

MÉTAUX DANS LE SÉDIMENT ET FRACTION BIO-DISPONIBLE : INFLUENCE SUR LES PEUPELEMENTS DE FORAMINIFÈRES

Eric Armynot du Châtelet, Université d'Angers, UPRES EA 2644, Faculté de Sciences, Angers, France et LEBIM, Ile d'Yeu, France

Jean-Claude Amiard, CNRS/GDR1117, SMAB, ISOMer, Université de Nantes, Nantes, France

Jean-Pierre Debenay, Université d'Angers, UPRES EA 2644, Faculté de Sciences, Angers, France et LEBIM, Ile d'Yeu, France

Alain Geffard, CNRS/GDR1117, SMAB, ISOMer, Université de Nantes, Nantes, France

ABSTRACT

Benthic foraminifera are increasingly used as environmental bioindicators, especially in polluted environments. But little attention is paid whether the pollutant are available or not. Six samples were collected in February and six in July 2002 in three harbors of the French Atlantic coast for establishing relationships between foraminifera and three heavy metals (Cu, Pb and Zn). The total concentrations of each metal in the sediment and its bio-available fraction were measured. Whatever the season and the sample, in spite of a strong concentration in the sediment, the bioavailable part of the heavy metal is weak. The reaction of foraminiferal assemblages may be hidden by sedimentation rate effect. In spite of that weak pollution the reaction of *Criboelphidium excavatum* suggest that they may be used as bioindicator of harbor pollution.

RÉSUMÉ

Les foraminifères benthiques sont de plus en plus utilisés comme bio-indicateurs environnementaux particulièrement dans les environnements pollués. Cependant, peu d'attention est accordée à la biodisponibilité de ces polluants. Six échantillons ont été collectés en février et six en juillet 2002 dans trois ports de côtes Atlantiques françaises pour l'établissement des relations entre les foraminifères et trois métaux (Cu, Pb et Zn). La concentration totale de chaque métal dans le sédiment et sa fraction bio-disponible ont été mesurée. Quelque soit la saison et les échantillons, malgré une forte concentration dans le sédiment, la part bio-disponibles des métaux est faible. La réaction des foraminifères peut être partiellement masquée par le taux de sédimentation. Malgré cette faible pollution, *Criboelphidium excavatum* est tolérante et peut être utilisée comme bio-indicatrice de pollution portuaire.

1. INTRODUCTION

La plupart des études portant sur les assemblages de foraminifères dans les environnements pollués prennent en compte les concentrations en polluants dans le sédiment, mais ne tiennent pas compte de la bio-disponibilité de ces polluants (e.g., Samir et El-Din, 2001; Cearreta et al., 2000; Coccioni, 2000; Alve et Olsgard, 1999), même si cet aspect est évoqué. Les polluants peuvent être adsorbés sur les particules minérales ou organiques et leur disponibilité change très fortement avec les paramètres environnementaux, tels que la salinité et le pH (e.g., Ettajani et Amiard, 1995; Amiard, 1992; Luoma, 1983). Dans les environnements paraliques, ces paramètres peuvent ainsi changer dans l'espace et dans le temps. Le but de cette étude est de chercher l'impact des polluants sur les assemblages de foraminifères en considérant, d'une part, les concentrations dans les sédiments et d'autre part leur bio-disponibilité estimée par désorption à faible pH. Les métaux Cu, Pb et Zn connus pour leur impact sur les organismes (e.g., Sharifi et al., 1991), sont choisis comme exemples pour cette étude.

2. MATERIELS ET METHODES

Cette étude est menée sur des échantillons collectés à deux périodes de l'année, en février et juillet 2002. A chaque période, six échantillons sont prélevés dans trois ports des côtes de Vendée (Côtes Atlantiques françaises ; (figure 1)) : un dans le port de l'Epoids, trois dans le port de Port-joinville (bassin de commerce, bassin de pêche et bassin de plaisance) et deux dans le port de l'Herbaudière (bassin de pêche et bassin de plaisance). Le port de l'Epoids se situe dans un estuaire, au sein d'un environnement soumis à une influence régulière d'eaux douces. Cependant, la position du point de prélèvement, en aval de l'estuaire, le situe dans une zone sous influence dominante des eaux marines. Ce port dédié à l'activité de la pêche, est soumis à une pollution originare d'une petite aire de carénage, et de l'activité quotidienne des bateaux de pêche. L'impact de la pollution y est relativement modéré, comparée aux deux autres ports. Contrairement au port de l'Epoids, les ports de Port-Joinville et de l'Herbaudière ne sont pas situés dans un estuaire et par conséquent sont faiblement influencés par les eaux douces. Une pollution organique provient principalement de l'activité de la pêche (rinçage des bateaux et du matériel) et des déchets domestiques rejetés dans les ports de plaisance, alors que le carénage des bateaux, la peinture et

les suintements d'hydrocarbures sont sources de pollution chimique. Les activités sont les plus importantes dans le port de commerce de Port-Joinville, qui est ainsi plus sujet à la pollution que les autres bassins de ce port et que le port de l'Herbaudière.

Pour l'analyse des foraminifères, un volume constant de 50 cm³ de sédiment superficiel (1 cm) est prélevé au moyen d'une benne à prélèvements. Au laboratoire, les échantillons sont tamisés sur des tamis de maille 315 et 50 µm. Le refus intermédiaire est coloré par du Rose bengal selon la méthode proposée par Walton (1952). Les assemblages vivants et totaux (vivant + mort) sont utilisés pour les considérations statistiques. Les individus vivants indiquent une origine autochtone des spécimens. Cependant, les assemblages vivants sont très fortement affectés par les cycles saisonniers ce qui peut masquer l'influence de la pollution. Les assemblages totaux, en revanche, fournissent une base de données plus large, qui représente l'intégration des fluctuations à court terme dans l'environnement, tout comme les phénomènes biologiques tels que les cycles annuels de reproduction (e.g., Debenay et al., 2001; Scott et Medioli, 1980). Deux cent spécimens, ce qui est suffisant d'après Fatela et Taborda (2002) pour des études basées sur les taxa dominants, sont identifiés dans chaque échantillon et déterminés suivant la classification de Loeblich et Tappan (1988). La densité, la richesse spécifique et la composition des assemblages de foraminifères sont ensuite déterminés.

