10.

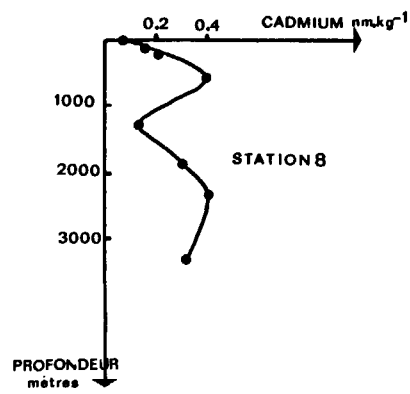


Figure 10  
Profil du cadmium ( $\text{nmol.kg}^{-1}$ ) en fonction de la profondeur à la station 8.  
Cadmium concentration ( $\text{nmol.kg}^{-1}$ ) versus depth at station 8.

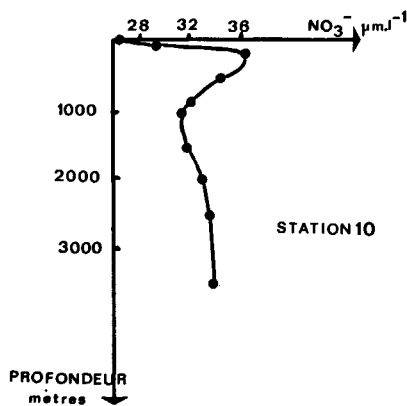


Figure 9  
Profil des nitrates ( $\mu\text{M-N}$ ) en fonction de la profondeur à la station 10.  
Nitrate ( $\mu\text{M-N}$ ) versus depth at station 10.

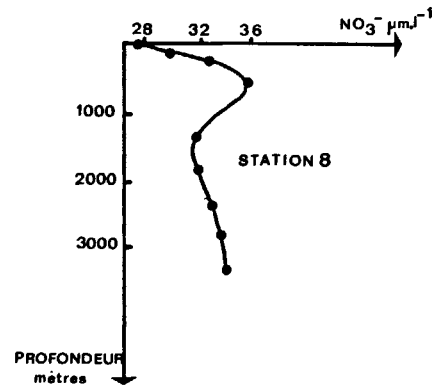


Figure 11  
Profil des nitrates ( $\mu\text{M-N}$ ) en fonction de la profondeur à la station 8.  
Nitrate ( $\mu\text{M-N}$ ) versus depth at station 8.

Tableau 2

Sommaire des équations des droites de corrélation entre le cadmium ( $y$ ) et les nitrates ( $x$ ) observées dans différents cas  $y=mx+b$ :  $y$  en  $\text{nmol.kg}^{-1}$ ;  $x$  en  $\mu\text{mol.l}^{-1}$ .

Summary of linear least-squares regression statistics for the lines  $y=mx+b$  where  $y$  is cadmium in  $\text{nmol.kg}^{-1}$  and  $x$  is nitrate in  $\mu\text{M}$ .

	$m$	$b$	Zone géographique
Martin <i>et al.</i> (1976)	0.0222	0.0365	Côtes californiennes
Bruland <i>et al.</i> (1978)	0.0218	0.0454	Pacifique Nord-Est
Jones et Murray (1984)	0.0279	0.123	Zone côtière
	0.0143	0.0578	Zone océanique
Danielsson et Westerlund (1983)	0.011	0.075	Arctique
Ce travail   Station 8	0.0425	-1.09	Antarctique
Station 10	0.0514	-1.39	

être induite par divers phénomènes, biologiques ou physiques, plus ou moins difficilement identifiables. Nous nous proposons dans cette partie de nous focaliser sur la répartition superficielle des métaux sur l'ensemble des stations effectuées.

Les profils horizontaux représentant les répartitions du cuivre, du manganèse et du cadmium sont schématisés respectivement sur les figures 12, 13 et 14.

