

# Transfert, accumulation et régulation des éléments minéraux chez les organismes des sources hydrothermales

Hydrothermalisme  
Minéraux  
Accumulation  
Détoxification  
Organismes

Hydrothermalism  
Minerals  
Accumulation  
Detoxification  
Organisms

Marie-Ange COSSON-MANNEVY <sup>a</sup>, Richard P. COSSON <sup>a</sup>, Françoise GAILL <sup>b</sup>,  
Lucien LAUBIER <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Laboratoire de Zoologie et d'Écologie, Unité Associée 040690 du Centre National de la  
Recherche Scientifique, Université Paris-Sud, bâtiment 442, 91405 Orsay cedex, France.

<sup>b</sup> Centre de Biologie Cellulaire, CNRS, 67 rue Maurice Günsbourg, 94200 Ivry-sur-Seine,  
France.

<sup>c</sup> Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER), 66 avenue  
d'Iéna, 75116 Paris, France.

## RÉSUMÉ

Des spécimens du ver pogonophore *Riftia pachyptila* Jones et de l'annélide polychète *Alvinella pompejana* Desbruyères et Laubier ont été récoltés pendant l'expédition *Biocyarise*, sur la dorsale du Pacifique oriental, à 13°N. Des données quantitatives de concentrations métalliques obtenues chez *Riftia pachyptila* montrent que de nombreux métaux, essentiels ou toxiques, sont très fortement bio-accumulés. Les analyses des différents tissus révèlent que le panache tentaculaire et le trophosome sont les principaux sites d'accumulation. Ces résultats de bioconcentration sont associés à des observations sur la localisation intracellulaire des métaux; leurs rapports avec la composition minérale du milieu sont discutés. Les mécanismes de détoxification ont été recherchés chez ces deux espèces : la présence de granules minéraux ou sphéro cristaux ainsi que la synthèse de protéines de type métallothionéine ont été observées. Le rôle des bactéries chimiolithotrophes dans ces mécanismes est discuté.

*Oceanol. Acta*, 1988. Actes du Colloque Hydrothermalisme, Biologie et Écologie, Paris, 4-7 novembre 1985, 219-226.

## ABSTRACT

### Transfer, accumulation and regulation of minerals in hydrothermal vent organisms

Specimens of the hydrothermal vent tube worm *Riftia pachyptila* Jones and the polychaete *Alvinella pompejana* Desbruyères et Laubier were collected during the *Biocyarise* expedition on the East Pacific Rise at 13°N. Quantitative data describing the concentrations of metals in *Riftia pachyptila* showed that numerous metals are highly concentrated. Analyses of tissues reveal that the plume and the trophosome are the main sites of metal accumulation. Bioconcentration results were associated with observations on intracellular localization of metals; links with the mineral composition of the vent environment are discussed. Mechanisms for metal detoxication were investigated in both species: the presence of metal-rich granules and metallothionein-like proteins were observed. The role of chemolithotrophic bacteria in these mechanisms is discussed.

*Oceanol. Acta*, 1988. Hydrothermalism, Biology and Ecology Symposium, Paris, 4-7 November 1985, Proceedings, 219-226.

## INTRODUCTION

De récentes explorations des dorsales océaniques du Pacifique oriental ont abouti à la découverte de sources hydrothermales actives et de communautés biologiques associées (Corliss *et al.*, 1979). L'environnement hydrothermal est caractérisé par une combinaison de facteurs inhabituels tels que la présence de températures élevées et une richesse exceptionnelle en sulfures polymétalliques. Si, depuis la découverte des biocoénoses hydrothermales, les relations entre les organismes et les facteurs de l'environnement tels que l'oxygène, la température et les sulfures ont fait l'objet de nombreuses études (Jannasch, Wirsen, 1979 ; Arp, Childress, 1981 ; 1983 ; Felbeck, Somero, 1982 ; Powell, Somero, 1983), les interactions entre la richesse métallique de ces sites et les espèces hydrothermales ont suscité à ce jour très peu de travaux.

Alors qu'il existe de nombreuses données sur la bioaccumulation des métaux essentiels ou toxiques chez des organismes marins dont les habitats reflètent des conditions d'enrichissement de source anthropogénique (Phillips, 1980), il paraît essentiel d'examiner ces interactions chez des organismes adaptés à un environnement hydrothermal. Pour comprendre les relations possibles entre ces organismes et les formes minérales apportées par l'activité hydrothermale, une première question doit être posée : ces éléments sont-ils sous une forme biologiquement disponible ? S'ils le sont, les organismes ont développé des stratégies adaptatives ; dans le cas contraire, les caractéristiques physico-chimiques du milieu devraient être prises en compte, ainsi que les bactéries dont le rôle, à cet égard, a probablement été sous-estimé à ce jour. Dans les deux cas, la richesse métallique du milieu aura des incidences directes ou indirectes sur les espèces et par conséquent sur le fonctionnement de l'écosystème.

Pour les organismes hydrothermaux, il existe deux sources potentielles de métaux : une phase dissoute et une phase particulaire ; les éléments dissous pénètrent dans les cellules de tout organisme, puisque la phase dissoute est généralement considérée comme la plus disponible biologiquement, tandis que la phase particulaire prendra une importance accrue chez les espèces hydrothermales pourvues de structures digestives.