La teneur en matière organique (exprimée en pourcentage du poids de sédiment sec) est déterminée par perte au feu (2h30 à 450°C). Une analyse granulométrique est réalisée à l'aide d'un granulomètre laser. Deux classes granulométriques sont considérées : les argiles (<3,9 µm) et une classe regroupant silts et argiles (<62,5 µm). Enfin, la teneur en carbonates est déterminée. Les concentrations en Cu, Pb et Zn sont mesurées d'une part, dans le sédiment et d'autre part, après un test de désorption à faible pH pour estimer la part disponible des métaux pour les organismes. Toutes les analyses sont conduites en triplicats. Une masse de 500 mg de sédiment frais est attaquée par un mélange l'acide nitrique (HNO₃) et d'acide chlorhydrique (HCl), puis reprise dans de l'HCl 1N en vue du dosage des métaux dans les sédiments bruts. Les tests de désorption sont réalisés sur des triplicats agités pendant 4 heures en présence de 20 ml d'acide acétique ajusté à pH=4 par l'ajout de NaOH. Le tout est ensuite centrifugé. Le culot est minéralisé de la même façon que les sédiments bruts. Les dosages de Cu, Pb et Zn sont effectués dans cette solution acide par Spectrophotométrie d'Absorption Atomique (SAA). La validité des détections et des quantifications est vérifiée à l'aide d'échantillons standards de l'IAEA (IAEA 405) ou du CNRC (PACS-1). Des analyses de corrélations sont alors réalisées pour relier ou non les foraminifères aux polluants.

3. RESULTATS

De couleur marron clair dans l'ensemble des échantillons, le sédiment apparaît non dépourvu d'oxygène. Les taux de

sédimentation sont de 5 cm.an⁻¹ à Port-Joinville et équivalents à l'Herbaudière. Il est dominé par les fractions fines avec un mode compris entre 3 et 8 µm et un second mode entre 56 et 65 µm dans le port de Port-Joinville. Les proportions d'argiles (<3,9 µm) sont comprises entre 21 et 54%. Les proportions de silts et argiles (<62,5 µm) constituent la majeure partie du sédiment (75 à 99%). Les proportions de carbonates sont comprises entre 9 et 15% (tableau 1). Les teneurs en matière organique sont comprises entre 11 et 17%.

Les concentrations en métaux dans le sédiment (tableau 1, figure 2) sont les plus fortes dans le bassin de commerce du port de Port-Joinville, les concentrations en Zn atteignent près de 4,3 µmol.g⁻¹ en juillet et un maximum de près de 5,4 µmol.g⁻¹ en février. Zn est le plus abondant dans tous les échantillons. Cu montre également des concentrations relativement élevées, jusqu'à environ 3,9 µmol.g⁻¹ en février. Les plus faibles concentrations sont mesurées dans le port de l'Epoids. La concentration totale en métaux bio-disponible (Cu + Pb + Zn) est plus forte en février (jusqu'à environ 2 µmol.g⁻¹) qu'en juillet (inférieur à 0,8 µmol.g⁻¹). La part bio-disponible de Zn est maximum dans le port de Port-Joinville en février et dans le port de l'Herbaudière en juillet. Mis à part dans le port de commerce de Port-Joinville en juillet, pour le Cu, la part bio-disponible estimée de Cu et Pb est très faible.

Sur toute l'aire d'étude et pendant les deux saisons, 63 espèces de foraminifères ont été déterminées parmi lesquels 16 étaient vivantes en février et 27 en juillet (tableau 2). Très peu d'individus déformés ont pu être observés. En février, la densité des peuplements totaux, dans 50 cm³ de sédiment, s'échelonne entre environ 580 individus dans le port de l'Epoids et environ 7400 individus dans le port de pêche de Port-Joinville. La richesse spécifique varie entre 25 espèces dans le bassin de plaisance de Port-Joinville et 43 dans le bassin de commerce de Port-Joinville. En juillet, la densité est comprise, pour 50 cm³ de sédiment, entre environ 160 individus dans le bassin de plaisance de Port-Joinville, et environ 45 000 dans le bassin de commerce. La richesse spécifique est comprise entre 34 espèces dans le port de l'Epoids et 50 espèces dans le bassin de commerce de Port-Joinville.

De fortes corrélations positives, significatives à plus de 95%, sont observées en juillet 2002 entre la densité du peuplement de foraminifères et la teneur du sédiment en métaux (Cu + Pb + Zn) (tableau 3). Bien que moins fortes et moins significatives, ces corrélations se retrouvent en janvier. Une corrélation négative, faible et peu significative, mais constante, s'observe entre les abondances relatives de *Brizalina variabilis* en février et en juillet, pour le peuplement total et les assemblages vivants. Cette corrélation indique une tendance de *B. variabilis* à réagir négativement aux métaux, et donc signale une sensibilité de cette espèce à la pollution. Cette même tendance se retrouve en juillet pour *Haynesina germanica*. Pour ces deux espèces, les corrélations avec les fractions bio-disponibles sont moins fortes et moins significatives. *Cribroelphidium excavatum* est fortement corrélé à la teneur

en métaux dans le sédiment, en février et en juillet. Cette corrélation concerne l'abondance relative et absolue pour les peuplements totaux et vivants. Ces corrélations sont significatives à plus de 93% dans tous les cas en juillet ($p < 0,07$). Elles sont moins significatives en février. Les résultats sont beaucoup plus irréguliers en ce qui concerne les corrélations avec la fraction bio-disponible des métaux, celles-ci pouvant être négatives ou très significativement positives selon la période et le type de peuplement considéré.