En ce qui concerne le cuivre, en partant des îles Kerguelen et en se dirigeant au Sud vers la baie de Prydz, on observe tout d'abord une diminution des teneurs,

qui passent de  $1,50 \text{ nmol.kg}^{-1}$  aux environs des îles à  $0,50 \text{ nmol.kg}^{-1}$  au voisinage de la latitude des stations 8 et 48. On traverse ensuite un vaste secteur s'étalant jusqu'à la station 10, dans lequel les concentrations restent inférieures à  $1 \text{ nmol.kg}^{-1}$ , ensuite de quoi elles montent très rapidement à  $2 \text{ nmol.kg}^{-1}$  à l'arrivée en surface des eaux originaires de l'Océan Indien. La teneur en cuivre augmente encore sous l'influence de la fonte de la glace de mer pour atteindre plus de  $3 \text{ nmol.kg}^{-1}$ , ce qui est en accord avec les valeurs observées par Boyle et Edmond (1975) pour des latitu-

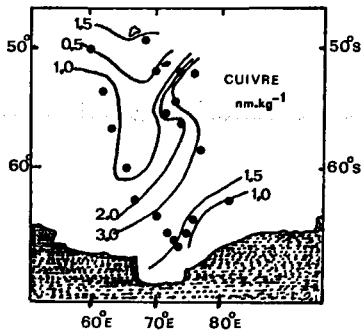


Figure 12  
Répartition superficielle du cuivre (teneurs en  $\text{nmol.kg}^{-1}$ ).  
Horizontal surface distribution of copper (concentrations in  $\text{nmol.kg}^{-1}$ ).

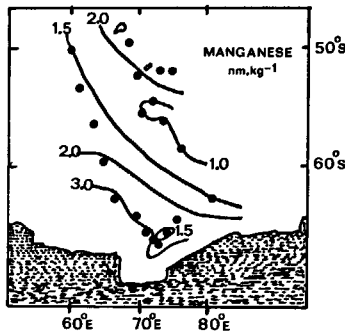


Figure 13  
Répartition superficielle du manganèse (teneurs en  $\text{nmol.kg}^{-1}$ ).  
Horizontal surface distribution of manganese (concentrations in  $\text{nmol.kg}^{-1}$ ).

des similaires au sud de la Nouvelle-Zélande. Plus près du continent, on revient à des concentrations plus basses avoisinant  $1,5 \text{ nmol.kg}^{-1}$  dans une zone de production primaire plus importante. Notons qu'il n'existe plus ici de corrélation cuivre-silicates, ce qui semblerait infirmer l'hypothèse d'un mécanisme purement hydrologique expliquant le gradient horizontal de silicates décroissant de la divergence antarctique au front polaire (Jacques, Minas, 1981).

Boyle et Edmond (1975) ont également envisagé une relation entre les teneurs de surface en cuivre et en nitrate compte tenu de l'importance biochimique de ce métal. Une corrélation de ce type nous conduit ici à un rapport  $\text{Cu/N} = 2,9 \cdot 10^{-4}$  (l'équation complète s'écrivant  $\text{Cu nmol.kg}^{-1} = 0,29 \text{ NO}_3^- \mu\text{M} - 6,55$ ), donnant un rapport Cu/P de  $4,5 \cdot 10^{-3}$  relativement proche de la valeur obtenue dans la cendre de plancton par Goldberg *et al.* (1971). Cependant, contrairement aux résultats de Boyle et Edmond, la droite ne passe pas par l'origine. Il faut noter toutefois que les valeurs que nous avons utilisées concernent en fait le total nitrate + nitrite. Enfin, on peut remarquer à la lecture du tableau 1, et ceci a été confirmé par Percelay (1986) qu'il n'y a aucune tendance générale à un enrichissement en cuivre de la surface à la thermocline.

La répartition superficielle du manganèse apparaît sur la figure 13. Des îles Kerguelen à Heard, se dessine une isoplèthe à  $2,0 \text{ nmol.kg}^{-1}$ , ce qui est, par exemple, comparable aux teneurs de l'Atlantique Nord (Bruland, Franks, 1983). A partir de là et en se dirigeant vers le

Sud, on observe dans un premier temps, une diminution régulière des teneurs jusqu'à atteindre des teneurs minimales de  $1,5 \text{ nmol.kg}^{-1}$ , puis une augmentation pour atteindre  $3,0 \text{ nmol.kg}^{-1}$  sous l'influence de la fonte de la glace de mer. On observe toutefois deux zones de plus basses concentrations à  $1,5 \text{ nmol.kg}^{-1}$  près du continent et à  $1,0 \text{ nmol.kg}^{-1}$  sur l'est du parcours de la campagne, qu'il paraît difficile de relier à un quelconque paramètre physique ou biologique.