Les organismes vivants ont évolué en association avec une grande variété de métaux dont certains sont essentiels au fonctionnement de la cellule : c'est le cas, par exemple, du fer, du cuivre, du zinc ainsi que du nickel et du cobalt, qui interviennent dans de nombreuses synthèses biochimiques. Ces métaux, bien qu'essentiels à l'état de traces, se sont révélés toxiques à de faibles concentrations pour de nombreuses espèces marines.

Dans l'environnement hydrothermal, les sulfures polymétalliques sont essentiellement à base de fer, de manganèse, de cuivre et de zinc avec des traces de cadmium, de plomb, d'argent et de mercure, métaux n'ayant aucune fonction biologique connue. Par conséquent, le milieu hydrothermal, réservoir chimique d'éléments essentiels et toxiques, représente un laboratoire naturel pour l'étude des interactions métaux-organismes. La plupart des sulfures polymétalliques précipitent abondamment, et on pourrait s'attendre à ce que les

éléments dissous représentent une faible proportion des concentrations métalliques totales. A ce jour, il n'existe pas de données sur la chimie des métaux-traces dans les microenvironnements des espèces hydrothermales, et seules des extrapolations à partir de coefficients de mélange des fluides sont possibles ; les premières données de bioaccumulation obtenues chez *Calyptogena magnifica* (Roesijadi, Crecelius, 1984) suggèrent que des métaux, essentiels ou non, se trouvent sous des formes biologiquement disponibles pour l'ensemble des espèces dans le milieu hydrothermal. Dès lors, cette caractéristique chimique doit être prise en compte dans toute approche tendant à cerner les mécanismes et le fonctionnement de cet écosystème original.

Les stratégies adaptatives développées par les organismes hydrothermaux ont pu être influencées par deux caractéristiques : les espèces fixées de manière permanente ne peuvent échapper au flux métallique et à ses fluctuations (par exemple, *Riftia pachyptila* et certains phylums sont connus pour être d'actifs bioaccumulateurs ; c'est le cas des bivalves et des polychètes.

Par ailleurs, il existe différents degrés d'association avec des bactéries chimiosynthétiques capables d'oxyder des composés réduits sulfurés, et deux questions principales peuvent être posées :

- Quelles sont les relations entre les métaux et les organismes hétérotrophes ? Plus particulièrement, quelles sont leurs capacités bioaccumulatrices et quels sont les mécanismes de régulation et/ou détoxification mis en jeu ?
- Quelles sont les relations entre les bactéries et les métaux ? Notamment, leur activité métabolique conduit-elle à un dépôt de substrats minéraux dans les tissus-hôtes, constituant une circonstance aggravante pour l'organisme-hôte ? Les bactéries ont-elles un rôle de détoxification ? De ce point de vue, les différents degrés d'association entre épibiontes ou endobiontes et organismes hétérotrophes sont-ils le reflet de mécanismes diversifiés d'utilisation des sulfures de métaux ?

Le but de ce travail est d'apporter des données de bioaccumulation et de préciser les mécanismes de régulation des métaux chez deux espèces majeures des sources hydrothermales : *Riftia pachyptila* Jones et *Alvinella pompejana* Desbruyères et Laubier.

## MATÉRIELS ET MÉTHODES

Les échantillons ont été récoltés à l'aide du submersible Cyana, au cours de la mission *Biocyarise*, en avril 84, sur la dorsale du Pacifique oriental à 13°N, sur le site Parigo (Desbruyères *et al.* 1982).

## Analyse des métaux-traces dans les organismes

Les échantillons congelés ont été disséqués, lyophilisés puis broyés. Les tissus ont été analysés par spectrophotométrie d'absorption atomique à effet Zeeman (Hitachi Z180-80), après digestion nitrique à chaud (95°C pendant 1 h). Les dosages sont effectués par la technique des ajouts dosés. Le matériel analytique de référence comprend deux échantillons standards : tissus d'huîtres (SRM-1566 de l'US Department of Commerce) et hépatopancreas de homard (TORT 1 du National Research Council, Canada).

### Analyse des métallothionéines

Les tissus congelés sont homogénéisés dans une solution tampon (NaCl 0,9 %, mercaptoéthanol 0,01 %, PMSF 1 mM ; pH = 8,6), dénaturés à 70°C pendant 15 mn puis centrifugés à 27 000 g pendant 30 mn à 4°C. Le surnageant est lyophilisé, homogénéisé dans un tampon formiate (10 mM ; pH= 8,6) et congelé à -80°C. La détection et la quantification des métallothionéines (MT) sont réalisées avec un analyseur polarographique (PAR 171) couplé à une électrode à goutte pendante de mercure (PAR 303), selon la technique décrite par Thompson et Cosson (1984). Le dosage des protéines totales, autres que les métallothionéines, a été réalisé selon la méthode de Bradford (1976). Les métallothionéines ont été purifiées sur colonnes Sephadex G-25 et G-75, à partir de surnageants additionnés de  $^{109}\text{Cd}$ .

