

## High levels of natural radioactivity in hydrothermal vent polychaetes

Robin CHERRY, Daniel DESBRUYERES, Mireille HEYRAUD and Canice NOLAN

**Abstract** – Concentrations of the natural radionuclides  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in hydrothermal vent polychaetes *Alvinella* and *Paralvinella* are reported and are compared with those in non-vent polychaetes. In the vent animals concentrations of  $^{210}\text{Pb}$  are exceptionally high and the  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$  activity ratio is very low. The high concentrations and the low ratios very probably reflect the ingestion of sulphide mineral particles by the organism. The small polychaetes must be subject to a high natural radiation dose, and the same may be true for other organisms which are found in close proximity to hot vent fluids.

### Hauts niveaux de radioactivité naturelle chez des polychètes de sources hydrothermales

**Résumé** – Nous rapportons ici les concentrations des radionucléides naturels  $^{210}\text{Po}$  et  $^{210}\text{Pb}$  mesurées chez des polychètes des sources hydrothermales *Alvinella* et *Paralvinella* et nous les comparons à celles trouvées chez d'autres polychètes. Chez les animaux des sources hydrothermales les concentrations de  $^{210}\text{Pb}$  sont exceptionnellement élevées et le rapport d'activité  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$  est très bas. Ces hautes concentrations et rapports bas très probablement reflètent l'ingestion de particules minérales de sulfures par ces organismes. Les petits polychètes doivent être sujets à de hautes doses d'irradiation naturelle; il peut en être de même pour d'autres organismes vivant à proximité des fluides hydrothermaux chauds.

**Version française abrégée** – Les communautés d'organismes inhabituels que l'on trouve autour des sources hydrothermales profondes sont soumises à des fluctuations rapides des conditions hydrologiques ([1], [2]). D'autre part, les fluides des sources hydrothermales sont riches en sulfures métalliques et en  $^{222}\text{Rn}$ , radionucléide naturel ( $T_{1/2} = 3,82$  jours) et ses descendants  $^{210}\text{Pb}$  ( $T_{1/2} = 22,3$  ans) et  $^{210}\text{Po}$  ( $T_{1/2} = 138,4$  jours) ([3], [4]). On sait que les organismes marins (ne provenant pas d'un environnement hydrothermal) sont exposés à des doses d'irradiation naturelle élevées, comparées à celles reçues par l'homme, à cause des concentrations en  $^{210}\text{Po}$  qu'ils contiennent ([5] à [7]). De plus, il a été montré que le  $^{210}\text{Po}$  peut être utile comme traceur des régimes alimentaires des organismes marins ([7] à [9]). Des mesures de  $^{210}\text{Po}$  et  $^{210}\text{Pb}$  dans les organismes vivant dans l'environnement des sources hydrothermales nous ont semblé, de ce fait, dignes d'intérêt.

Nous rapportons ici des données sur le  $^{210}\text{Po}$  et  $^{210}\text{Pb}$  mesurés chez des polychètes des genres *Alvinella* et *Paralvinella*, provenant de la Dorsale Est Pacifique (E.P.R.). Ces animaux vivent très près des fluides chauds émergeant des sources hydrothermales; ce sont des organismes sédentaires [10] qui obtiennent leur nourriture en utilisant les bactéries associées aux particules de sulfure [11]. Les échantillons ont été récoltés sur l'E.P.R. par les submersibles *Nautile* et *Alvin*. Les concentrations des deux radionucléides ont été mesurées par une technique standard de comptage alpha total ([12] à [14], [7]).

Les concentrations en  $^{210}\text{Po}$  et  $^{210}\text{Pb}$  des polychètes des sources hydrothermales sont présentées dans le tableau I. Les données publiées pour le  $^{210}\text{Po}$  et le  $^{210}\text{Pb}$  chez les polychètes en général sont très rares ([15], [16]), aussi avons-nous mesuré ces deux radionucléides dans neuf échantillons de polychètes provenant d'Afrique du Sud. Les résultats obtenus dans les trois groupes sont résumés dans le tableau II. Les concentrations élevées en  $^{210}\text{Pb}$  ainsi que les rapports d'activité  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$  bas sont frappants chez les polychètes

Note présentée par Lucien LAUBIER.

des sources hydrothermales. Pour les deux radionucléides les concentrations les plus élevées sont, en général, trouvées chez les animaux les plus petits; une telle tendance a déjà été remarquée et discutée pour le  $^{210}\text{Po}$  et le  $^{210}\text{Pb}$  dans le milieu marin [17].

