

note technique

Mesure du plutonium dans des échantillons de sols et de sédiments prélevés en juin 1991 autour du site de la centrale de Creys-Malville

S. ROUSSEL-DEBET*, C. COLLE*, L. JOURD'HEUIL*, M. MORELLO*,
L. FOULQUIER*, P. MIARA*, M. PALLY*

(Manuscrit reçu le 29 octobre 1992)

RÉSUMÉ

Le plutonium a été mesuré, en 1991, sur 5 échantillons de sols et 12 échantillons de sédiments du Rhône prélevés autour du site de la centrale électro-nucléaire de Creys-Malville. Les concentrations des sols (fraction tamisée à 2 mm) varient, pour $^{239+240}\text{Pu}$, de 35 ± 4 à $1411 \pm 135 \text{ mBq.kg}^{-1}$ sec et, pour ^{238}Pu , de moins de 1 à $101 \pm 6 \text{ mBq.kg}^{-1}$ sec. Dans les sédiments, on observe de 17 ± 4 à $147 \pm 12 \text{ mBq.kg}^{-1}$ sec en $^{239+240}\text{Pu}$ et de moins de 1 à $7,2 \pm 1,6 \text{ mBq.kg}^{-1}$ sec en ^{238}Pu . Ces résultats sont du même ordre que les résultats de mesures de plutonium faites, à ce jour, dans l'environnement français et les rapports isotopiques $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ sont analogues à ceux des retombées atmosphériques (0,03 à 0,08) et sont différents des rapports caractéristiques de l'usine (0,7 à 0,8). La variabilité des résultats selon les échantillons confirme que la fixation du plutonium sur les sols et les sédiments dépend, pour une large part, des teneurs de ces substrats en matière organique et en particules fines.

ABSTRACT

In 1991, plutonium measurements were carried out on 5 samples of soils and 12 samples of sediments of the Rhône river collected around the nuclear power plant of Creys-Malville. Soil concentrations (particle diameters below 2 mm) ranged for $^{239+240}\text{Pu}$, from 35 ± 4 to $1411 \pm 135 \text{ mBq.kg}^{-1}$ dry and for ^{238}Pu , from less than 1 to $101 \pm 6 \text{ mBq.kg}^{-1}$ dry. Concerning sediments, values from 17 ± 4 to $147 \pm 12 \text{ mBq.kg}^{-1}$ dry for $^{239+240}\text{Pu}$ and less than 1 to $7,2 \pm 1,6 \text{ mBq.kg}^{-1}$ dry for ^{238}Pu were measured. The observed concentrations are similar to previous data issued from measurements of samples collected in French environment and the isotopic ratios $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ are quite the same as the ratio characterizing atmospheric fallout (0.03-0.08). The variability of data, depending on samples corroborates the fact that plutonium retention on soils and sediments is highly dependent on the organic matter and small particle content of the substratum.

* Commissariat à l'énergie atomique, Institut de protection et de surêté nucléaire, Département de protection de l'environnement et des installations, Service d'études et de recherches sur les transferts dans l'environnement (SERE), 13108 Saint-Paul-Lez-Durance, Cedex.

1. Introduction

La majeure partie du plutonium dans l'environnement provient des retombées d'essais d'armes nucléaires (essentiellement dans les années 1960) et de l'accident d'un satellite à propulsion nucléaire (en 1964). Le rapport isotopique $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ des plutoniums produits par les essais est, à l'origine, de l'ordre de 0,03 et varie *in situ* dans les sols et les sédiments entre 0,03 et 0,08 [10, 16, 18]. A cette contamination globale se sont ajoutées localement des sources ponctuelles, notamment les essais militaires, les chutes d'avions transportant des armes nucléaires, les rejets accidentels d'usines, l'accident de Tchernobyl [11] ainsi que, dans une moindre mesure, les rejets autorisés d'installations de traitement de combustible.