### Microanalyse X

L'épiderme et le tube digestif d'*Alvinella pompejana* ont été fixés au glutaraldéhyde 3 % tamponné par le cacodylate de sodium (0,4 M) et post-fixés à l'acide osmique 1 %. La microanalyse X a été réalisée sur coupes fines non colorées déposées sur grilles de cuivre ou de titane. Elle a été effectuée sur un Cameca MBX, type Camebax, équipé d'un accessoire de microscopie électronique à transmission avec une tension de 45 KV, un courant d'échantillon de 150 nA et un diamètre de sonde voisin de 500 nm.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

### Métaux-traces dans les organismes hydrothermaux

Les données de bioaccumulation chez un mollusque hydrothermal, *Calyptogena magnifica* (Roesijadi, Crecelius, 1984), comparées à des résultats obtenus chez un mollusque littoral *Mytilus edulis* (Roesijadi et al., 1984) sont présentées dans le tableau 1. Les concentrations métalliques les plus importantes sont observées chez le mollusque des sources hydrothermales, et les plus faibles chez le mollusque en zone littorale saine ; par ailleurs, plus le milieu est riche en éléments métalliques, plus les concentrations tissulaires sont importantes ; il est intéressant de constater que les facteurs d'accumulation

Tableau 1

Concentrations de métaux-traces dans les tissus du mollusque hydrothermal *Calyptogena magnifica* et du mollusque littoral *Mytilus edulis*. Les concentrations sont exprimées en  $\mu\text{g/g}$  de poids sec de tissu ; les concentrations dans l'eau de mer et les solutions hydrothermales sont exprimées en  $\mu\text{g/l}$ .

Trace metal concentrations in hydrothermal vent clam *Calyptogena magnifica* and in coastal mussel *Mytilus edulis*. Concentrations are calculated as  $\mu\text{g/g}$  dry weight tissue ; concentrations in coastal and hydrothermal sea-waters are calculated as  $\mu\text{g/l}$ .

Métal	a		a		EPR 21° N milieu hydrothermal	Teneurs <i>Calyptogena</i> (X = SD, n = 5)	
	Eau de mer milieu sain	Teneurs moules (X + SD, n = 10)	Eau de mer contaminée	Teneurs moules (X + SD, n = 10)			
Cu	0,73	5,8 ± 0,3	28,5	34 ± 3	80	148 ± 10	
Zn	0,80	89 ± 13	55	430 ± 56	200	2152 ± 495	
Cd	0,116	5,2 ± 0,9	0,97	6,6 ± 1,0	-	9,8 ± 0,8	
Hg	0,0009	0,10 ± 0,005	0,010	0,48 ± 0,03	-	0,41 ± 0,087	

a) d'après Roesijadi et al. (1984).

b) d'après Roesijadi et Crecelius (1984), valeurs estimées.

calculés pour le milieu hydrothermal (Cu = 1800, Zn = 10000) sont comparables à ceux observés dans un milieu contaminé (Cu = 1200, Zn = 7800). Enfin, si on se réfère aux domaines de concentrations létales chez des mollusques et des polychètes marins (tab. 2), on constate, d'une part que ces teneurs sont très proches des valeurs estimées dans le milieu hydrothermal, d'autre part que le degré de tolérance des polychètes est plus important que chez la moule ; ceci est à rapprocher du fait que les polychètes hydrothermaux tels que *Alvinella pompejana*, qui colonisent les cheminées actives, vivent dans les zones les plus riches, contrairement aux autres organismes situés à la périphérie des cheminées. L'ensemble de ces données comparatives, bien que schématisées, suggère l'aspect caricatural de l'environnement hydrothermal du point de vue de sa richesse métallique.

Nous avons étudié la bioaccumulation des éléments métalliques chez le ver vestimentifère *Riftia pachyptila* ; les analyses réalisées dans différents tissus de cette espèce hydrothermale révèlent de fortes bioconcentrations de plusieurs métaux (tab. 3). Les éléments sont concentrés dans des tissus différents : par exemple, le cuivre et le zinc sont uniformément concentrés dans le panache tentaculaire et le trophosome où sont localisés les bactériocytes, tandis que le plomb et le cadmium sont concentrés dans le panache, site principal d'échange entre la solution hydrothermale et l'organisme. Des observations similaires ont été faites par Roesijadi et Crecelius (1984) chez *Calyptogena magnifica* : il n'apparaît pas davantage d'organe dominant dans la concentration de tous les éléments, et certains métaux, comme le cadmium, présentent des teneurs très élevées dans les branchies de ce mollusque où ont été décrites des bactéries endosymbiontes (Cavanaugh et al., 1981 ; Cavanaugh, 1983 ; Fiala-Medioni, 1984). Chez ces deux espèces, les concentrations élevées en cuivre et en zinc reflètent la dominance des sulfures de ces métaux dans les dépôts métallifères caractéristiques du milieu hydrothermal (Edmond et al., 1982).

### Localisation structurale des éléments minéraux

Les éléments minéraux ont été localisés dans les lysosomes et les sphérocristaux des cellules épidermiques du ver de Pompéi. Les cellules épidermiques renferment du zinc et de l'arsenic associés au soufre (tab. 4). Les cellules de la portion médiane du tube digestif d'*Alvinella*

Tableau 2

Concentrations en cuivre et en zinc ( $\mu\text{g/l}$ ) dans différents environnements comparées à leurs teneurs létales pour plusieurs espèces marines.  
*Copper and zinc concentrations ( $\mu\text{g/l}$ ) in various environments compared to their lethal values in some marine species.*

Métal ( $\mu\text{g/l}$ )	Eaux océaniques	Eaux côtières contaminées	Solutions (21° N) hydrothermales	Concentrations létales	
				Mollusques	Polychètes
Cu	1 - 5	20 - 600	80	100 - 200	180 - 250
Zn	1 - 4	50 - 4000	200	> 500	1200 - 1400
Références	Bryan, 1971.	Roesijadi <i>et al.</i> , 1984. Bryan et Hummerstone, 1971.	Roesijadi et Crecelius, 1984.	Talbot et Magee, 1978.	Reish <i>et al.</i> , 1976.