Quand on compare ces données avec celles obtenues dans d'autres taxa provenant d'autres environnements, les concentrations en  $^{210}\text{Pb}$  sont encore plus frappantes. Sur plus de 350 données de  $^{210}\text{Pb}$  chez des organismes marins entiers, la valeur médiane est d'environ  $0,6 \text{ dpm g}^{-1}$  poids sec, le maximum est de  $50 \text{ dpm g}^{-1}$  [15] et seulement trois valeurs ([7], [15], [Heyraud, non publié]) se trouvent au-dessus de la concentration la plus basse de  $25 \text{ dpm g}^{-1}$  trouvée chez les polychètes des sources hydrothermales. Pour le  $^{210}\text{Po}$ , sur plus de 430 données obtenues dans d'autres taxa, la valeur médiane est d'environ  $16 \text{ dpm g}^{-1}$  poids sec. La plupart des polychètes des sources hydrothermales contiennent du  $^{210}\text{Po}$  à des niveaux comparables, mais chez les deux plus petits animaux les concentrations sont beaucoup plus élevées. Les  $1\ 140 \text{ dpm g}^{-1}$  trouvées chez *Paralvinella grasslei* ne sont en fait dépassées que par une seule autre valeur obtenue dans un organisme entier, viz  $1\ 398 \text{ dpm g}^{-1}$  mesurées chez une crevette pénaïdée [7]. Les rapports  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$  mesurés chez les polychètes des sources hydrothermales sont exceptionnellement bas comparés à ceux trouvés dans d'autres taxa provenant d'un environnement différent, où, sur plus de 280 données, ce rapport a une valeur médiane d'environ 32 et n'est inférieur à 1,8 que dans deux cas. Les contenus élevés en  $^{210}\text{Pb}$  et les rapports  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$  bas chez les polychètes des sources hydrothermales reflètent sans doute le fait que ces polychètes ingèrent des particules minérales de sulfure et se nourrissent des bactéries qui leur sont associées [11]; les particules des sources hydrothermales ont en effet des concentrations en  $^{210}\text{Pb}$  élevées, entre 130 et  $777 \text{ dpm g}^{-1}$  et des rapports  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$  voisins de 1 ([19], [3]). Des données additionnelles dans d'autres groupes d'animaux des sources hydrothermales pourraient élargir notre connaissance sur les régimes alimentaires des communautés de ces environnements.

Nos données indiquent que les plus petits polychètes des sources hydrothermales contiennent à la fois  $^{210}\text{Po}$  et  $^{210}\text{Pb}$  à des niveaux qui sont typiquement au-dessus de  $100 \text{ dpm g}^{-1}$  poids sec. Ces concentrations impliquent que de tels animaux doivent être soumis à une dose d'irradiation naturelle élevée dont la plus grande partie est due à l'émetteur-alpha  $^{210}\text{Po}$ . En prenant un rapport poids sec/poids humide de cinq et un facteur de qualité [20] de 20 pour la particule alpha du  $^{210}\text{Po}$ ,  $100 \text{ dpm g}^{-1}$  sec impliquent — de la part du seul  $^{210}\text{Po}$  — une dose d'irradiation moyenne pour l'organisme entier de  $0,18 \text{ Sv an}^{-1}$  ( $18 \text{ rem an}^{-1}$ ), soit environ 100 fois la dose moyenne d'irradiation naturelle totale reçue par l'homme [21].