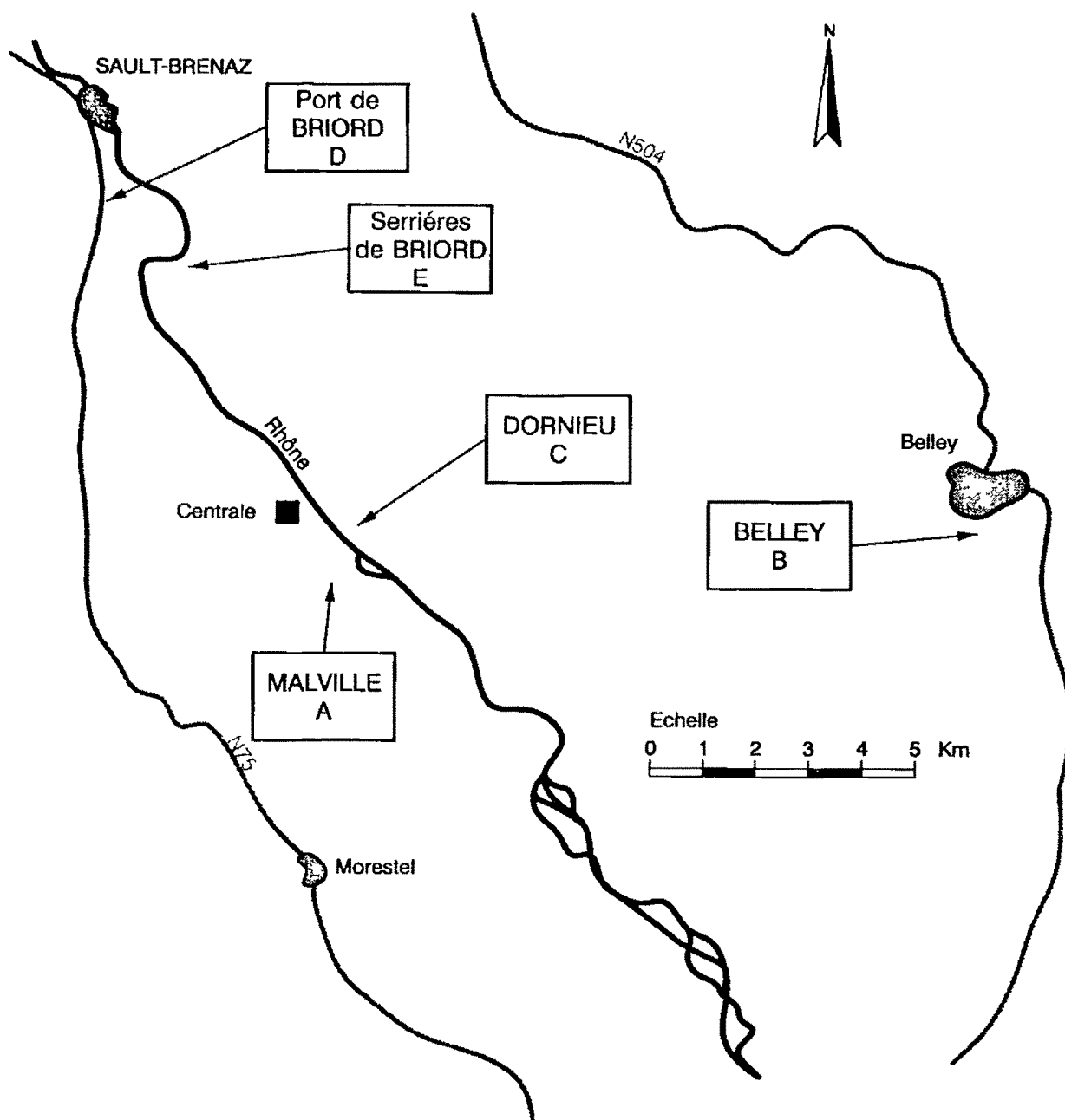
La centrale de Creys-Malville, située en bordure du Rhône en rive gauche sur la commune de Creys-Pusignieu, se trouve à une cinquantaine de kilomètres en amont de l'agglomération urbaine de Lyon. Elle appartient à la filière des réacteurs à neutrons rapides. Le combustible de ce réacteur est composé d'un oxyde mixte d'uranium et de plutonium (UO_2 et PuO_2). Le rapport isotopique $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ de ce combustible varie de 0,7 à 0,8. La centrale a divergé le 7 septembre 1985, mais de nombreux arrêts du réacteur ont eu lieu. Le réacteur ne fonctionne plus depuis 1990 et la décision ministérielle d'ajourner l'autorisation de redémarrage a été annoncée en juillet 1992.

L'exploitant a demandé en 1991 au Service d'études et de recherches sur les transferts dans l'environnement (SERE) d'effectuer des mesures de plutonium sur des échantillons de sols et de sédiments prélevés dans les environs du site. Les résultats de ces mesures, destinées à une expertise concernant la centrale, ont été publiés par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques [6].