Tableau 3

Concentrations de métaux-traces chez deux espèces hydrothermales ; les résultats sont exprimés en  $\mu\text{g/g}$  de poids sec ( $X + SD$ ).  
*Trace metal concentrations in two hydrothermal vent species ; results are calculated as  $\mu\text{g/g}$  dry weight ( $X + SD$ ).*

Métal	<i>Riftia pachyptila</i>				<i>Calypogena magnifica</i>	
	Panache	Vestimentum	Trophosome	Branchies	Reins	Manteau
Cu	28,48 $\pm$ 0,73	6,73 $\pm$ 1,56	23,7 $\pm$ 3,50	219 $\pm$ 102	601 $\pm$ 278	150,0 $\pm$ 7,2
Zn	433,6 $\pm$ 7,31	134,3 $\pm$ 14,6	313,4 $\pm$ 23,2	1560 $\pm$ 540	443 $\pm$ 128	1772 $\pm$ 1088
Cd	1,91 $\pm$ 0,02	0,14 $\pm$ 0,019	0,04 $\pm$ 0,008	46 $\pm$ 12	1,81 $\pm$ 1,90	1,20 $\pm$ 0,41
Pb	290,5 $\pm$ 17,1	5,84 $\pm$ 2,84	7,82 $\pm$ 0,76	23,2 $\pm$ 14,5	114,5 $\pm$ 47,7	3,3 $\pm$ 0,5
Cr	0,60 $\pm$ 0,20	0,90 $\pm$ 0,20	0,70 $\pm$ 0,17	55,5 $\pm$ 10,7	21,2 $\pm$ 5,3	< 10
Ni	5,90 $\pm$ 3,02	3,47 $\pm$ 2,70	4,89 $\pm$ 1,14	< 1,6	< 1,4	< 2,1
Se	2,1 $\pm$ 1,5	3,4 $\pm$ 1,4	1,7 $\pm$ 1,8	4,51 $\pm$ 0,81	85,7 $\pm$ 50,4	3,09 $\pm$ 0,90
Mn	26,78 $\pm$ 2,0	15,75 $\pm$ 1,72	16,16 $\pm$ 1,53	< 7	< 5	13,3 $\pm$ 2,4
Hg *	5,87	3,95	11,25	< 6	< 10	< 3,7

Analysé par spectrophotométrie d'absorption atomique de la vapeur froide (manuel des analyses chimiques en milieu marin, Centre National pour l'Exploitation des Océans, 1983).

Tableau 4

Éléments minéraux recherchés dans les cellules épidermiques et digestives du ver de Pompéi : 1) portion médiane ; 2) portion postérieure  
 (+ = éléments détectés ; - = éléments non détectés).

*Analysed elements in epidermic and digestive cells of the Pompeii worm : 1) median part ; 2) posterior part (+ = detected ; - = non-detected).*

Éléments	Épiderme dorsal (1)				Épiderme parapodial (2)		
	Cellules digestives à granulations	Bactéries en bouquet	Matrice d'insertion	Granules intra épidermiques : lysosomes et sphérocristes	Bactéries filamenteuses	Granules intra épidermiques : lysosomes et sphérocristes	
S	+	+	+	+	+	+	+
As	-	+	+	+	+	+	+
Zn	+	+	+	+	+	+	+
Fe	+	+	+	+	+	+	+
Cu	-	+	+	+	+	+	+
P	+	+	+	+	+	+	+
Ca	+	+	+	+	+	+	+
Al	+	-	+	+	-	-	+
Pb	-	-	+	-	-	-	-
Si	+	-	+	+	-	-	-

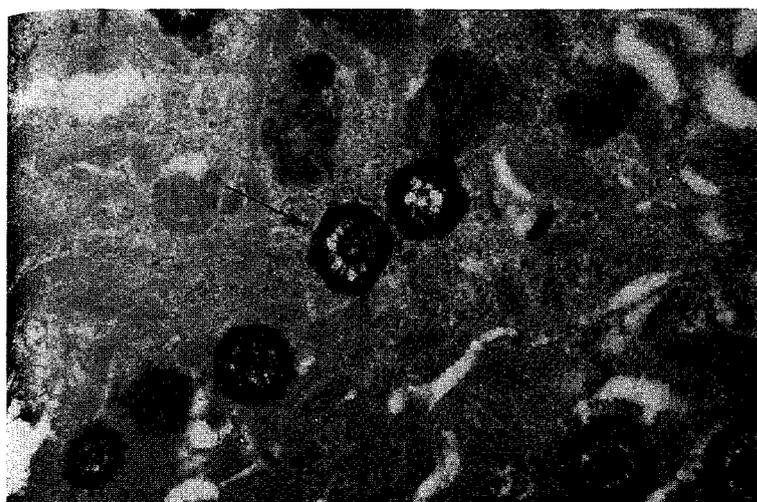


Figure 1  
Sphérocristaux dans l'épiderme buccal de *Alvinella pompejana*  
Mineral granules in the buccal epidermis of *Alvinella pompejana*.