L'usage, chez les organismes marins, du facteur de qualité — et du Sievert — qui, strictement parlant, s'appliquent à l'espèce humaine, nous semble indiqué et légitime; cette question a été discutée en détail dans une récente publication de l'Agence internationale de l'Énergie atomique [22]. Pour le *Paralvinella grasslei* de notre tableau I on peut calculer une dose de  $2 \text{ Sv an}^{-1}$ . Dans l'environnement des sources hydrothermales les concentrations de  $^{222}\text{Rn}$  sont encore plus élevées que celles de  $^{210}\text{Pb}$  ou  $^{210}\text{Po}$  et il est possible que le  $^{222}\text{Rn}$  et ses descendants émetteurs-alpha à vie courte  $^{218}\text{Po}$  ( $T_{1/2}=3,05 \text{ mn}$ ) et  $^{214}\text{Po}$  ( $T_{1/2}=164 \mu\text{s}$ ) contribuent aussi de façon significative à la dose d'irradiation naturelle reçue par les organismes qui y vivent. Le rôle possible joué par les radiations naturelles dans l'évolution des communautés des sources hydrothermales pourrait être un domaine d'investigation intéressant.

---

INTRODUCTION. — Exuberant communities of unusual organisms thrive around the hydrothermal vents at sea-floor spreading centres in the deep ocean [1]. They are subject

to high pressure and rapid fluctuations of hydrologic conditions ranging from cold and oxygenated seawater to warm anoxic and acidic fluid loaded with metallic sulphides [2]. The vent fluid is also rich [3] in the natural radionuclide  $^{222}\text{Rn}$  ( $T_{1/2} = 3.82$  days) which is emitted from the vent chimneys and which decays rapidly to its descendants  $^{210}\text{Pb}$  ( $T_{1/2} = 22.3$  years) and  $^{210}\text{Po}$  ( $T_{1/2} = 138.4$  days). Concentrations of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in hot vent fluids are high, at about  $10 \text{ dpm kg}^{-1}$  ([4], [3]), *i.e.* two orders of magnitude higher than in normal seawater. Ordinary (non-vent) marine organisms concentrate  $^{210}\text{Po}$ , and to a lesser extent  $^{210}\text{Pb}$ , and are, as a result, exposed to natural radiation doses which are high by human standards ([5] to [7]);  $^{210}\text{Po}$  has moreover been shown to be useful as an indicator of marine organism diet ([7] to [9]). The natural radionuclide situation in vent organisms seemed to deserve investigation. Here we report data for  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in vent polychaetes from the East Pacific Rise.

**MATERIALS AND METHODS.** — Alvinellid polychaetes, genera *Alvinella* and *Paralvinella*, are found very close to the hot fluids emerging from hydrothermal vents; they are sedentary organisms [10]; they derive their food from the bacteria attached to the sulphide particles [11]. The samples which we measured were collected on the East Pacific Rise on two occasions, *viz.* November/December 1987 on cruise *Hydronaut* of the French submersible *Nautille* and in June 1990 on cruise 125, leg 7 on the *R.V. Atlantis II* with the American submersible *Alvin*. Depending on the minimum sample size required, specimens (sampled in one locality during a single cruise) were pooled or not. All Alvinellids were sampled in a single very restricted area, 300 m in length and 30 m in width (sites *Genesis*, *Parigo* and *Totem*). South African specimens belong to Nereidae (*Pseudonereis variegata*), Polynoidae (*Lepidonotus semitectus*), Arabellidae (*Arabella iricolor*) and Eunicidae (*Marphysa sp*) for carnivorous animals, and Sabellidae (*Potomilla reniformis*) for filter feeding animals. Concentrations of the two nuclides were measured by a standard technique involving acid-digestion of sample material after washing to remove externally attached sulphide particles, spontaneous deposition of  $^{210}\text{Po}$  from solution onto a silver disc, and alpha-counting ([12] to [14], [7]). Storage of the sample solution for about four months allowed in-growth of  $^{210}\text{Po}$  from  $^{210}\text{Pb}$  in the sample, and a second deposition and counting enabled  $^{210}\text{Po}$  and  $^{210}\text{Pb}$  concentrations at the time of collection to be calculated. In two of the samples an upper estimate of the concentration of  $^{226}\text{Ra}$ , the parent of  $^{222}\text{Rn}$ , was obtained by gamma-spectrometry using a  $5.7 \times 6.4$  cm coaxial Ge(Li) detector.