2. Méthodes

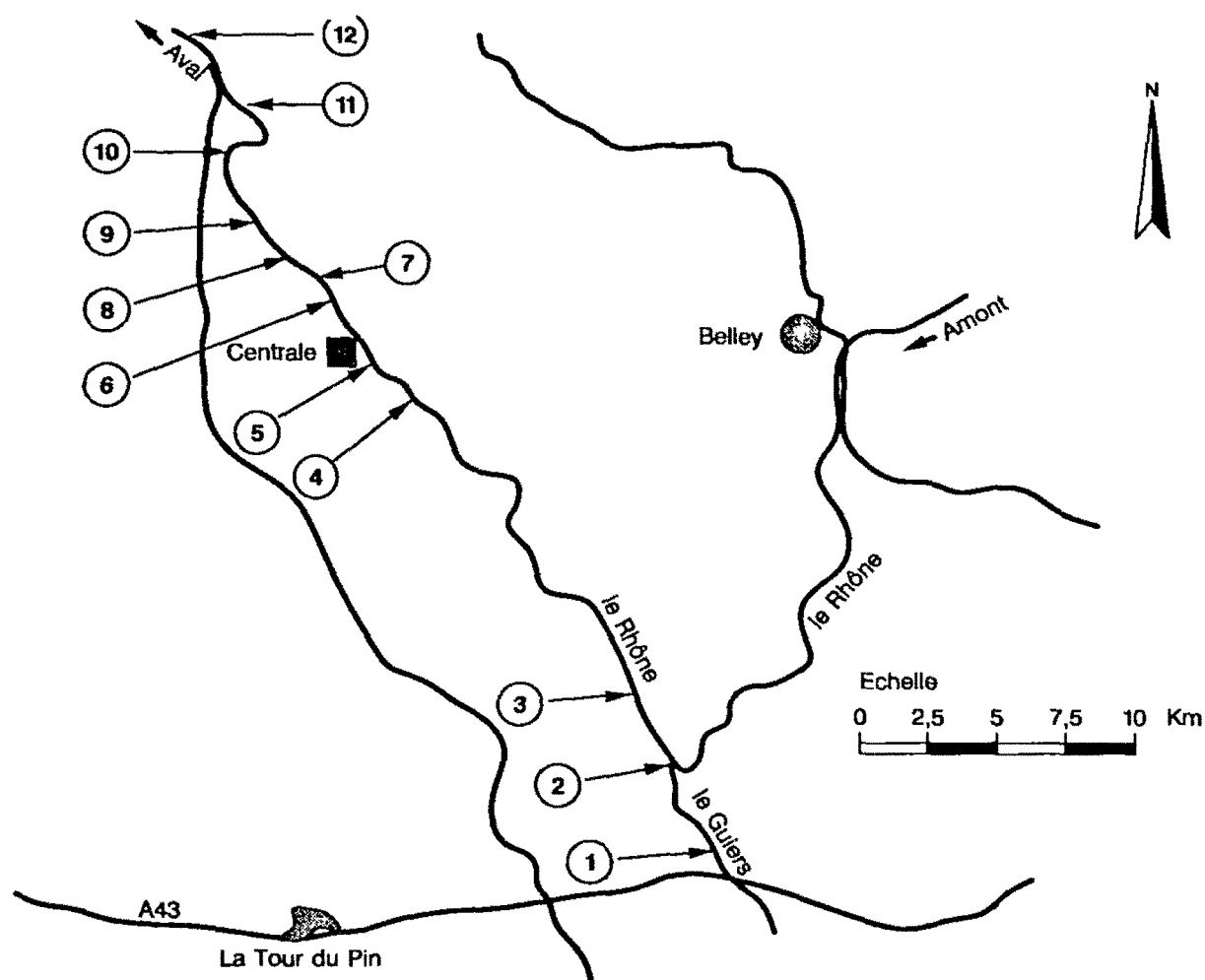
Prélèvements et conditionnement des échantillons

Echantillons de sols – Cinq prélèvements de sols ont été effectués en juin 1991. Les points de prélèvements (fig. 1) sont localisés autour du site à des distances variant entre 1 et 17 km. Tous les sols ont été prélevés dans des zones non cultivées, en sous-bois pour Malville, Belley, Dornieu et en zone de type friches pour Serrières de Briord et Port de Briord. Les prélèvements correspondent à la masse de sol recueillie dans un carré de 25 cm de côté sur 5 cm de profondeur (la végétation aérienne et les racines ont été retirées). L'échantillon est homogénéisé et séché à l'air libre durant 2 semaines puis tamisé à 2 mm de façon à séparer la terre fine des éléments grossiers ; en effet, les mesures sont, par convention, toujours effectuées sur la fraction "terre fine".