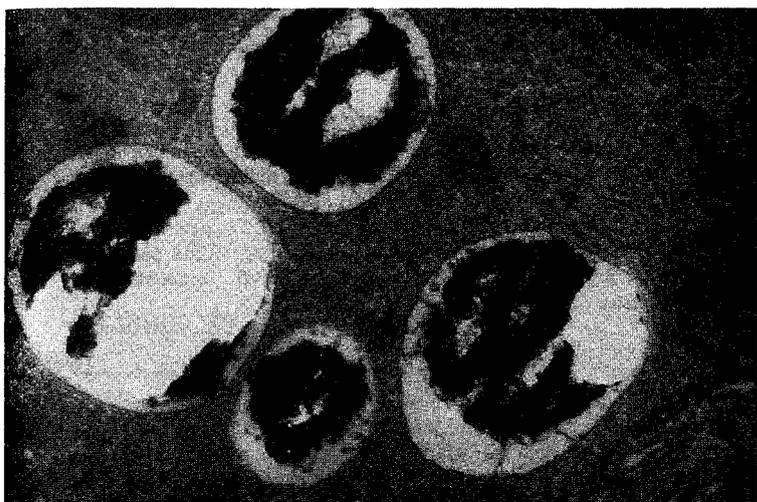


Figure 2  
Concrétions minérales dans les cellules digestives de *Alvinella pompejana*.  
Mineral concretions in digestive cells of *Alvinella pompejana*.

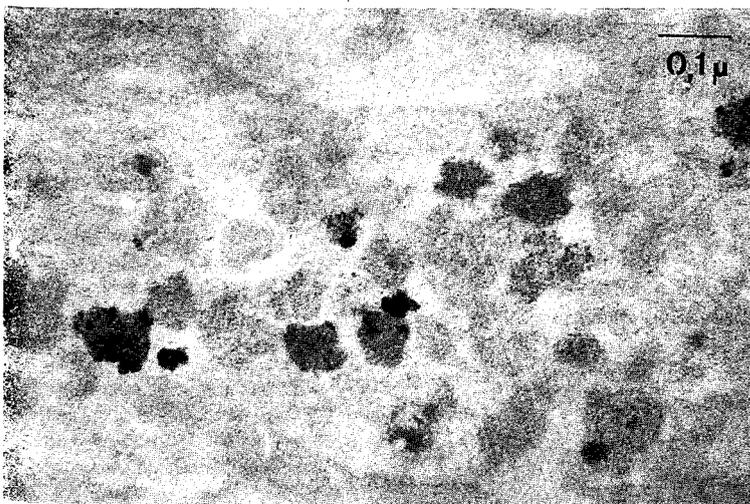


Figure 3  
Granulations minérales dans les lysosomes des cellules épidermiques de *Alvinella pompejana*.  
Mineral granules in lysosomes of epidermic cells of *Alvinella pompejana*.

*pompejana* présentent des granulations qui, au contraire des cellules épidermiques, renferment peu de zinc, de soufre et d'arsenic ; ces granules, s'apparentant à des sphérocristaux, sont riches en fer, ce qui suggère l'ingestion de particules contenues dans le panache des fumeurs noirs. Ces granules sont également riches en phosphore et en calcium, qui sont des éléments classiquement observés dans ce type de structure. Les différents éléments détectés sont présentés dans le tableau 4. Les lysosomes et les sphérocristaux (fig. 1-3) constituent un mécanisme classique de détoxification des métaux (George *et al.*, 1980 ; George, Pirie, 1980), et ont été identifiés chez de nombreux invertébrés marins (Coombs, George, 1978 ; Roesijadi, 1981). La présence de granulations s'apparentant à des sphérocristaux a été signalée dans les bactériocytes de pogonophores littoraux vivant dans des sédiments réduits (Southward, 1982). De telles granulations n'existent pas dans les bactériocytes de *Riftia pachyptila*, mais des granules minéraux sont observés dans les cellules entourant les bactériocytes (Bosch, Grassé, 1984). Nos observations préliminaires montrent que les cellules épidermiques de *Riftia pachyptila* sont dépourvues de sphérocristaux.

#### Protéines de type métallothionéine

Une deuxième forme, plus originale, de compartimentation cellulaire et de détoxification des métaux chez les invertébrés, est la synthèse de protéines soufrées spécifiques, à très forte affinité pour certains métaux tels que le cuivre, le zinc, le cadmium et le mercure. Nous avons détecté des protéines de type métallothionéine dans l'ensemble des tissus des deux espèces hydrothermales *Riftia pachyptila* Jones et *Alvinella pompejana* Desbruyères et Laubier (tab. 5, fig. 4). Les concentrations de métallothionéines sont plus importantes chez l'annélide *Alvinella pompejana*, et paraissent plus abondantes dans les tissus associés à des bactéries : il s'agit, chez *Alvinella pompejana*, de l'épiderme dorsal, des parapodes et du tube digestif (Gaill *et al.*, 1984 a ; Desbruyères *et al.*, 1983) et, chez *Riftia pachyptila*, du trophosome contenant les bactériocytes (Cavanaugh *et al.*, 1981). Ces résultats suggèrent que cette forme d'immobilisation des métaux est à rapprocher de l'activité métabolique bactérienne. L'identification d'une protéine de type métallothionéine chez *Riftia pachyptila* constitue une donnée biochimique importante puisque ces molécules n'ont jamais été détectées jusqu'à présent chez les pogonophores, et souligne l'aspect ubiquiste de ces protéines. La présence de métallothionéines chez *Alvinella pompejana* confirme l'hypothèse de leur existence naturelle chez les annélides (Rice, Chien, 1979 ; Susuki *et al.*, 1980 ; Thompson *et al.*, 1982 ; Young, Roesijadi, 1983). Cette forme protéique a été suggérée chez une autre espèce hydrothermale, *Calypogena magnifica* (Roesijadi, Crecelius, 1984).