En ce qui concerne le cadmium, les teneurs de surface varient entre  $0,22 \text{ nmol.kg}^{-1}$  près de Heard à  $0,02 \text{ nmol.kg}^{-1}$  à la station 11 pour une valeur moyenne de  $0,12 \text{ nmol.kg}^{-1}$ . Ces valeurs sont comparables à celles relevées dans le Pacifique par Boyle *et al.* (1976), mais très sensiblement inférieures aux teneurs trouvées par Moore (1983) dans l'Océan Arctique ou par Danielsson (1980) dans l'Océan Indien. Elles sont à l'inverse, en moyenne, légèrement plus fortes que les concentrations données par Boyle et Husted (1983), à partir d'un ensemble de campagnes dans les Océans Atlantique et Pacifique. Les valeurs les plus fortes se trouvent donc au nord, mais aussi à l'est de la zone étudiée et correspondent aux teneurs en chlorophylle les plus élevées (isoplèthes à  $0,30 \text{ mg.m}^{-3}$ ). On relève d'ailleurs une grande similitude entre les distributions superficielles en cadmium et en chlorophylle *a* (fig. 14 et 15). La correspondance entre de très faibles teneurs en chlorophylle *a* et des teneurs métalliques proches de zéro nous amène à envisager une action biolimitante de cet élément.

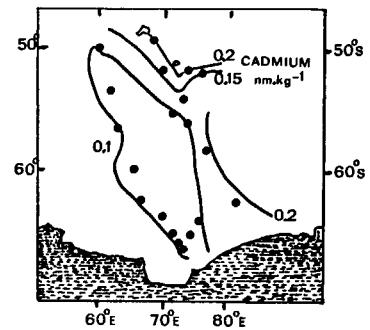


Figure 14  
Répartition superficielle du cadmium (teneurs en  $\text{nmol.kg}^{-1}$ ).  
Horizontal surface distribution of cadmium (concentrations in  $\text{nmol.kg}^{-1}$ ).

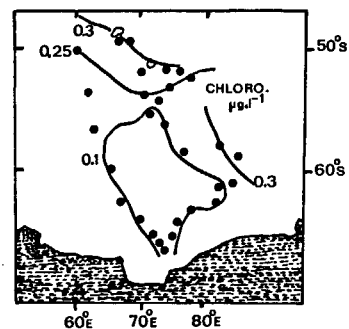


Figure 15  
Répartition superficielle de la chlorophylle (teneurs en  $\text{mg.m}^{-3}$ ).  
Horizontal surface distribution of chlorophyll (concentrations in  $\text{mg.m}^{-3}$ ).



## CONCLUSION

La campagne Antiprod 3 est à l'origine des premières données de cuivre, de cadmium et de manganèse dans le secteur indien de l'Océan Austral, qui s'étend des îles Kerguelen au Nord à la baie de Prydz au Sud.

Les coupes verticales des trois métaux montrent clairement le mouvement ascensionnel des eaux à la divergence antarctique, ainsi que leur retombée près du continent, et contribuent d'autre part à la mise en évidence d'une eau profonde d'origine indienne préalablement identifiée par Callahan (1972) par ses valeurs en nitrates et son maximum d'oxygène ou encore par Le Jehan et Tréguer (1985) par sa salinité et sa température. Ces métaux apparaissent donc comme des traceurs potentiels de masses d'eaux.

Nous avons également pu mettre en évidence, dans la colonne d'eau, les comportements voisins du cuivre et des silicates et ceux du cadmium et des nitrates. De ce point de vue, l'Océan Austral se rapproche donc des autres océans, bien que les rapports métal/sel nutritif apparaissent comme différents par suite du caractère original de l'Antarctique.

Les répartitions superficielles permettent de relier le cuivre aux nitrates, comme cela avait été suggéré par Boyle et Edmond (1975), et le cadmium à la chlorophylle *a*. Celle du manganèse reste délicate à expliquer bien que les teneurs les plus élevées soient observées près des terres émergées (îles au Nord et continent antarctique au Sud), impliquant un possible apport atmosphérique comme Klinkhammer et Bender (1980) ou Schaule et Pattersson (1981) ont pu le mettre en évidence dans le Pacifique par des variations corrélées des teneurs en Mn et en  $^{210}\text{Pb}$ .