*Fig. 1. – Localisation des stations de prélèvements de sol.
Location of soil sampling stations.*

Echantillons de sédiments – Les sédiments ont été prélevés en rive droite ou gauche sur 12 stations : 5 en amont de la centrale (dont une dans un affluent du Rhône : le Guiers) et 7 en aval (fig. 2). Les prélèvements ont été faits avec un cône de Berthois et une benne EKMAN. Huit litres de sédiment sont prélevés à chaque station. Les échantillons de sédiment sont séchés à 40° C à l'étuve.



**Fig. 2. – Localisation des stations de prélèvements de sédiments.
Location of sediment sampling stations.**

Repérage des stations : Amont de la centrale : 1 Le Guiers, 2 Barrage de Breigner Cordon, 3 Ferme des sables, 4 Ferme de Quincieu, 5 Malville ; Aval de la centrale : 6 Ferme Chancillon, 7 Port de Briord, 8 Port de Quirieu, 9 Usine Vicat, 10 Vallée Bleue, 11 Barrage de Villebois, 12 Sault Brenaz.

Détermination de la granulométrie et de la teneur en matière organique¹⁾

Sur une fraction (200 g) de chaque échantillon de sol sec tamisé et de sédiment sec, on détermine la granulométrie et la teneur en matière organique par les méthodes normalisées [2-3].

Pour effectuer l'analyse granulométrique (norme AFNOR X 31-107), après destruction de la matière organique au peroxyde d'hydrogène, on disperse les agrégats à l'hexamétaphosphate de sodium. Les fractions de diamètre supérieur à 50 μm sont obtenues par tamisage de la suspension ; les fractions plus fines sont prélevées à la pipette d'Andréasen.

1) Analyse réalisée par la Société du canal de Provence, Le Tholonnet, BP 100, 13100 Aix-en-Provence.

La mesure de la teneur en carbone organique (norme AFNOR X 31-109) est faite par oxydation sulfochromique et titrage en retour de l'excès de réactif. La teneur en matière organique est évaluée en multipliant la valeur du carbone organique par 1,7.

Mesures du plutonium par spectrométrie alpha¹⁾

Une partie (250 g de sol sec tamisé, 500 g de sédiment sec) de chaque échantillon subit un traitement radiochimique suivi d'une électro-déposition et d'une spectrométrie alpha. La méthode utilisée est en accord avec les recommandations de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) [12]. Le protocole mis au point au SERE constitue une adaptation synthétique des techniques décrites par Ballestra & col., Talvitie et Yamato [4, 17, 19].

Le principe de traitement de l'échantillon est le suivant :

- calcination lente à 550° C, destinée à éliminer la matière organique ;
- ajout d'un étalon interne : on ajoute un isotope du Pu (en général ^{242}Pu ou ^{236}Pu) qui est absent de l'échantillon de départ, et supposé se comporter exactement comme les isotopes 238, 239 et 240 ; dans la suite du protocole, cet étalon interne ("traceur") sert à déterminer le rendement chimique de l'opération ;
- mise en solution des cendres par attaque oxydante en milieu nitrique concentré à chaud et attaque des résidus siliceux en milieu fluorhydrique ;
- coprécipitations afin de séparer les transuraniens des autres constituants stables majeurs (Na, K, Ca...), qui restent en solution ; on effectue deux coprécipitations par de l'oxalate de calcium à pH 1,5, puis deux coprécipitations à l'hydroxyde ferrique à pH 8 ;
- ajustage du plutonium à la valence 4 par oxydoréduction à l'aide de peroxyde d'hydrogène et de nitrite de sodium ;
- séparation et purification du plutonium sur résine anionique en milieu nitrique 8M ;
- électro-déposition destinée à fixer le plutonium pur en couche ultra-fine et homogène sur un support destiné à la spectrométrie ;
- spectrométrie alpha sur spectromètre à barrière de surface (durée d'acquisition du spectre de l'ordre de 7 jours).

3. Résultats

Tous les résultats sont rapportés aux poids secs. Les résultats des mesures de la granulométrie et de la teneur en matière organique sont indiqués au tableau I.

Les résultats des spectrométries alpha sont donnés à la date de référence du 13 juin 1991. Les résultats relatifs aux sols prélevés dans la couche 0-5 cm sont indiqués au tableau II. Les résultats concernant les sédiments sont présentés figure 3.

1) Mesures réalisées au SERE par le Laboratoire d'études du transfert des polluants en agronomie, Unité de radioécologie atmosphère et milieu terrestre.