**RESULTS AND DISCUSSION.** — Concentrations of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in the vent polychaetes are given in Table I. Published data for polychaetes from non-vent locations are, to our knowledge, limited to three samples collected off the Oregon coast ([15], [16]). To supplement these we measured  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in nine samples of South African polychaetes collected in Langebaan Lagoon, near Cape Town. Individual animal weights were not specified for the Oregon samples but for the South African specimens they were similar to those for the vent polychaetes, ranging from 0.017 to 1.88 g dry weight. The data from the three groups of polychaetes are summarized in Table II. The high concentrations of  $^{210}\text{Pb}$  in the vent animals as compared to the other two groups are immediately obvious, as are the low  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$  ratios; the  $^{210}\text{Po}$  concentrations tend to be high, but less markedly so than those for  $^{210}\text{Pb}$ . For both nuclides the tendency for the smaller animals to contain higher concentrations is clear; this applies to

TABLE I

Concentrations of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in whole Alvinellid polychaetes from a hydrothermal vent. W = mean dry weight per individual animal; n = number of individuals per sample; dpm = disintegration per minute;  $1 \text{ dpm g}^{-1} = 16.7 \text{ Bq kg}^{-1}$ . Errors quoted are standard deviations calculated from the statistical counting errors, propagated to include counting after both the first and second depositions. For two of the samples the analysis was performed too long after sample collection for the concentration of  $^{210}\text{Po}$  ( $T_{1/2} = 138.4$  days) to be detectable. Gamma-spectrometric measurements of  $^{226}\text{Ra}$  gave  $20 \pm 30 \text{ dpm g}^{-1}$  dry weight in the *P. grasslei* sample and  $40 \pm 30 \text{ dpm g}^{-1}$  dry weight in the 0.537 g *A. caudata* specimen. These measurements used the 186 keV gamma-ray of  $^{226}\text{Ra}$ ; they must be considered as upper estimates because they could not be corrected for possible contributions from the 185 keV gamma-ray of  $^{235}\text{U}$ .

Concentrations de  $^{210}\text{Po}$  et  $^{210}\text{Pb}$  chez des polychètes Alvinellidés entiers d'une source hydrothermale. W = poids sec moyen par animal; n = nombre d'individus par échantillon; dpm = désintégration par minute;  $1 \text{ dpm g}^{-1} = 16.7 \text{ Bq kg}^{-1}$ . Les erreurs sont les écarts-types calculés sur les erreurs statistiques de comptage, propagées pour inclure le comptage après la première et la deuxième déposition. Pour deux des échantillons l'analyse a été faite trop longtemps après la récolte des échantillons pour que la concentration en  $^{210}\text{Po}$  ( $T_{1/2} = 138,4$  jours) soit mesurable. Des mesures de spectrométrie gamma du  $^{226}\text{Ra}$  ont donné  $20 \pm 30 \text{ dpm g}^{-1}$  poids sec dans l'échantillon de *P. grasslei* et  $40 \pm 30 \text{ dpm g}^{-1}$  sec dans le *A. caudata* pesant 0,537 g. Ces mesures ont été faites en utilisant le pic à 186 keV du  $^{226}\text{Ra}$ ; elles doivent être considérées comme des estimations supérieures parce qu'elles n'ont pas pu être corrigées pour une contribution possible du pic gamma 185 keV de  $^{235}\text{U}$ .

Species	W (g dry n)	$^{210}\text{Pb}$ (dpm/g dry wt)	$^{210}\text{Po}$ (dpm/g dry wt)	$^{210}\text{Pb}/^{210}\text{Po}$
<i>Paralvinella grasslei</i> . . . . .	0.044,9	905 ± 26	1,140 ± 400	1.3 ± 0.4
<i>Alvinella caudata</i> . . . . .	0.048,2	262 ± 8	210 ± 150	0.8 ± 0.6
<i>Alvinella caudata</i> . . . . .	0.226,1	219 ± 6	—	—
<i>Alvinella caudata</i> . . . . .	0.359,3	37 ± 1	25 ± 3	0.7 ± 0.1
<i>Alvinella caudata</i> . . . . .	0.537,1	180 ± 5	—	—
<i>Alvinella pompejana</i> . . . . .	0.561,1	25 ± 1	15 ± 2	0.6 ± 0.1
<i>Alvinella pompejana</i> . . . . .	1.425,1	42 ± 3	77 ± 35	1.8 ± 0.8
<i>Alvinella pompejana</i> . . . . .	1.619,1	175 ± 1	13 ± 3	0.08 ± 0.02