4. DISCUSSION

Les teneurs en métaux mesurées dans les ports de Vendée sont comparables à celles rapportées dans les travaux de Millward et al. (2001) en ce qui concerne la concentration dans le sédiment, mais plus faible pour la fraction bio-disponible. Ces auteurs mesurent des concentrations de $5,19 \pm 0,81 \mu\text{mol.g}^{-1}$ de Cu dans le sédiment, pour une fraction bio-disponible de $3,98 \pm 1,51 \mu\text{mol.g}^{-1}$ et de $0,61 \pm 0,55 \mu\text{mol.g}^{-1}$ de Pb dans le sédiment, pour une fraction bio-disponible de $0,51 \pm 0,05 \mu\text{mol.g}^{-1}$. Ces concentrations affectent très fortement bivalves et gastéropodes, alors que la meiofaune n'est pas touchée.

La proportion d'argiles dans les sédiments, toujours supérieur à 20% et dépassant 50% dans plusieurs stations, la présence de plus de 9% de carbonates, ainsi que de plus de 10% de matière organique expliquent en partie la faible bio-disponibilité des métaux. En effet, argiles, carbonates et matière organique favorisent une forte rétention des métaux dans les sédiments (Förstner, 1985; Förstner, 1979). Tous les métaux présents dans le sédiment ne sont donc pas bio-disponibles. D'après Ettajani et Amiard (1995), travaillant dans la même région, la désorption des métaux dépend de la saison et de la salinité, leur bio-disponibilité étant plus importante au printemps qu'en été. Nos observations montrent que ces variations, suivant les saisons, dépendent aussi de l'environnement, étant donné que les plus fortes concentrations en métaux bio-disponibles sont enregistrées au port de Port-Joinville en février et au port de l'Herbaudière en juillet. La plus forte proportion de Zn bio-disponible résulte probablement d'une plus grande mobilité de ce métal qui tend à être désorbé à un pH plus élevé que le cuivre (John et Leventhal, 1995). Cependant, Zn est connu pour être rapidement remis en équilibre avec la phase solide (Zhang et al., 1995) ce qui explique, sa forte concentration dans le sédiment (Jackman et al., 2001).

Les corrélations positives de la densité, de la richesse spécifique, et de l'abondance absolue de certaines espèces avec la concentration totale en Cu + Pb + Zn dans le sédiment indiquent une diminution (ou augmentation) simultanée de ces caractéristiques des peuplements et de la concentration des métaux dans le sédiment. Compte tenu de l'impact négatif reconnu de ces métaux sur la faune et la flore, ce phénomène ne peut pas s'expliquer par un effet direct des métaux sur le peuplement : il s'explique par l'influence du taux de sédimentation. Une sédimentation rapide entraîne une dilution, dans le sédiment, des polluants

(métaux) aussi bien que des tests de foraminifères. Ainsi, l'utilisation des peuplements de foraminifères comme bio-indicateurs de pollution doit tenir compte de ce paramètre.

La fraction bio-disponible de Cu atteint $0,20 \mu\text{mol.g}^{-1}$ (soit environ $12,7 \times 10^3 \mu\text{.l}^{-1}$) dans le bassin de commerce de Port Joinville. Cette valeur dépasse les concentrations de $10 \mu\text{g.l}^{-1}$ au delà desquelles respectivement Sharifi et al. (1991) et Le Cadre (communication personnelle) ont constaté un impact sur les foraminifères. L'absence d'impact dans le port de Port-Joinville pourrait résulter d'interactions complexes entre tous les paramètres physico-chimiques du milieu (ceux mesurés dans cette étude ainsi que d'autres) limitant l'impact toxique des métaux sur les foraminifères.

Les réactions négatives de *B. variabilis* et *H. germanica* à la teneur en métaux du sédiment permettent d'envisager une utilisation possible de ces deux espèces comme indicatrices de pollution. La réaction négative de *H. germanica* peut paraître paradoxale, puisque cette espèce est connue pour résister à l'impact des pollutions (Stubbles et al., 1996; Stubbles, 1993; Sharifi et al., 1991), mais pourrait s'expliquer par le fait qu'elle est une espèce d'eaux saumâtres. Sa présence dans les eaux plus marines des ports de l'Herbaudière et de Port-Joinville pourrait la rendre plus sensible à la pollution. Les taxa doivent vivre dans un environnement favorable à leur maintenance et à leur reproduction (Schafer, 1973; Boltovskoy and Lena, 1969). Le fait que les corrélations soient plus marquées avec la concentration en métaux dans le sédiment qu'avec la fraction bio-disponible semble indiquer que les métaux Cu, Pb et Zn, n'ont pas d'impact négatif sur ces espèces par eux-mêmes. Leur présence dans le sédiment serait simplement un indicateur d'une pollution plus générale, associée aux trois métaux analysés.

Criboelphidium excavatum en présentant le plus grand nombre de corrélations positives significatives à plus de 95% avec les métaux apparaît comme l'espèce la plus tolérante à la pollution par Cu, Pb et Zn. C'est une espèce très adaptable aux changements de disponibilité dans la nourriture et/ou aux changements dans les conditions environnementales (Goubert, 1997; Linke and Lutze, 1993). Cette espèce est connue pour prospérer dans les environnements côtiers pollués (Alve, 1991; Schafer et al., 1991; Setty and Nigam, 1984; Bates and Spencer, 1979; Buckley et al., 1974; Schafer, 1973). Sharifi et al. (1991) ont établi que c'est l'espèce la plus tolérante aux métaux lourds. Debenay et al. (2001) ont déjà considéré cette espèce comme indicatrice de pollution.

5. CONCLUSION

Quel que soit la saison, la fraction estimée bio-disponible des trois métaux Cu, Pb et Zn reste faible. L'impact de ces métaux sur les peuplements de foraminifères est très réduit, tant en ce qui concerne les métaux dans le sédiment qu'en ce qui concerne leurs fractions bio-disponibles, probablement en raison d'une bio-disponibilité insuffisante.

De plus, cet impact est masqué par la dilution simultanée des métaux et des tests de foraminifères par une forte sédimentation dans certains sites. Toutefois, *Cribroelphidium excavatum* montre une tolérance particulière aux métaux étudiés, confirmant des observations précédentes, alors que *B. variabilis* indique un impact négatif. Il est donc possible d'envisager l'utilisation du comportement de ces espèces comme bio-indicateur de pollution, même dans des environnements où la pollution est modérée.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Conseil Général de Vendée pour son support financier. Ils remercient aussi Didier Martinez pour son assistance technique ainsi que Mary Stuart pour son aide et ses conseils.