TABLEAU I

Teneurs en matière organique et granulométrie* (en %) des sols**
 et des sédiments prélevés autour de la centrale de Creys-Malville en juin 1991
 Organic matter contents and particle size distribution (%) of soils and sediments col-
 lected around Creys-Malville plant (June 1991)

Localisation des stations	Matière organique	Argiles	Limons fins	Limons grossiers	Sables fins	Sables grossiers
SOLS***						
A Malville 1,3 km SSE	18,1	17,4	17,1	8,0	22,8	16,6
B Belley 17 km E	3,8	11,2	19,6	17,7	31,4	16,3
C Dornieu 1,3 km E	17,2	9,9	26,7	20,8	12,6	12,8
D Port de Briord 11 km NNW	6,7	21,5	14,5	12,7	20,7	23,9
E Serrières de Briord 6,8 km NNW	3,1	9,9	22,6	9,3	19,7	35,4
SEDIMENTS AMONT						
1 Le Guiers	2,1	< 1	4,0	4,9	36,6	52,4
2 Barrage de Breigner Cordon	4,7	1,9	47,2	36,6	9,6	< 1
3 Ferme des sables	1,3	< 1	4,0	3,0	11,0	80,7
4 Ferme de Quincieu	5,3	1,9	15,3	30,6	45,9	1,0
5 Malville	1,3	< 1	1,2	18,7	61,2	17,6
SEDIMENTS AVAL						
6 Ferme Chancillon <i>rive gauche</i>	5,6	12,4	21,9	24,8	33,4	1,9
7 Port de Briord <i>rive droite</i>	4,8	15,4	29,7	28,9	18,3	2,9
8 Port de Quirieu <i>rive gauche</i>	2,7	2,0	21,6	16,7	24,6	32,4
9 Usine Vicat <i>rive gauche</i>	1,8	2,0	18,8	13,9	31,7	31,8
10 Vallée Bleue <i>rive gauche</i>	1,2	1,0	1,0	1,0	20,0	75,8
11 Barrage de Villebois <i>rive droite</i>	3,8	7,8	55,3	22,4	9,7	1,0
12 Sault Brenaz <i>rive droite</i>	1,7	1,0	1,0	2,0	27,8	66,5

* Diamètre des particules : argiles : inférieur à 2 μm ; limons fins : de 20 à 2 μm ; limons grossiers : de 50 à 20 μm ; sables fins : de 200 à 50 μm ; sables grossiers : de 200 μm à 2 mm ; ** Couche prélevée de 0 à 5 cm ; mesures exprimées par rapport à la fraction fine (< 2 mm) ; *** Distance et gisement par rapport au site.

TABLEAU II

Activité massique en isotopes du plutonium en mBq.kg^{-1} sec des sols prélevés dans la couche 0 à 5 cm autour de la centrale de Creys-Malville en juin 1991.

Mass activities of plutonium isotopes (mBq.kg^{-1} dry) of soil samples in the layer 0-5 cm around Creys-Malville plant (June 1991)

Lieu de prélèvement	Malville	Belley	Dornieu	Port de Briord	Serrières de Briord
$^{239+240}\text{Pu}$ (fraction fine < 2 mm)	874 ± 87	267 ± 28	1411 ± 135	1295 ± 68	35 ± 4
^{238}Pu (fraction fine < 2 mm)	46 ± 5	36 ± 4	36 ± 4	101 ± 6	< 1
<i>kg sec de terre fine par kg sec de sol total</i>	0,82	0,92	0,31	0,92	0,53
$^{239+240}\text{Pu}$ (sol total)	685 ± 71	246 ± 26	437 ± 42	1191 ± 63	19 ± 2
^{238}Pu (sol total)	38 ± 4	33 ± 4	11 ± 1	93 ± 6	< 1