the South African as well as to the vent polychaetes. This tendency has been observed previously for  $^{210}\text{Po}$  and  $^{210}\text{Pb}$  concentrations in marine organisms and has recently been discussed in detail [17]. Abundant published data, most of them contained in the references already cited, are available for  $^{210}\text{Po}$  and  $^{210}\text{Pb}$  in non-vent organisms from other taxa. When comparisons are made with this data base the  $^{210}\text{Pb}$  concentrations in the vent polychaetes are seen to be even more striking. In over 350 data for  $^{210}\text{Pb}$  in whole marine organisms, the median value is about  $0.6 \text{ dpm g}^{-1}$  dry weight and only three values lie above the lowest concentration of  $25 \text{ dpm g}^{-1}$  found in the vent polychaetes, viz.  $26 \text{ dpm g}^{-1}$  in pteropods [Heyraud, unpublished],  $46 \text{ dpm g}^{-1}$  in very small ostracods from an unusual sample collection [7] and  $50 \text{ dpm g}^{-1}$  in one of the Oregon polychaetes [15]. The  $^{210}\text{Pb}$  concentrations in excess of  $100 \text{ dpm g}^{-1}$  found in five of the vent polychaetes cannot be matched in whole organisms but only in organism constituents, viz. the stercomes and the granellare of the deep-sea rhizopod *Occultamina profunda* [18], where  $^{210}\text{Pb}$  is at about  $500 \text{ dpm g}^{-1}$ . Indirect evidence, based on measurements of barium, suggested that the  $^{210}\text{Pb}$  in this rhizopod was supported by  $^{226}\text{Ra}$ , the parent of  $^{222}\text{Rn}$ . Our gamma-spectrometric measurements show that in the vent polychaetes most of the  $^{210}\text{Pb}$  is unsupported by  $^{226}\text{Ra}$ . The high  $^{210}\text{Pb}$  concentrations almost certainly reflect the fact that these polychaetes ingest sulphide mineral particles and feed on the associated bacteria [10]; concentrations of  $^{210}\text{Pb}$  in vent particulates

TABLE II

Comparison of radionuclide concentrations in vent Alvinellid polychaetes with those in polychaetes from non-vent sites.  $n$ =number of data. For two of the three Oregon polychaetes concentrations in the original reference [15] were given per wet weight, and for these samples a wet/dry ratio of five was assumed.

Comparaison des concentrations en radionucléides chez les polychètes Alvinellidés avec celles trouvées chez des polychètes ne provenant pas d'un environnement de source hydrothermale.  $n$ =nombre de données. Pour deux des trois polychètes d'Oregon les concentrations dans la référence d'origine [15] étaient données en poids humide, et pour ces échantillons un rapport poids humide/poids sec de cinq a été utilisé.

Collection site	$^{210}\text{Pb}$ (dpm/g dry wt)			$^{210}\text{Po}$ (dpm/g dry wt)			$^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$		
	$n$	Range	Median	$n$	Range	Median	$n$	Range	Median
Vents. . . . .	8	25-905	178	6	13-1140	51	6	0.1-1.8	0.8
Oregon. . . . .	3	1-50	5.3	3	11-89	42	3	1.7-12	8
South Africa. . . .	6	0.04-0.10	0.22	9	1-29	4.4	6	2-48	15

from the East Pacific Rise and from the Endeavour Ridge are indeed high, at between 130 and 777 dpm  $\text{g}^{-1}$  ([19], [3]).