7. BIBLIOGRAPHIE

- Alve, E., 1991. Benthic foraminifera in sediment cores reflecting heavy metal pollution in Sorfjord, western Norway. *Journal of Foraminiferal Research*, 21(1), pp 1-19.
- Alve, E. and Olsgard, F., 1999. Benthic foraminiferal colonization in experiments with copper-contaminated sediments. *Journal of Foraminiferal Research*, 29(3), pp 186-195.
- Amiard, J.-C., 1992. Bioavailability of sediment-bound metals for benthic aquatic organisms. In: J.-P. Vernet (Editor), *Impact of heavy metals on the environment*. Elsevier, pp. 183-202.
- Bates, J.M. and Spencer, R.S., 1979. Modification of foraminiferal trends by the Chesapeake-Elisabeth sewage outfall, Virginia Beach, Virginia. *Journal of Foraminiferal Research*, 9(2), pp 125-140.
- Boltovskoy, E. and Lena, H., 1969. Seasonal Occurrences, Standing Crop and Production in Benthic Foraminifera of Puerto Deseado. Contribution from the Cushman Foundation for Foraminiferal Research, 20, pp 87-95.
- Buckley, D.E., Owens, E.H., Schafer, C.T., Vilks, G., Cranston, R.E., Rashid, M.A., Wagner, F.J.E., Walker, D.A., 1974. Canso strait and Chedauco bay: a multidisciplinary study of the impact of man on the marine environment. *Geological Survey of Canada*, 1, pp 74-30.
- Cearreta, A., Irabien, M.J., Leorri, E., Yusta, I., Croudace, I.W., Cundy, A.B., 2000. Recent Anthropogenic Impacts on the Bilbao Estuary, Northern Spain: Geochemical and Microfaunal Evidence. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 50, pp 571-592.
- Coccioni, R., 2000. Benthic Foraminifera as Bioindicators of Heavy Metal Pollution - A case Study from the Goro Lagoon (Italy). In: R.E. Martin (Editor), *Environmental Micropaleontology*, New York, pp. 71-103.
- Debenay, J.-P., Tsakiridis, E., Souldard, R. and Gossel, H., 2001. Factors determining the distribution of foraminiferal assemblages in Port Joinville Harbor (Ile d'Yeu, France): the influence of pollution. *Marine Micropaleontology*, 43, pp 75-118.
- Ettajani, H. and Amiard, J.C., 1995. Biodisponibilité de quelques métaux fixés sur les matières en suspension (MES) en milieu estuarien. *Hydroécologie Appliquée*, 1-2(7), pp 75-89.
- Fatela, F. and Taborda, R., 2002. Confidence limits of species proportions in microfossil assemblages. *Marine Micropaleontology*, 45, pp 169-174.
- Förstner, U., 1979. Metal transfer between solid and aqueous phases. In: U. Förstner and G.T.W. Wittmann (Editors), *Metal Pollution in the Aquatic Environment*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 197-270.
- Förstner, U., 1985. Chemical forms and reactivities of metals in sediments. In: R. Lescheber, R.D. Davis and P. L'Hermite (Editors), *Chemical methods for assessing bioavailable metals in slugs and soil*. Elsevier, London, pp. 1-30.
- Goubert, E., 1997. Le groupe *Elphidium excavatum* (Terquem): stratégie adaptative des formes *lidoensis* Cushman et *selseyensis* (Heron-Allen & Earland) en baie de Vilaine (Bretagne, France) et lignée évolutive. *Géobios*, 21, pp 303-310.
- Jackman, A.P., Kennedy, V.C. and Bhatia, N., 2001. Interparticle migration of metal cations in stream sediments as a factor in toxic transport. *Journal of Hazardous Materials*, 82(1), pp 27-41.
- John, D.A., Leventhal, J.S., 1995. Bioavailability of metals. In: E.A. du Bray (Editor), *Preliminary compilation of descriptive geoenvironmental mineral deposit models*. U.S. Geological Survey Open-File Report 95-831, 272 p, pp 10-18.
- Linke, P. and Lutze, G.F., 1993. Microhabitat preferences of benthic foraminifera - a static concept or a dynamic adaptation to optimize food acquisition? *Marine Micropaleontology*, 20, pp 215-234.
- Loeblich, A.R. and Tappan, H., 1988. *Foraminiferal Genera and their Classification*, New York, 970 pp.
- Luoma, S.N., 1983. Bioavailability of trace metals to aquatic organisms - A review. *The Science of the Total Environment*, 28, pp 1-22.
- Millward, R.N., Carman, K.R., Fleeger, J.W., Gambrell, R.P., Powell, R.T., Rouse, M.-A.M., 2001. Linking ecological impact to metal concentrations and speciation: a microcosm experiment using a salt marsh meiofaunal community. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 20(9), pp 2029-2037.
- Samir, A.M. and El-Din, A.B., 2001. Benthic foraminiferal assemblages and morphological abnormalities as pollution proxies in two Egyptian bays. *Marine Micropaleontology*, 41(3-4), pp 193-227.
- Schafer, C.T., 1973. Distribution of foraminifera near pollution sources in Chaleur Bay. *Water, Air, and Soil pollution*, 2, pp 219-233.
- Schafer, C.T., Collins, E.S. and Smith, J.N., 1991. Relationship of Foraminifera and thecamoebian distributions sediments contaminated by pulp mill effluent: Saguenay Fiord, Quebec, Canada. *Micropaleontology*, 17, pp 255-283.
- Scott, D.B. and Medioli, F.S., 1980. Living vs. total foraminiferal populations: their relative usefulness in paleoecology. *Journal of Paleontology*, 54(4), pp 814-831.
- Setty, M.G.A.P. and Nigam, R., 1984. Benthic foraminifera as pollution indices in the marine environment of west