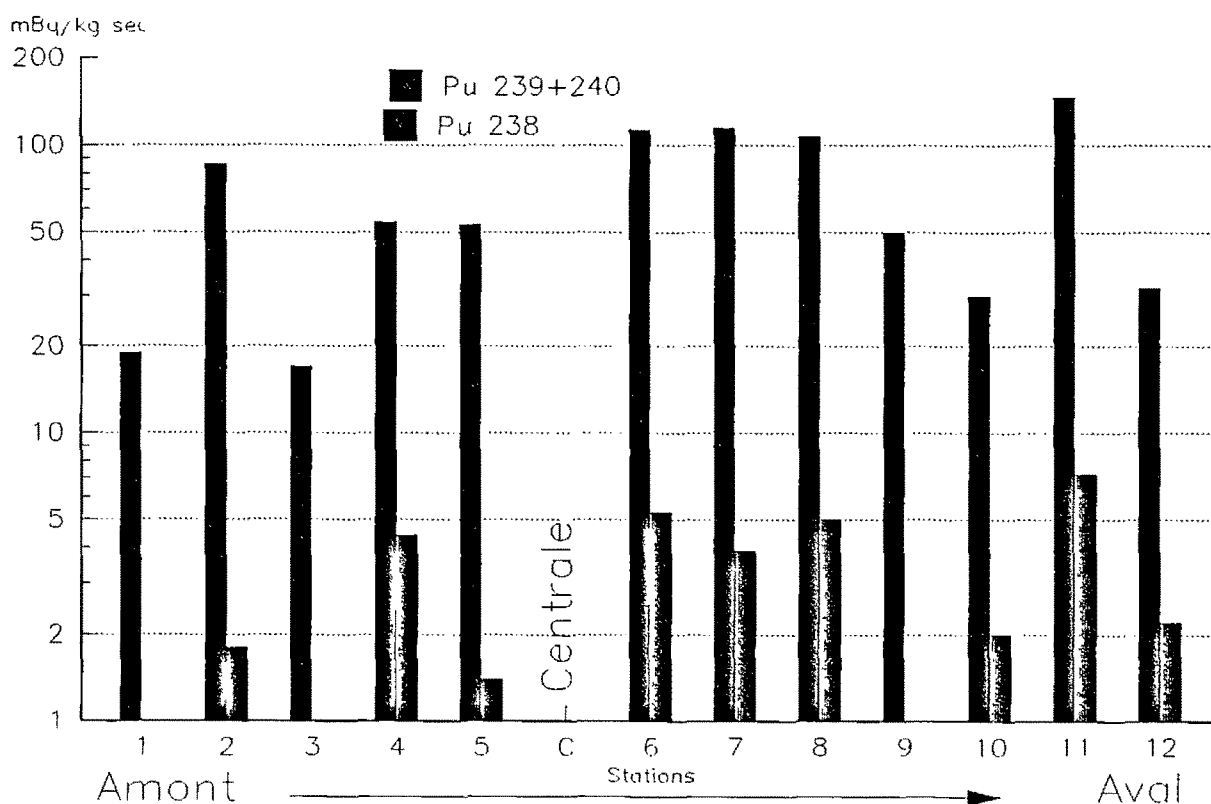


Fig. 3. – Activité massique en isotopes du plutonium des sédiments prélevés à l'amont et à l'aval de la centrale de Creys-Malville en juin 1991.

Mass activities of plutonium isotopes of sediments samples upstream and downstream Creys-Malville plant (June 1991).

Repérage des stations : Amont de la centrale : 1 Le Guiers, 2 Barrage de Breigner Cordon, 3 Ferme des sables, 4 Ferme de Quincieu, 5 Malville ; Aval de la centrale : 6 Ferme Chancillon, 7 Port de Briord, 8 Port de Quirieu, 9 Usine Vicat, 10 Vallée Bleue, 11 Barrage de Villebois, 12 Sault Brenaz.

4. Discussion

Sols

Les remarques qui suivent se rapportent aux concentrations ramenées au sol total sec (fraction fine + éléments grossiers), calculées en multipliant les valeurs mesurées par le rapport : kg de terre fine/kg de sol total. Ceci représente la concentration réelle du sol pour la couche considérée (ici 0 à 5 cm).

Dans la couche 0-5 cm, on mesure de 19 ± 2 à 1191 ± 63 mBq.kg⁻¹ en ²³⁹⁺²⁴⁰Pu et de moins de 1 à 93 ± 6 mBq.kg⁻¹ en ²³⁸Pu ; c'est l'ordre de grandeur des concentrations que l'on observe habituellement.

Si l'on compare ces valeurs avec les résultats des mesures sur un sol cultivé (répartition homogène) effectuées dans la région de Creys en 1986-87 [7], qui étaient de l'ordre de 200 à 400 mBq.kg⁻¹ en ²³⁹⁺²⁴⁰Pu et de 10 à 40 mBq.kg⁻¹ en ²³⁸Pu, sur la couche prélevée (0-30 cm), on observe que les valeurs sont du même ordre de grandeur, compte tenu des différences de profondeurs des couches mesurées. En effet, diverses études montrent que dans la plupart des sols le plutonium est fortement fixé dans les 5 à 10 premiers centimètres du sol [1, 8].

Le rapport ²³⁸Pu/²³⁹⁺²⁴⁰Pu varie de 0,03 à 0,13, ce qui est cohérent avec le rapport isotopique des retombées atmosphériques.