For  $^{210}\text{Po}$ , in over 430 data, the median value is about 16 dpm  $\text{g}^{-1}$  dry weight. Most vent polychaetes contain  $^{210}\text{Po}$  at levels comparable to this median value, but in the two smallest animals the concentrations are very much higher. The 1,140 dpm  $\text{g}^{-1}$  dry weight in the *Paralvinella grasslei* sample is in fact the second-highest  $^{210}\text{Po}$  concentration on record in a whole marine organism, the highest being, 1,398 dpm  $\text{g}^{-1}$  dry weight in a very small (0.025 g dry) specimen of the penaeid shrimp *Gennadas tinayrei* [7].

The  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$  ratios in the vent polychaetes are exceptionally low in comparison with non-vent organisms from other taxa. In over 280 data this ratio has a median of about 32, and it is less than 1.8 in only two cases. The low ratios in the vent polychaetes are probably a further reflection of the fact that vent polychaetes ingest sulphide particulates; vent particulates also have  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$  ratios around unity ([19], [3]). Further measurements of  $^{210}\text{Po}$  and  $^{210}\text{Pb}$  in other vent taxa could expand our knowledge of the dietary regimes in vent communities.

*In conclusion*, we discuss the question of radiation dose. Our data indicate that the vent Alvinellid polychaetes, a class with demonstrated adaptative plasticity [10], contain both  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  at levels which are typically in excess of 100 dpm  $\text{g}^{-1}$  dry weight for the smaller animals. The resulting internal radiation dose received by the animals from the beta-emitters  $^{210}\text{Pb}$  and its daughter  $^{210}\text{Bi}$  will be negligible compared with that from the alpha-emitter  $^{210}\text{Po}$ . Assuming a wet/dry ratio of five and a quality factor [20] of 20 for the  $^{210}\text{Po}$  alpha-particle, 100 dpm  $\text{g}^{-1}$  dry implies an average whole-body radiation dose to the polychaete tissues, from  $^{210}\text{Po}$  alone, of 0.18 Sv year $^{-1}$  (18 rem year $^{-1}$ ), or about 100 times the average whole-body natural radiation dose received by humans from all sources [21]. The use of the quality factor concept and of the Sievert (which in the strict sense have been defined only for the purposes of human radiation protection) is reasonable in view of the necessity of allowing for the high linear energy transfer of alpha-radiation which occurs irrespective of the organisms involved; this question is discussed more fully in a recent International Atomic Energy Agency publication [22]. Among non-vent organisms, certain penaeid shrimp are known to receive similar doses from  $^{210}\text{Po}$  [23], the highest natural radiation dose reported to date in a whole marine organism being 3.1 Sv year $^{-1}$ , in the *Gennadas tinayrei* shrimp referred to previously [7]. The *Paralvinella grasslei* vent polychaete (Table I) was, on the basis

of the measured  $^{210}\text{Po}$  concentration, subjected to a dose of about  $2 \text{ Sv year}^{-1}$ . It is worth remembering that the vent animals live permanently in an environment where the  $^{222}\text{Rn}$  concentrations are even higher than those of  $^{210}\text{Pb}$  or  $^{210}\text{Po}$ . The possibility that  $^{222}\text{Rn}$  and its short-lived alpha-emitting descendants  $^{218}\text{Po}$  ( $T_{1/2} = 3.05 \text{ min.}$ ) and  $^{214}\text{Po}$  ( $T_{1/2} = 164 \mu\text{s}$ ) also contribute significantly to the natural radiation dose cannot be excluded. More data are needed to establish to what extent high natural radiation doses are the norm for organisms, such as the Alvinellid polychaetes, which live close to the venting hot fluids. The possible role played by natural radiation in the evolution of the vent communities might be an interesting field of investigation.

We thank the scientist and pilots of the submersibles *Nautille* and *Alvin* who helped us obtain specimens from different vent areas. We especially thank Anne-Marie Alayse, Richard A., Lutz and Robert C. Vrijenhoek who were chief scientist of the *Hydronaut* (A.-M.A.) and 125 (R.A.L., R.C.V.) cruises. We thank Dr. J. A. Day for providing the South African polychaetes. The I.A.E.A. Marine Environment Laboratory operates under an agreement between the International Atomic Energy Agency and the Government of the Principality of Monaco. The Laboratory gratefully acknowledges this support.