## Remerciements

Les auteurs expriment leurs remerciements au Commandant Cattala et à tout l'équipage du « Marion-Dufresne », ainsi qu'à la Direction des Terres Australes et Antarctiques Françaises.

## RÉFÉRENCES

- Bewers J. M., Windom H. L., 1982. Comparison of sampling devices for trace metal determinations in seawater, *Mar. Chem.*, **11**, 71-86.
- Bordin G., 1985. Étude du comportement du cuivre, du manganèse et du cadmium dans deux écosystèmes eutrophes : la rade de Brest et le secteur indien de l'océan antarctique, *Thèse Spéc., Univ. Bretagne Occidentale*, N° 232, 219 p.
- Boulégué J., Hamelin B., 1983. Activité hydrothermale de la dorsale Pacifique Est à 21°30' S d'après les profils de concentration du manganèse dans l'eau de mer, *C.R. Acad. Sci. Paris*, **297**, 671-674.
- Boyle E., Edmond J. M., 1975. Copper in surface waters south of New Zealand, *Nature*, **253**, 107-109.
- Boyle E. A., Huested S., 1983. Aspects of the surface distributions of copper, nickel, cadmium and lead in the North Atlantic and North Pacific, in: *Trace metals in sea water*, edited by C.S. Wong, E. Boyle, K. W. Bruland, J. D. Burton and E. D. Goldberg, NATO Conf. Ser. IV, Mar. Sci., Plenum, New York, London, 379-394.
- Boyle E. A., Sclater F., Edmond J. M., 1976. On the marine geochemistry of cadmium, *Nature*, **263**, 42-44.
- Boyle E. A., Sclater F. R., Edmond J. M., 1977. The distribution of dissolved copper in the Pacific, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **37**, 38-54.
- Bruland K. W., 1980. Oceanographic distributions of cadmium, zinc, nickel and copper in the North Pacific, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **47**, 176-198.
- Bruland K. W., Franks R. P., 1983. Mn, Ni, Zn and Cd in the Western North Atlantic, in: *Trace metals in sea water*, edited by C. S. Wong, E. Boyle, K. W. Bruland, J. D. Burton and E. D. Goldberg, NATO Conf. Ser. IV, Mar. Sci., Plenum, New York, London, 395-414.
- Bruland K. W., Knauer G. A., Martin J. H., 1978. Cadmium in Northeast Pacific waters, *Limnol. Oceanogr.*, **23**, 618-625.
- Callahan J. E., 1972. The structure and circulation of deep water in the Antarctic, *Deep-Sea Res.*, **19**, 563-575.
- Danielsson L. G., 1980. Cd, Co, Cu, Fe, Pb, Ni and Zn in Indian Ocean water, *Mar. Chem.*, **8**, 199-215.
- Danielsson L. G., Westerlund S., 1983. Trace metals in the Arctic Ocean, in: *Trace metals in sea water*, edited by C. S. Wong, E. Boyle, K. W. Bruland, J. D. Burton and E. D. Goldberg, NATO Conf. Serv. IV, Mar. Sci., Plenum, New York, London, 85-95.
- Eaton A., 1984. Marine chemistry of cadmium, *Thesis, Harvard Univ.*, 243 p.
- Edmond J. M., Jacobs S. S., Gordon A. L., Mantyla A. W., Weiss R. F., 1979. Water column anomalies in dissolved silica over opaline pelagic sediments and the origin of the deep silica maximum, *J. Geophys. Res.*, **84**, 7809-7825.
- Foster T. D., Carmack E. C., 1976. Frontal zone mixing and Antarctic bottom water formation in the southern Weddell Sea, *Deep-Sea Res.*, **23**, 301-307.
- Goldberg E. D., Broecker W. S., Gross M. G., Turekian K. K., 1971. Radioactivity in the marine environment, Ch. 5, NRC-NAS, Washington D.C.
- Gordon A. L., Goldberg R. D., 1970. Circumpolar characteristics of Antarctic waters, in: *Antarctic Map Folio series*, edited by V. C. Bushnell, American Geographical Society, New York, 13.
- Gordon A. L., Taylor H. W., 1975. Heat and salt balance within the cold waters of the world ocean. Numerical models of ocean circulation, *Nat. Acad. Sci. Washington D.C.*, ISBN 0-309-02225-8, 54-56.
- Harris J. E., Fabris G. J., 1979. Concentrations of suspended matter and particulate cadmium, copper, lead and zinc in the Indian sector of the Antarctic Ocean, *Mar. Chem.*, **8**, 163-179.
- Holm-Hansen O., 1985. Nutrient cycles in Antarctic marine ecosystems, in: *Antarctic nutrient cycles and food webs*, edited by W. R. Siegfried, P. R. Condy and R. M. Laws, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg.
- Jacobs S. S., Georgi D. T., 1977. Observations on the Southern Indian Antarctic Ocean, in: A voyage of discovery, G. Deacon 70th anniversary, *Deep-Sea Res. (suppl.)*, 43-84.
- Jacques G., Minas M., 1981. Production primaire dans le secteur indien de l'océan Antarctique en fin d'été, *Oceanol. Acta*, **4**, 1, 33-43.
- Jones C. J., Murray J. W., 1985. The geochemistry of manganese in the Northeast Pacific Ocean off Washington, *Limnol. Oceanogr.*, **30**, 1, 81-92.
- Kingston H. M., Barnes I. L., Brady T. J., Rains T. C., Champ M. A., 1978. Separation of eight transition elements from alkali and alkaline earth elements in estuarine and seawater with chelating resin and their determination by graphite furnace atomic absorption spectrometry, *Anal. Chem.*, **50**, 14, 2064-2070.
- Klinkhammer G. P., 1980. Observations of the distribution of manganese in the East Pacific rise, *Chem. Geol.*, **29**, 211-226.