On remarque que les sols les plus argileux (Pont de Briord : 20 % d'argiles, Malville : 14 %) et/ou les plus riches en matière organique (Malville 18 %, Dornieu 17 %) sont précisément ceux qui présentent les plus fortes activités massiques. La rétention des radioéléments dans les sols dépend entre autres paramètres de l'importance du complexe argilo-humique. Les échantillons étudiés sont cohérents par rapport aux comportements habituellement observés dans les sols.

Enfin, il n'y a aucune relation évidente entre les niveaux d'activité et la distance au site : par exemple, l'échantillon le plus marqué (Port de Briord) se situe à 11 km de la centrale.

Sédiments

Les isotopes ²³⁸ et ²³⁹⁺²⁴⁰ du plutonium sont mesurés sur tous les échantillons de sédiments en amont et en aval de la centrale de Creys-Malville. Les concentrations en ²³⁸Pu atteignent au maximum $4,4 \pm 1,0$ mBq.kg⁻¹ sec en amont et $7,2 \pm 1,6$ mBq.kg⁻¹ sec en aval. Pour le ²³⁹⁺²⁴⁰Pu, la concentration maximale est de 86 ± 4 mBq.kg⁻¹ sec en amont et 147 ± 12 mBq.kg⁻¹ sec en aval.

La sorption du plutonium sur les sédiments est forte et rapide et la capacité de fixation est corrélée en particulier à ses propriétés physiques [5, 15] ; plus un sédiment est fin et/ou enrichi en matière organique, plus ses possibilités de fixation sont grandes. Or, les caractéristiques hydrologiques du Rhône dans la zone de Creys Malville font que la granulométrie des sédiments devient globalement de plus en plus fine de l'amont vers l'aval.

Ainsi, le sédiment de la ferme des Sables (8 % d'éléments de diamètre inférieur à 50 μm) et celui du barrage de Villebois (90 % d'éléments de diamètre inférieur à 50 μm) ont une granulométrie totalement différente. Il est donc difficile de comparer les résultats de ces deux stations pour lesquelles les concentrations en plutonium varient de l'ordre d'un facteur 10. Tout au plus peut-on observer que l'installation du barrage de Villebois a ralenti l'écoulement.

A l'aval de la centrale, cette zone est devenue une zone de sédimentation où le plutonium issu des retombées peut être facilement stocké. Ceci pourrait expliquer la différence de niveau de contamination du sédiment.

Rappelons à titre d'exemple qu'à l'aval du centre de retraitement du combustible de Marcoule, qui est autorisé à rejeter du plutonium par voie liquide, l'impact de cette usine se traduit dans le milieu aquatique par un rapport isotopique $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ de l'ordre de 0,3 caractéristique des rejets [13]. Dans le cas présent, les rapports isotopiques sont semblables en amont et en aval (0,02 à 0,08 en amont et 0,02 à 0,07 en aval). La moyenne des rapports isotopiques des échantillons prélevés en aval est de $0,05 \pm 0,02$. Cette valeur est caractéristique des retombées atmosphériques.

Conclusions

La mesure du plutonium a été faite, en juin 1991, sur 5 échantillons de sols et 12 échantillons de sédiments du Rhône prélevés autour du site de la centrale électronucléaire de Creys-Malville. La méthode utilisée consiste en une séparation radiochimique suivie d'une électrodéposition et d'une mesure par spectrométrie alpha sur spectromètre à barrière de surface. Les concentrations des sols, qui sont en moyenne de $500 \text{ mBq.kg}^{-1} \text{ sec}$ pour $^{239+240}\text{Pu}$ et de $40 \text{ mBq.kg}^{-1} \text{ sec}$ pour ^{238}Pu varient selon les prélèvements. Dans les sédiments, on observe de 17 ± 4 à $147 \pm 12 \text{ mBq.kg}^{-1} \text{ sec}$ en $^{239+240}\text{Pu}$ et de moins de 1 à $7,2 \pm 1,6 \text{ mBq.kg}^{-1} \text{ sec}$ en ^{238}Pu . Ces résultats sont du même ordre que les résultats de mesures de plutonium faites, à ce jour, dans l'environnement français.