- coast of India. *Rivista Italiana de Paleontologia e Stratigrafia*, 89(3), pp 421-436.
- Sharifi, A.R., Croudace, I.W. and Austin, R.L., 1991. Benthic foraminiferids as pollution indicators in Southampton Water, southern England, UK. *Journal of micropaleontology*, 10(1), pp 109-113.
- Stubbles, S., 1993. Recent benthic foraminiferida as indicators of pollution in Restounguet Creek, Cornwall. Note of poster display at the Annual Conference of the Ussber Society, pp 200-204.
- Stubbles, S.J., Hart, M., Williams, C. and Green, J., 1996. Responses of foraminifera to presence of heavy metal contamination and acidic mine drainage. *The Institution of Mining and Metallurgy*, pp 217-235.
- Walton, W.R., 1952. Techniques for recognition of living foraminifera. *Contribution from the Cushman Foundation*, 3, pp 56-60.
- Zhang, H., Davison, W., Miller, S. and Tych, W., 1995. *In situ* high resolution measurements of fluxes of Ni, Cu, Fe, and Mn and concentrations of Zn and Cd in porewaters by DGT. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(20), pp 4181-4192.

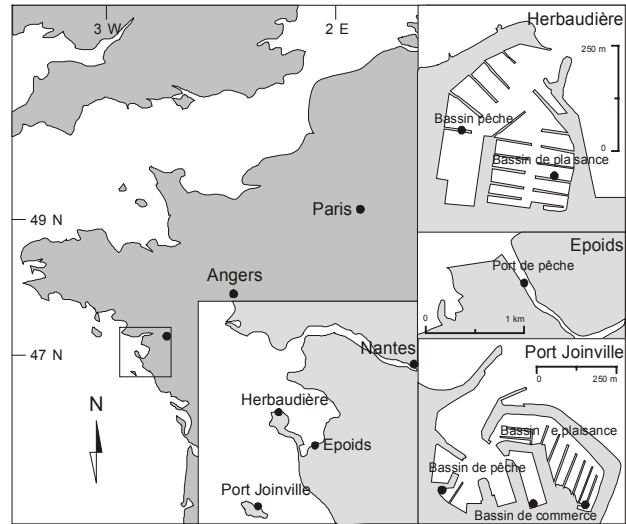


Figure 1. Aire d'étude

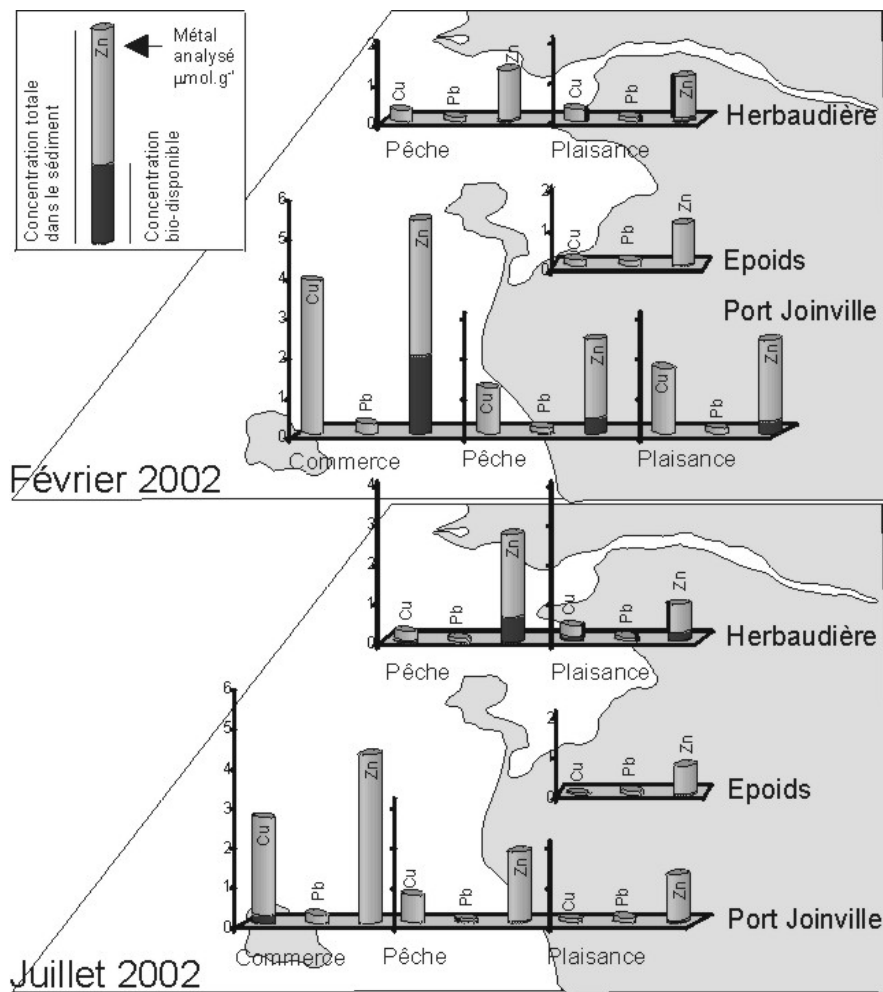


Figure 2. Concentrations totales mesurées dans le sédiment, puis après un test de désorption.

Tableau 1. Analyses physico-chimiques des sédiments.