- Klinkhammer G. P., Bender M. L.**, 1980. The distribution of manganese in the Pacific Ocean, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **46**, 361-384.
- Landing W. M., Bruland K. W.**, 1980. Manganese in the North Pacific, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **49**, 45-226.
- Le Jehan S., Treguer P.**, 1985. The distribution of inorganic nitrogen, phosphorus, silicon and dissolved organic matter in surface and deep waters of the Southern Ocean, in: *Antarctic nutrient cycles and food webs*, edited by W. R. Siegfried, P. R. Condy and R. M. Laws, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 22-29.
- Martin J. H., Bruland K. W., Broenkow W. W.**, 1976. Cadmium transport in the California current, in: *Marine pollutant transfer Heath*, edited by H. L. Windom and R. A. Duce, 159-184.
- Monteiro P. M. S., Orren M. J.**, 1985. Trace metals in the Southern Ocean: on the geochemistry of copper, *Mar. Chem.*, **15**, 345-355.
- Moore R. M.**, 1983. The relationship between distributions of dissolved cadmium, iron and aluminium and hydrography in the central Arctic ocean, in: *Trace metals in sea water*, edited by C. S. Wong, E. Boyle, K. W. Bruland, J. D. Burton and E. D. Goldberg, Plenum Press, NATO Conf. Ser. IV, Mar. Sci., New York, London, 131-142.
- Orren M. J., Monteiro P. M. S.**, 1985. Trace element geochemistry in the Southern Ocean, in: *Antarctic nutrient cycles and food webs*, edited by W. R. Siegfried, P. R. Condy and R. M. Laws, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg.
- Paulson A. J.**, 1986. Effects of flow rate and pretreatment on the extraction of trace metals from estuarine and coastal seawater by Chélex 100, *Anal. Chem.*, **58**, 183-187.
- Percelay L.**, 1986. Application de tétraazamacrocycles greffé ou lipophile à l'extraction et au dosage du cuivre, du zinc et du cadmium en eau de mer, *Thèse Spéc., Univ. Bretagne Occidentale*, N° 250, 139 p.
- Schaule B. K., Patterson C. C.**, 1981. Lead concentrations in the Northeast Pacific: evidence for global anthropogenic perturbations, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **54**, 97-116.
- Strickland J. D. H., Parsons T. R.**, 1968. A practical handbook of seawater analysis, *Fish. Res. Board Can. Bull.*, **167**, 310.
- Sverdrup H. V., Johnson M. N., Fleming R. H.**, 1942. *The oceans*, Prentice Hall, Inc, New York, 1060 p.
- Treguer P., Le Corre P.**, 1975. *Manuel d'analyse des sels nutritifs dans l'eau de mer. Utilisation de l'Auto-Analyseur II Technicon*, Lab. Océanogr. Chim., Univ. Bretagne Occidentale, 2° éd., Brest, 110 p.