L'hypothèse d'un rôle de détoxification de certains métaux par les métallothionéines a été avancée par de nombreux auteurs (Brown, 1978). Leur intervention a été notamment étudiée dans le cas où des espèces marines sont exposées à des contaminations métalliques (Brown, 1978 ; Bouqueneau, 1979 ; Roesijadi, 1982). Dans notre étude, la détection de protéines de type métallothionéine chez des

organismes marins soumis à un environnement riche en éléments minéraux corrobore ces inductions expérimentales (tab. 6). Cependant, le rôle biologique de ces protéines, dont l'ubiquité phylétique laisse penser

Tableau 5

Détection et quantification de protéines de type métallothionéine dans les tissus de deux espèces hydrothermales *Alvinella pompejana* et *Riftia pachyptila*.

*Detection and quantification of metallothionein-like proteins in two hydrothermal vent species tissues : Alvinella pompejana and Riftia pachyptila.*

Espèce hydrothermale	Métallothionéines (MT) mg MT/g protéines totales
<i>Riftia pachyptila</i>	
Panache tentaculaire	3,2
Vestimentum	4,7
Trophosome	5,1
<i>Alvinella pompejana</i>	
Épiderme ventral	12,0
Épiderme dorsal	38,3
Région antérieure	4,5
Tube digestif	21,7
Parapodes	13,6

Tableau 6

Présence de protéines de type métallothionéines chez des invertébrés marins.  
*Occurrence of metallothionein-like proteins in marins invertebrates.*

Espèces	Nature de l'exposition	Type de l'échantillon	Références
<b>Littorales</b>			
<i>Mytilus edulis</i>	Lab-Cd	Animal entier	Noël-Lambot (1976)
	Lab-Hg	Branchies, glandes digestives	Roesijadi <i>et al.</i> (1982)
	Terrain-Cd	Animal entier	Talbot et Magee (1978)
	Terrain-Hg	Branchies, glandes digestives	Roesijadi <i>et al.</i> (1982)
<i>Eudystilia vancouveri</i>	Lab-Cu	Couronne branchiale	Young et Roesijadi (1983)
<i>Glycera dibranchiata</i>	Lab-Cd	Fluides coelomiques	Rice et Chien (1979)
<b>Hydrothermales</b>			
<i>Alvinella pompejana</i>	Sources hydrothermales	Tube digestif, branchies parapodes, épidermes	Cosson <i>et al.</i> (1986)
<i>Riftia pachyptila</i>	Sources hydrothermales	Panache, vestimentum trophosome	Cosson <i>et al.</i> (1986)
<i>Calyptogena magnifica</i>	Sources hydrothermales	?	Roesijadi et Crecelius (1984)

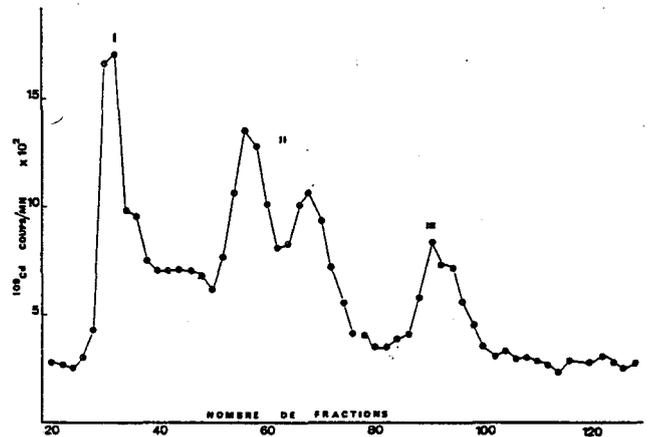


Figure 4

Profil chromatographique sur colonne Sephadex G-75 décrivant la distribution du Cd 109 dans l'extrait du vestimentum de *Riftia pachyptila*. Pic I : protéines de haut poids moléculaire ; pic II : protéines de type métallothionéine ; pic III : Cd libre.

*Chromatographic profile on Sephadex G-75 describing the distribution of Cd 109 in vestimentum extract of Riftia pachyptila. Peak I : high molecular weight proteins ; Peak II : metallothionein-like proteins ; peak III : free Cd.*

qu'elles sont très anciennes, reste ambigu (Karim, 1985) ; leur fonction primaire serait à relier à la régulation du zinc et du cuivre (Vallee, 1978), métaux présents dans les tissus du ver de Pompéi (Gaill *et al.*, 1984 b).

## CONCLUSIONS

L'ensemble de ces observations sur les relations métaux-organismes confirme que des espèces hydrothermales ont développé plusieurs stratégies adaptatives pour stocker, immobiliser ou réguler les éléments métalliques apportés sous forme particulaire ou dissoute par l'activité hydrothermale.

Les résultats de bioaccumulation et la détection de protéines de type métallothionéine dans les tissus associés à des bactéries, soulèvent la question fondamentale du rôle de ces dernières dans ces mécanismes. D'une part, l'interprétation de la correspondance entre l'importance des métallothionéines et la présence des bactéries reste difficile à préciser : s'agit-il de métallothionéine d'origine bactérienne ? Ceci n'est pas exclu puisque des protéines de ce type ont été identifiées chez des procaryotes (Olafson *et al.*, 1979).