	FEVRIER 2002				JUILLET 2003								
	EPOIDS		PORT JOINVILLE		HERBAUDIÈRE		EPOIDS		PORT JOINVILLE		HERBAUDIÈRE		
	Pêche	Commerce	Pêche	Plaisance	Pêche	Plaisance	Pêche	Commerce	Pêche	Plaisance	Pêche	Plaisance	
Carbonates (% poids sec)	10	9	14	9	15	14	9	15	9	10	15	12	
Granulométrie (%)	<3,9 µm - (argiles)	47	21	29	31	48	50	39	22	31	41	45	54
	<62,5 µm - (argiles + silts)	99	77	84	89	98	99	99	75	83	95	95	99
	>62,5 µm - (sables)	1	23	16	11	2	1	1	25	17	5	5	1
Matière organique (% poids sec)	18	15	16	14	15	17	16	12	13	15	17	16	
Cuivre (µmol.g ⁻¹)	Dans le sédiment	0,16	3,86	1,16	1,66	0,28	0,31	0,06	2,69	0,70	0,11	0,28	0,39
	Bio-disponible	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,20	0,00	0,00	0,07	0,10
Plomb (µmol.g ⁻¹)	Dans le sédiment	0,13	0,25	0,16	0,15	0,11	0,11	0,12	0,22	0,10	0,14	0,10	0,09
	Bio-disponible	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,03	0,00	0,01	0,00
Zinc (µmol.g ⁻¹)	Dans le sédiment	1,06	5,38	2,38	2,37	1,30	1,13	0,76	4,28	1,80	1,23	2,74	0,93
	Bio-disponible	0,02	1,98	0,41	0,33	0,05	0,10	0,04	0,00	0,04	0,06	0,66	0,22
(Cu+Pb+Zn) (µmol.g ⁻¹)	Dans le sédiment	1,35	9,50	3,70	4,17	1,70	1,55	0,93	7,19	2,60	1,48	3,12	1,41
(Cu+Pb+Zn) (µmol.g ⁻¹)	Bio-disponible	0,03	1,98	0,43	0,33	0,05	0,10	0,08	0,20	0,07	0,06	0,74	0,32

Tableau 3. Corrélations (r et la valeur p associée) calculées entre la somme des concentrations des métaux dans le sédiment (SML), la somme des concentrations bio-disponibles (SMLDi) et les espèces représentant au moins 10% des assemblages dans au moins un des échantillons, ainsi qu'avec la densité et la richesse spécifique. Chaque espèce (issue des assemblages vivants et totaux) est vue au travers des pourcentages (relatif) et de sa densité totale (absolu). Les corrélations significatives à p<0,05 sont en italique.

	FEVRIER 2002				JUILLET 2002											
	Total absolu		Vivant absolu		Total relatif		Vivant relatif		Total absolu		Vivant absolu		Total relatif		Vivant relatif	
	SML	SMLDi	SML	SMLDi	SML	SMLDi	SML	SMLDi	SMLM	SMLDi	SMLM	SMLDi	SMLM	SMLDi	SMLM	SMLDi
Densité	0,512	0,5079	0,6047	0,3872	0,512	0,5079	0,6047	0,3872	<i>0,8821</i>	-0,1239	<i>0,8833</i>	-0,0717	<i>0,8821</i>	-0,1239	<i>0,8833</i>	-0,0717
	p=,299	p=,304	p=,203	p=,448	p=,299	p=,304	p=,203	p=,448	<i>p=,020</i>	p=,815	<i>p=,020</i>	p=,893	<i>p=,020</i>	p=,815	<i>p=,020</i>	p=,893
Richesse spécifique	0,5038	0,6671	0,1291	-0,0308	0,5038	0,6671	0,1291	-0,0308	0,7455	0,1892	-0,0812	0,4878	0,7455	0,1892	-0,0812	0,4878
	p=,308	p=,148	p=,807	p=,954	p=,308	p=,148	p=,807	p=,954	p=,089	p=,720	p=,878	p=,326	p=,089	p=,720	p=,878	p=,326
<i>Bolivina pseudoplicata</i>	0,4686	0,4677	0,0676	-0,1321	-0,0264	0,137	0,0676	-0,1321	<i>0,8783</i>	-0,0946	-0,2342	0,1716	0,0461	0,443	-0,3414	0,296
	p=,349	p=,350	p=,899	p=,803	p=,960	p=,796	p=,899	p=,803	<i>p=,021</i>	p=,859	p=,655	p=,745	p=,931	p=,379	p=,508	p=,569
<i>Brizalina variabilis</i>	0,4892	0,5118	0,4535	0,2154	-0,4266	-0,4045	-0,7693	-0,6508	<i>0,893</i>	-0,1051	<i>0,8738</i>	-0,1419	-0,4125	-0,2395	-0,3889	-0,2572
	p=,325	p=,299	p=,366	p=,682	p=,399	p=,426	p=,074	p=,162	<i>p=,017</i>	p=,843	<i>p=,023</i>	p=,789	p=,416	p=,648	p=,446	p=,623
<i>Cribrøelphidium excavatum</i>	0,6942	0,744	<i>0,9363</i>	<i>0,9636</i>	0,0369	0,1675	0,3981	0,5499	<i>0,891</i>	-0,0711	<i>0,8818</i>	-0,0615	0,7967	-0,0143	0,778	0,0457
	p=,126	p=,090	<i>p=,006</i>	<i>p=,002</i>	p=,945	p=,751	p=,434	p=,258	<i>p=,017</i>	p=,893	<i>p=,020</i>	p=,908	p=,058	p=,979	p=,068	p=,931
<i>Cribrøelphidium getrhi</i>	---	---	---	---	---	---	---	---	<i>0,8899</i>	-0,0824	<i>0,8796</i>	-0,0661	0,5804	-0,1759	0,0891	-0,1015
	---	---	---	---	---	---	---	---	<i>p=,018</i>	p=,877	<i>p=,021</i>	p=,901	p=,227	p=,739	p=,867	p=,848
<i>Cribrøelphidium magellanicum</i>	0,1397	0,2922	---	---	-0,4858	-0,2618	---	---	<i>0,9191</i>	-0,0241	---	---	0,016	0,4834	---	---
	p=,792	p=,574	---	---	p=,329	p=,616	---	---	<i>p=,010</i>	p=,964	---	---	p=,976	p=,331	---	---
<i>Haynesina germanica</i>	---	---	---	---	---	---	---	---	<i>0,8431</i>	-0,1461	-0,4405	-0,2905	-0,3802	-0,3163	-0,5072	-0,3089
	---	---	---	---	---	---	---	---	<i>p=,035</i>	p=,782	p=,382	p=,577	p=,457	p=,541	p=,304	p=,551
<i>Lobatula lobatula</i>	0,415	0,3914	-0,3635	-0,2611	0,205	0,2434	-0,3635	-0,2611	0,6716	-0,2131	<i>0,9397</i>	0,111	0,0866	-0,0321	0,2772	0,9582
	p=,413	p=,443	p=,479	p=,617	p=,697	p=,642	p=,479	p=,617	<i>p=,144</i>	p=,685	<i>p=,005</i>	p=,834	p=,870	p=,952	p=,595	<i>p=,003</i>
<i>Miliolinella subrotunda</i>	-0,3643	-0,3038	<i>0,9618</i>	<i>0,9707</i>	-0,5524	-0,4783	<i>0,9591</i>	<i>0,9868</i>	---	---	---	---	---	---	---	---
	p=,478	p=,558	<i>p=,002</i>	<i>p=,001</i>	p=,256	p=,337	<i>p=,002</i>	<i>p=,000</i>	---	---	---	---	---	---	---	---
<i>Neoconorbina nitida</i>	-0,1418	-0,0058	---	---	-0,4015	-0,2514	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	p=,789	p=,991	---	---	p=,430	p=,631	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
<i>Quinqueloculina seminula</i>	0,3643	0,1752	0,0676	-0,1321	0,0815	-0,1125	0,0676	-0,1321	---	---	---	---	---	---	---	---
	p=,478	p=,740	p=,899	p=,803	p=,878	p=,832	p=,899	p=,803	---	---	---	---	---	---	---	---
<i>Reophax nana</i>	---	---	---	---	---	---	---	---	0,7744	-0,2677	-0,3182	-0,2883	-0,2611	-0,4011	-0,3182	-0,2883
	---	---	---	---	---	---	---	---	<i>p=,071</i>	<i>p=,608</i>	<i>p=,539</i>	<i>p=,580</i>	<i>p=,617</i>	<i>p=,431</i>	<i>p=,539</i>	<i>p=,580</i>