Note remise le 13 septembre 1991, acceptée après révision le 7 mai 1992.

#### REFERENCES

- [1] J. F. GRASSLE, *Science*, 229, 1985, pp. 713-717.
- [2] K. S. JOHNSON, J. J. CHILDRRESS, R. R. HESSLER, C. M. SAKOMOTO-ARNODL and C. L. BEEHLER, *Deep-Sea Res.*, 35, 1988, pp. 1723-1744.
- [3] D. KADKO and W. MOORE, *Geochim. cosmochim. Acta*, 52, 1988, pp. 659-668.
- [4] K. KIM and R. C. FINKEL, *E.O.S.*, 61, 1980, p. 995.
- [5] R. D. CHERRY and L. V. SHANNON, *Atom. Energy Rev.*, 12, 1974, pp. 1-45.
- [6] R. D. CHERRY and M. HEYRAUD, *Science*, 218, 1982, pp. 54-56.
- [7] M. HEYRAUD, P. DOMANSKI, R. D. CHERRY and M. J. R. FASHAM, *Mar. Biol.*, 97, 1988, pp. 507-519.
- [8] M. I. CHERRY, R. D. CHERRY and M. HEYRAUD, *Mar. Biol.*, 96, 1987, pp. 441-449.
- [9] R. D. CHERRY and M. HEYRAUD, *Radionuclides: a tool for Oceanography*, J. C. GUARY, P. GUEGUENIAT and R. J. PENTREATH Eds., Elsevier Science, London, 1988, pp. 362-372.
- [10] D. DESBRUYERES, F. GAILL, L. LAUBIER and Y. FOUQUET, *Bull. Biol. Soc. Washington*, No. 6, 1985, pp. 103-116.
- [11] D. DESBRUYERES, F. GAILL, L. LAUBIER, D. PRIEUR and G. H. RAU, *Mar. Biol.*, 75, 1983, pp. 201-205.
- [12] N. A. HALLDEN and J. H. HARLEY, *Analyt. Chem.*, 32, 1960, pp. 1861-1863.
- [13] H. T. MILLARD, *Analyt. Chem.*, 35, 1963, pp. 1017-1023.
- [14] W. W. FLYNN, *Analyt. chim. Acta*, 43, 1968, pp. 221-227.
- [15] T. M. BEASLEY, *Ph. D. Thesis*, Oregon State University, 1969.
- [16] T. M. BEASLEY, R. J. EAGLE and T. A. JOKELA, Quarterly Summary Report of the Health and Safety Laboratory, New York (Fallout Program), *H.A.S.L.*, 273, 1973, pp. 2-36.
- [17] R. D. CHERRY and M. HEYRAUD, *Radionuclides in the Study of Marine Processes*, P. J. KERSHAW and D. S. WOODHEAD Eds., Elsevier Applied Science, London and New York, 1991, pp. 309-318.
- [18] D. D. SWINBANKS and Y. SHIRAYAMA, *Nature*, 320, 1986, pp. 354-358.
- [19] R. C. FINKEL, J. D. MACDOUGALL and Y. C. CHUNG, *Geophys. Res. Lett.*, 7, 1980, pp. 685-688.
- [20] International commission on radiological protection, Publication 26, Pergamon, Oxford, 1977, p. 53.
- [21] United nations scientific committee on the effects of atomic radiation, United Nations, New York, 1982, p. 102.
- [22] International atomic energy agency, Technical Report Series No. 288, *I.A.E.A.*, Vienna, 1988, p. 46.
- [23] R. D. CHERRY and M. HEYRAUD, *Mar. Biol.*, 65, 1981, pp. 165-175.

R. D. C. and M. H. : *Department of Physics, University of Cape Town, Rondebosch, CP 7700, South Africa;*

D. D. : *Centre de Brest de l'IFREMER, B.P. No. 70, 29280 Plouzané;*

C. N. : *I.A.E.A., Marine Environment Laboratory, B.P. No. 800, Monaco, MC 98012 Cedex.*

Present address: *Commission des Communautés européennes, Direction générale XII de la Science, de la Recherche et du Développement, rue de la Loi, 200, Bruxelles B-1049, Belgique.*