D'autre part, les processus de régulation/détoxification s'exercent à l'égard d'éléments pouvant avoir des origines variées ainsi chez *Alvinella pompejana*, les bactéries ne sont pas directement à l'origine des accumulations

minérales observées dans les tissus puisqu'elles sont épibiontes ; par contre, l'hypothèse de leur intervention n'est pas exclue chez *Riftia pachyptila*. On sait qu'une partie des microorganismes présents dans le milieu des sources hydrothermales est à l'origine d'accumulations minérales sur des surfaces naturelles ou artificielles (Jannash, Wirsén, 1981) ; de telles accumulations sont d'ailleurs observées tout autour des épibiontes du ver de Pompéi (Gaill *et al.*, 1984 b). Ainsi, par leur métabolisme, les endosymbiotes de *Riftia pachyptila* pourraient induire de telles accumulations, que l'animal devrait ensuite excréter.

Les cellules les plus externes de la trophothèque décrites par Bosch et Grassé (1984) pourraient jouer un rôle dans cette excrétion, à moins que les granules minéraux ne soient les formes d'immobilisation des éléments minéraux apportés par l'activité métabolique du pogonophore.

A ce jour, il n'existe pas encore de données sur la chimie des métaux-traces dans les microenvironnements des espèces hydrothermales, et toute discussion tendant à relier les concentrations métalliques dans les organismes à la chimie des fluides hydrothermaux ne peut être que spéculative ; néanmoins, les résultats obtenus ici et les questions qu'ils soulèvent mettent en relief l'intérêt des recherches sur la composante métallique des microenvironnements et son interaction avec la composante biologique des sources hydrothermales.

## RÉFÉRENCES

- Arp A.J., Childress J.J., 1981. Blood function in the Vestimentiferan Tube worm, *Science*, 213, 342-344.
- Arp A.J., Childress J.J., 1983. Sulfide binding by the blood of hydrothermal vent tube worm *Riftia pachyptila* Jones, *Science*, 219, 295-297.
- Bouqueneau J.M., 1979. Evidence for the protective effect of metallothionein against inorganic mercury injuries, *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 23, 218-219.
- Bosch C., Grassé P.P., 1984. Cycle partiel des bactéries chimioautotrophes symbiotiques et leurs rapports avec les bactériocytes chez *Riftia pachyptila* (pogonophore vestimentifère), *C.R. Acad. Sci., sér. III*, 299, 371-376 ; 413-419.
- Bradford M.M., 1976. Rapid and sensitive method for quantitation of microgram quantities of protein utilizing principle of protein-dye binding, *Anal. Biochem.*, 72, 244-248.
- Brown D.A., 1978. Toxicology of trace metals : metallothionein production and carcinogenesis, *Ph. D., Univ. British Columbia, Canada*, 271 p.
- Bryan G.W., 1971. Effects of heavy metals on marine and estuarine organisms, *Proc. R. Soc. London, Ser. B*, 177, 389-410.
- Bryan G.W., Hummerstone L.G., 1971. Adaptation of the polychaete *Nereis diversicolor* to estuarine sediments containing high concentrations of heavy metals, *J. Mar. Biol. Assoc. UK*, 51, 845-863.
- Cavanaugh C.M., 1983. Symbiotic chemoautotrophic bacteria in marine invertebrates from sulfide-rich habitats, *Nature*, 302, 58-61.
- Cavanaugh C.M., Gardiner S.L., Joes M.L., Jannash H.W., Waterbury J.B., 1981. Prokaryotic cells in the hydrothermal vent tube worm *Riftia pachyptila* Jones : possible chemoautotrophic symbionts, *Science*, 213, 340-342.
- Coombs T.L., Georges S.G., 1978. Mechanisms of immobilization and detoxication of metals in marine organisms, in *Proceedings of the 12 th European Symposium on Marine Biology*, edited by Mac Lusk D.S., Berry A.J., Pergamon Press, Oxford, UK, 179-187.
- Corliss J.B., Dymond J., Gordon L.I., Edmond J.M., Von Hersen R.P., Ballard R.D., Green K., Williams D., Balmbridge A., Crane K. Van Andel T.H., 1979. Submarine thermal springs on the Galapagos Rift, *Science*, 203, 1073-1083.
- Cosson-Mannevy M.A., Cosson R.P., Gaill F., 1986. Mise en évidence de protéines de type métallothionéine chez deux invertébrés des sources hydrothermales, le pogonophore vestimentifère *Riftia pachyptila* et l'annélide polychète *Alvinella pompejana*, *C.R. Acad. Sci., Sér. III, T 302*, 9, 347-352.
- Desbruyères D., Crassous P., Grassé J., Khripounoff A., Reyss D., Rio M., Van Praet M., 1982. Données écologiques sur un nouveau site d'hydrothermalisme actif de la ride du Pacifique Oriental, *C.R. Acad. Sci. sér. III*, 295, 485-494.
- Desbruyères D., Gaill F., Laubier L., Prieur D., Rau G.H., 1983. Unusual nutrition of the Pompei Worm *Alvinella pompejana* from a hydrothermal vent environment. SEM-TEM <sup>13</sup>C and <sup>15</sup>N evidence, *Mar. Biol.*, 75, 201-205.
- Edmond J.M., Von Damm K.L., Mc Duff R.E., Measures C.L., 1982. Chemistry of hot springs on the East Pacific Rise and their effluent dispersal, *Nature*, 297, 187-191.
- Felbeck H., Somero G., 1982. Primary production in deep-sea hydrothermal vent organisms : role of sulfide oxidizing bacteria, *Trends Biochem. Sci.*, 7, 6, 201-204.
- Fiata-Medioni A., 1984. Mise en évidence par microscopie électronique à transmission de bactéries symbiotiques dans la branchie de mollusques bivalves des sources hydrothermales profondes, *C.R. Acad. Sci., Sér. III*, 298, 17, 487-492.
- Gaill F., Desbruyères D., Prieur D., Gourret J.P., 1984 a. Mise en évidence de communautés bactériennes épibiontes du ver de Pompéi (*Alvinella pompejana*), *C.R. Acad. Sci., Sér. III*, 298, 553-558.
- Gaill F., Halpern S., Quintana C., Desbruyères D., 1984 b. Présence intracellulaire d'arsenic et de zinc associés au soufre chez une annélide polychète des sources hydrothermales (*Alvinella pompejana*), *C.R. Acad. Sci., Sér. III*, 298, 12, 331-336.