Les rapports isotopiques $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ des échantillons mesurés sont analogues à ceux des retombées atmosphériques (0,03 à 0,1), et diffèrent significativement du rapport isotopique caractéristique du combustible de la centrale (0,7 à 0,8). On n'observe aucune corrélation entre le plutonium mesuré et la distance au site ou la position (amont ou aval des rejets de la centrale) des prélèvements. La dispersion des valeurs est en relation avec la variabilité des caractéristiques de granulométrie et de teneur en matière organique des substrats. ■

RÉFÉRENCES

- [1] ANGELETTI L. – Les transuraniens, propriétés physico-chimiques et comportement dans l'environnement. Rapport CEA-R-4987, 1979.
- [2] ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION – Qualité des sols méthodes d'analyse. Recueil de normes françaises 1987. Paris-la-Défense : AFNOR, 1989.
- [3] BAIZE D. – Guide des analyses courantes en pédologie. Paris : INRA, 1988.
- [4] BALLESTRA S., HOLM E., FUKAI R. – Low-level determination of transuranic elements in marine environmental samples. *In* : Symposium on the determination of radionuclides in environmental and biological materials, London, 9-10 Oct. 1978, Londres : CEEGB, 1978, paper 15.
- [5] BEASLEY T.M., JENNING C.D., McCOLLOUGH D.A. – Sediment accumulation rates in the lower Columbia river. *J. Environ. Radioact.*, 1986, 3, 103-123.
- [6] BIRRAUX Cl., Rapporteur. – RNR-PHENIX-SUPERPHENIX. Paris : Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 1991, Chapitre 4, 197-207.
- [7] CAWES P.A., COLLE C. – Comparison of radionuclide deposition to soil and vegetation. *In* : 4. Symposium international de radioécologie, Impact des accidents d'origine nucléaire sur l'environnement cadarache, 14-18 mars 1988. Cadarache : CEA/IPSN/SERE, 1988, D76-D89.
- [8] COUGHTREY P.J., JACKSON D., JONES C.H., KANE P., THORNE M.C. – Radionuclide distribution and transport in terrestrial and aquatic ecosystems. Boston : A.A. Balkema, 1984, vol. 4.
- [9] GRAUBY A., FOULQUIER L., COLLE C., BAUDIN Y., SAAS A., MORELLO M. – Cycle des actinides dans l'environnement terrestre et dulçaquicole. *J. Less-Common Met.*, 1986, 122, 499-514.
- [10] HARLEY J.H. – Plutonium in the environment, a review. *J. Radiat. Res.*, 1981, 21, 83-104.
- [11] HOLM E., AARKROG A., BALLESTRA S., LOPEZ J.J. – Fallout deposition of actinides in Monaco and Denmark following the Chernobyl accident. *In* : 4. Symposium international de radioécologie, Impact des accidents d'origine nucléaire sur l'environnement cadarache, 14-18 mars 1988. Cadarache : CEA/IPSN/SERE, 1988, A22-A36.
- [12] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA) – Measurement of radionuclides in food and the environment. (Technical report series n° 295). Vienne : AIEA, 1989.
- [13] LAMBRECHTS A., LEVY F., FOULQUIER L. – Données sur les concentrations en plutonium dans l'écosystème aquatique rhodanien en aval de l'usine de Marcoule. *Radioprotection*, 1991, 26 (4), 627-635.
- [14] MARTIN J.M., THOMAS A.J. – Contamination radioactive de l'environnement par l'industrie nucléaire. *In* : Actes du colloque Nucléaire-Santé-Sécurité, Montauban, 21-23 janvier 1988. Montauban : Conseil Général de Tarn et Garonne, 1988, 347-389.
- [15] MARTIN J.M., THOMAS A.J. – Origins, concentration and distribution of artificial radionuclides discharged by the Rhône river to the Mediterranean sea. *J. Environ. Radioact.*, 1990, 11, 105-139.
- [16] PERKINS R.W., THOMAS C.W. – Worldwide fallout. *In* : Transuranic elements in the environment (W.C. Hanson, Ed.). Springfield : US Department of energy, Technical information center. Report DOE/TIC-22800, 1980, 53-82.
- [17] TALVITIE N.A. – Electrodeposition of actinides for alpha spectrometric determination. *Anal. Chem.*, 1972, 4 (2), 280-283.

- [18] WATTERS R.L., EDNINGTON D.N., HAKONSON T.E., HANSON W.C., SMITH M.H., WICKER F.W., WILDUNG R.E. – Synthesis of the research literature. *In* : Transuranic elements in the environment (W.C. Hanson, Ed.). Springfield : US Department of energy, Technical information center. Report DOE/TIC-22800, 1980, 1-44.
- [19] YAMATO A. An anion exchange method for the determination of ^{241}Am in environmental and biological samples. *J. Radioanal. Chem.*, 1982, 75 (1), 265-273.