Tableau 2. Abondances relatives (>2%) des espèces, dans au moins un des assemblages totaux, en février et juillet 2002.

FEVRIER 2002	Epoids			Port Joinville			Port Joinville			Port Joinville			Herbaudière			Herbaudière		
	Pêche			Commerce			Pêche			Plaisance			Pêche			Plaisance		
	Mort	Vivant	Total	Mort	Vivant	Total	Mort	Vivant	Total	Mort	Vivant	Total	Mort	Vivant	Total	Mort	Vivant	Total
Densité	581	47	628	6636	336	6972	7392	299	7691	728	496	1224	4508	112	4620	3892	140	4032
Richesse spécifique	38	7	38	43	5	45	37	5	37	25	10	26	36	2	36	33	4	34
<i>Ammonia tepida</i>	4	20	5	1	8	2	1	.	0	3	2	3	1	.	1	.	.	.
<i>Asterigerinata mamilla</i>	1	.	1	3	.	3	2	.	2	.	.	.	.	.	.	4	.	3
<i>Bolivina pseudoplicata</i>	11	.	10	10	.	9	11	.	10	2	2	2	9	.	9	8	.	8
<i>Brizalina variabilis</i>	15	40	17	10	25	11	9	38	10	9	26	16	10	50	11	14	40	15
<i>Bulimina elegans</i>	0	.	0	.	8	0	1	.	0	2	11	6	.	.	.	.	20	1
<i>Cassidulina crassa</i>	4	.	4	3	.	3	4	.	4	1	.	1	3	.	3	5	20	6
<i>Cassidulina laevigata</i>	.	.	.	0	.	0	1	25	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Cibicides refulgens</i>	1	.	1	3	.	2	3	.	2	1	.	1	1	.	1	3	.	3
<i>Criboelphidium excavatum</i>	9	20	10	6	50	8	5	13	5	5	10	7	6	50	7	6	20	6
<i>Criboelphidium getzhi</i>	2	.	1	5	.	4	1	.	0	2	.	1	2	.	2	1	.	1
<i>Criboelphidium gunteri</i>	2	.	2	0	.	0	.	.	.	1	.	1	.	.	.	.	.	.
<i>Criboelphidium magellanicum</i>	12	.	12	5	.	5	2	.	2	2	.	1	10	.	10	7	.	7
<i>Criboelphidium williamsoni</i>	1	.	1	5	.	5	2	.	1	5	3	5	1	.	1	.	.	.
<i>Cribrostomoides jeffreysii</i>	2	.	2	1	.	1	5	.	5	.	.	.	4	.	4	1	.	1
<i>Deuteremina sp.</i>	.	.	.	2	.	2	2	.	1	.	.	.	.	.	.	3	.	3
<i>Eggerelloides scabrus</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	14	.	8	.	.	.	.	.	.
<i>Fissurina lucida</i>	1	.	1	1	.	1	4	.	3	.	.	.	1	.	1	1	.	1
<i>Gavelinopsis praegeri</i>	2	.	2	2	.	2	9	.	9	.	.	.	4	.	4	3	.	3
<i>Haynesina depressula</i>	.	.	.	1	.	1	.	.	.	3	.	2	.	.	.	.	.	.
<i>Haynesina germanica</i>	2	5	2	3	.	3	2	13	2	7	.	4	.	.	.	.	.	.
<i>Lamarckina haliotidea</i>	2	.	1	1	.	1	2	.	2	.	.	.	.	.	.	2	.	2
<i>Lepidodeuteramma ochracea</i>	3	.	3	2	.	2	1	.	0	1	.	1	2	.	2	6	.	6
<i>Lobatula lobatula</i>	2	5	3	7	.	7	9	.	8	.	.	.	10	.	10	1	.	1
<i>Miliolinella subrotunda</i>	2	.	1	.	8	0	1	.	1	1	2	1	6	.	5	2	.	2
<i>Neconorbina nitida</i>	4	.	4	2	.	2	.	.	.	2	.	1	1	.	1	10	.	10
<i>Patellina corrugata</i>	2	.	2	0	.	0	.	.	.	.	.	.	1	.	1	1	.	1
<i>Planorbulina mediterranensis</i>	0	.	0	1	.	1	6	.	5	.	.	.	5	.	5	1	.	1
<i>Pseudononion atlanticum</i>	0	.	0	2	.	2	.	.	.	1	.	1	.	.	.	.	.	.
<i>Quinqueloculina lata</i>	1	.	1	0	.	0	.	.	.	.	.	.	2	.	2	1	.	1
<i>Quinqueloculina seminula</i>	2	.	2	3	.	2	1	.	1	27	42	33	2	.	2	2	.	2
<i>Quinqueloculina sp. 4</i>	.	.	.	0	.	0	.	.	.	.	.	.	2	.	2	.	.	.
<i>Reophax nana</i>	.	.	.	3	.	3	3	13	3	.	2	1	1	.	1	2	.	2
<i>Rosalina cf. vilardeboana</i>	0	.	0	2	.	2	4	.	4	.	.	.	.	.	.	3	.	3
<i>Rosalina spp.</i>	2	.	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	2	3	.	3
<i>Spiroplectinella earlandi</i>	1	.	1	3	.	2	2	.	2	1	2	1	1	.	1	.	.	.
<i>Stairforthia fusiformis</i>	.	.	.	2	.	2	.	.	.	1	.	1	1	.	1	.	.	.
<i>Textularia truncata</i>	.	.	.	5	.	5	7	.	6	1	.	1	4	.	4	1	.	1
Autres espèces	8	10	8	5	0	5	7	0	6	4	0	3	7	0	7	7	0	7