- Georges S.G., Pirie B.J.S., 1980. Metabolism of zinc in the mussel *Mytilus edulis* (L.): a combined ultrastructural and biochemical study, *J. Mar. Biol. Assoc. UK*, 60, 575-590.
- Georges S.G., Pirie B.J.S., Coombs T.L., 1980. Isolation and elemental analysis of metal-rich granules from the kidney of the scallop *Pecten maximus* (L.), *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 42, 143-156.
- Jannasch H.W., Wirsen C.O., 1979. Chemosynthetic primary production of East Pacific sea-floor spreading centers, *BioScience*, 29, 592-598.
- Jannasch H.W., Wirsen C.O., 1981. Morphological survey of microbial mats near deep-sea hydrothermal vents, *Appl. Environ. Microbiol.*, 41, 528-538.
- Karim M., 1985. Metallothioneins: proteins in search of functions, *Cell*, 41, 9-10.
- Noel-Lambot F., 1976. Distribution of Cadmium, Zinc and Copper in the mussel *Mytilus edulis*. Existence of Cadmium-binding proteins similar to metallothioneins, *Experientia*, 32, 324-326.
- Olafson R.W., Abel K., Sim R.G., 1979. Prokaryotic metallothionein preliminary characterization of a blue-green alga metal-binding protein, *Biochem. Biophys. Res. Comm.*, 89, 36-43.
- Phillips D.J.H., 1980. *Quantitative Aquatic Biological indicators*, edited by Applied Science Publishers, Ltd, London, 448 p.
- Powell M.A., Somero G.N., 1983. Blood components prevent sulfide poisoning of respiration of the hydrothermal vent tube worm *Riftia pachyptila*, *Science*, 219, 297-299.
- Reish D.J., Martin J.M., Piltz F.M., Word J.Q., 1976. The effects of heavy metals on laboratory populations of two polychaetes with comparisons to the water quality conditions and standards in Southern California marine waters, *Water Res.*, 10, 299-302.
- Rice M.A., Chlen P.K., 1979. Uptake, binding, clearance of divalent Cadmium in *Glycera dibranchiata* (Annelida polychaeta), *Mar. Biol.*, 53, 33-39.
- Roesijadi G., 1981. The significance of low molecular weight metallothionein-like proteins in marine invertebrates: current status, *Mar. Environ. Res.*, 4, 167-179.
- Roesijadi G., 1982. Uptake and incorporation of mercury into mercury-binding proteins of gills of *Mytilus edulis* as a function of time, *Mar. Biol.*, 66, 151-152.
- Roesijadi G., Crecellus E.A., 1984. Elemental composition of the hydrothermal vent clam *Calypotgena magnifica* from the East Pacific Rise, *Mar. Biol.*, 83, 155-161.
- Roesijadi G., Young J.S., Drum A.S., Gurtissen J.M., 1984. Behavior of trace metals in *Mytilus edulis* during a reciprocal transplant experiment, *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 18, 155-170.
- Southward E.C., 1982. Bacterial symbionts in Pogonophora, *J. Mar. Biol. Assoc. UK*, 62, 889-906.
- Susuki K.T., Yamamura M., Mori T., 1980. Cadmium-binding proteins induced in the earthworm, *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 14, 159-163.
- Talbot V., Magee R.J., 1978. Naturally occurring heavy metal binding proteins in invertebrates, *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 7, 73-81.
- Thompson J.A.J., Cosson R.P., 1984. An improved method for the quantitation of metallothioneins in marine organisms, *Mar. Environ. Res.*, 2, 2, 137-152.
- Thompson K.A., Brown D.A., Chapman P.M., Brinkurst R.O., 1982. Histopathological effects and Cadmium-binding protein synthesis in the marine oligochaete *Monopylephorus cuticulatus* following a Cadmium exposure, *Trans. Am. Microsc. Soc.*, 101, 10-26.
- Vallee B., 1978. Metallothionein, historical review and perspectives, in: *Metallothionein*, edited by J.H.R. Kagı and M. Nordberg, Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Stuttgart, 19-39.
- Young J.S., Roesijadi G., 1983. Reparatory adaptation to copper-induced injury and occurrence of a copper-binding protein in the polychaete *Eudystilia vancouveri*, *Mar. Pollut. Bull.*, 14, 1, 30-32.