Tableau 2 (suite).

JUILLET 20002	Epoids Pêche			Port Joinville Commerce			Port Joinville Pêche			Port Joinville Plaisance			Herbaudière Pêche			Herbaudière Plaisance		
	Mort	Vivant	Total	Mort	Vivant	Total	Mort	Vivant	Total	Mort	Vivant	Total	Mort	Vivant	Total	Mort	Vivant	Total
Densité	1144	144	1288	45184	8192	53376	19008	384	19392	3744	576	4320	3829	286	4114	165	28	193
Richesse spécifique	34	4	34	50	6	50	46	2	47	42	14	45	43	13	45	35	10	37
<i>Ammonia tepida</i>	6	11	6	.	.	.	1	.	1	.	3	0	.	.	.	.	4	1
<i>Asterigerinata mamilla</i>	.	.	.	2	.	2	2	.	2	1	.	1	1	.	1	4	4	4
<i>Bolivina pseudoplicata</i>	.	.	.	8	.	7	9	.	9	12	8	12	14	8	13	14	14	14
<i>Brizalina difformis</i>	.	.	.	1	.	0	2	.	2	1	.	1	.	.	.	.	.	.
<i>Brizalina variabilis</i>	16	56	20	12	13	12	7	83	9	10	28	12	10	32	11	14	18	15
<i>Bulimina elegans</i>	1	.	1	1	.	1	0	.	0	2	6	2	0	4	1	.	.	.
<i>Buliminella elegantissima</i>	.	.	.	1	.	0	1	.	1	2	.	2	1	.	1	.	4	1
<i>Cassidulina crassa</i>	2	.	2	2	.	1	4	.	4	3	.	3	4	.	3	6	4	6
<i>Cassidulina laevigata</i>	.	.	.	1	.	1	2	.	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Cornuspira involvens</i>	.	.	.	1	.	0	0	.	0	2	6	2	1	.	1	1	.	1
<i>Criboelphidium excavatum</i>	5	6	5	5	81	17	3	.	3	5	8	6	5	16	6	3	39	8
<i>Criboelphidium getrhi</i>	4	.	4	7	2	6	2	.	2	0	.	0	1	.	1	3	4	3
<i>Criboelphidium magellanicum</i>	11	.	10	8	.	7	3	.	3	4	.	3	10	.	10	11	.	9
<i>Criboelphidium williamsoni</i>	1	.	1	6	.	5	1	.	1	3	6	3	2	.	2	1	.	1
<i>Crirostomoides jeffreysii</i>	4	.	4	3	.	2	4	.	4	0	.	0	5	4	5	1	.	1
<i>Fissurina lucida</i>	1	.	1	0	.	0	2	.	2	1	.	1	1	.	1	4	.	4
<i>Gavelinopsis praegeri</i>	6	.	5	5	.	4	7	.	7	3	.	2	5	.	5	4	.	4
<i>Haynesina germanica</i>	10	28	12	2	.	2	1	.	1	1	.	1	1	.	1	1	7	2
<i>Lamarckina halotidea</i>	1	.	1	1	.	1	2	.	2	5	6	5	1	.	1	1	.	1
<i>Lepidodeuterammia ochracea</i>	8	.	7	4	.	3	3	.	3	4	.	4	6	4	6	2	.	2
<i>Lobatula lobatula</i>	1	.	1	5	2	4	11	.	11	3	.	2	4	8	4	7	4	6
<i>Miliolinella subrotunda</i>	2	.	2	2	2	2	2	.	2	1	.	1	1	.	1	1	.	1
<i>Neoconorbina nitida</i>	3	.	2	0	.	0	1	.	1	2	.	1	4	.	4	5	.	4
<i>Planorbulina mediterraneensis</i>	.	.	.	0	.	0	3	.	3	0	.	0	2	.	2	.	.	.
<i>Quinqueloculina seminula</i>	1	.	1	0	2	0	1	.	1	4	6	4	2	4	2	1	.	1
<i>Quinqueloculina stelligera</i>	1	.	1	0	.	0	.	17	0	.	.	.	1	.	1	2	.	2
<i>Reophax nana</i>	3	.	2	3	.	2	3	.	3	10	6	10	1	.	1	1	.	1
<i>Rosalina bradyi</i>	.	.	.	3	.	2	2	.	2	0	.	0	1	.	1	1	.	1
<i>Rosalina spp.</i>	3	.	3	1	.	0	1	.	1	3	.	2	1	.	1	2	.	2
<i>Spiroplectinella earlandi</i>	1	.	1	1	.	1	1	.	1	4	6	4	.	4	0	.	.	.
<i>Textularia truncata</i>	2	.	2	3	.	3	9	.	9	2	.	2	4	.	4	2	.	2
<i>Uvigerina peregrina</i>	.	.	.	0	.	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Autres espèces	8	0	7	13	0	11	10	0	10	11	14	11	10	16	10	9	0	8