Cartographie des dépôts de ^{137}Cs en mai 1986 sur l'ensemble du territoire français métropolitain

PH. RENAUD¹, J.M. MÉTIVIER¹, E. CASTELIER¹, L. POURCELOT¹,
D. LOUVAT¹

(Manuscrit reçu le 11 février 2003, accepté le 19 septembre 2003)

RÉSUMÉ 17 ans après l'accident de Tchernobyl, cette étude propose une reconstitution des dépôts de ^{137}Cs dus à cet accident sur l'ensemble du territoire français métropolitain. Cette reconstitution est basée sur la relation entre les dépôts de ^{137}Cs et les pluies de la première semaine de mai 1986, validée sur le tiers-est du pays, et sur une modélisation de l'appauvrissement d'est en ouest des masses d'air contaminées. La carte proposée, établie suivant la même méthode géostatistique que celle utilisée par la Commission européenne, est cohérente avec les estimations des dépôts de ^{137}Cs dans les pays d'Europe voisins.

ABSTRACT ^{137}Cs deposition mapping in May 1986 over the whole French metropolitan territory.

This study intends to reconstruct the ^{137}Cs deposition over the French territory resulting from the Chernobyl accident, 17 years after its occurrence. This reconstruction is based on the caesium fallout *versus* atmospheric precipitation relationship during the first week of May 1986, already determined for the Eastern France and the modelling of air masses radioactive load decrease toward West. The deposition map is obtained following the methodology used for the European Commission Atlas. Our map is consistent with estimated deposit over neighbouring countries.

1. Introduction

17 ans après l'accident de Tchernobyl, il n'existe pas de carte précise des dépôts de ^{137}Cs dus aux retombées de cet accident sur l'ensemble du territoire français. Les recherches menées à l'IRSN ces dernières années l'ont amené à proposer une carte de ce type pour le tiers-est du pays (Renaud *et al.*, 2003). Cette carte a été obtenue à l'issue d'une étude de la relation entre les dépôts de ^{137}Cs consécutifs à l'accident de Tchernobyl et les pluies survenues au cours de la première semaine de mai 1986 (Renaud *et al.*, 2003), période durant laquelle les masses d'air contaminées ont survolé le territoire français. Les 137 mesures d'activités de ^{137}Cs

¹ IRSN, Service d'études radioécologiques dans les milieux Naturels, bâtiment 153, C.E. Cadarache, B.P. 3, 13115 Saint-Paul-Lez-Durance Cedex, France.

Figure 1 – Trajectoire des masses d'air contaminées en mai 1986.

Contaminated air masses trajectory in May 1986.

Rejets du 27 avril : trajet Est : rejets de 0-6 h, trajet Sud-Est : rejets 12 h

de sols prélevés entre 1999 et 2000 autour de 26 stations de Météo-France ont permis de quantifier cette relation par l'équation (1)

$$\text{Dépôt de } ^{137}\text{Cs} (\text{Bq m}^{-2}) = 560 \times [\text{hauteur de pluie en mm}] + 1984. \quad (1)$$

Cette relation empirique a été validée à l'est d'une ligne Nîmes-Charleville-Mézière ($\approx 4^\circ$ de longitude est) (Fig. 1), principalement à partir de mesures effectuées par l'IPSN en 1986 (IPSN, 1986).

L'objectif est maintenant de reconstituer la carte des dépôts de ^{137}Cs consécutifs à l'accident de Tchernobyl sur l'ensemble du territoire français métropolitain. Pour cela, il est nécessaire d'étudier les conditions d'application de la relation « pluie-dépôts » sur les régions situées plus à l'ouest.

2. Conditions d'application de la relation « pluie-dépôt » sur l'ensemble du territoire

Plusieurs éléments nous permettent de juger de la validité de la relation « pluie-dépôt » dans les régions situées à l'ouest de la carte précédemment publiée.

La pente de l'équation (1), déterminée empiriquement à partir de mesures d'activité des sols et de hauteurs de pluies, rend compte du dépôt consécutif au lessivage des masses d'air par les pluies. La modélisation générique classiquement admise de ce phénomène est fournie par l'équation (2) (Doury, 1983)

$$D = \Lambda \int_0^\infty dt \int_0^H A(z) dz. \quad (2)$$

Le dépôt au sol (D en Bq m^{-2}) résultant des pluies y est calculé par application d'un coefficient de lessivage, $\Lambda \approx 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, à une colonne d'air dont l'épaisseur, H (m), est déterminée par la hauteur de la base des nuages générateurs de pluie, et dont l'activité (A) peut évoluer en fonction de l'altitude (z). Il apparaît ainsi que le dépôt par temps de pluies est proportionnel à l'activité de l'air. Grossièrement, dans l'Est du pays on peut estimer entre 0,3 et 0,9 Bq m^{-3} l'activité moyenne des masses d'air au niveau du sol lors des épisodes pluvieux du 2 au 4 mai 1986. En considérant que la base des nuages était à environ 1 500 à 2 000 m et que l'activité de l'air après plusieurs milliers de km depuis l'installation accidentée était assez homogène sur cette colonne, l'application de l'équation (2) conduit à estimer le dépôt pluvieux entre 200 et 700 $\text{Bq m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$. Cette fourchette de valeur encadre bien la pente de l'équation empirique (1) : 560 $\text{Bq m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$. Il faut noter par ailleurs que cette valeur est assez proche de celles obtenues dans d'autres pays d'Europe suite à l'accident de Tchernobyl, notamment au Royaume-Uni (695 $\text{Bq m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ d'après Clark et Smith, 1988), en Irlande (467 $\text{Bq m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ d'après McAulay et Mauran, 1991) et dans le sud de la Suède (740 $\text{Bq m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ d'après Isaksson *et al.*, 2000).

Cette proportionnalité entre le dépôt pluvieux et l'activité de l'air a conduit de nombreux auteurs à étudier le rapport entre l'activité de l'eau de pluie et celle de l'air exprimé en Bq l^{-1} d'eau de pluie par Bq m^{-3} d'air ($\text{m}^3 \text{ l}^{-1}$). Ce coefficient (*washout-ratio* anglo-saxon) traduit le chargement des gouttes d'eau en aérosols radioactifs, d'une part par emprisonnement des aérosols lors de la formation des gouttes d'eau dans le nuage, et d'autre part par entraînement des aérosols lors de leur chute. Dans le Sud-Est de la France, la pente de la relation empirique (1) correspond à un coefficient de lessivage de l'ordre de 750 à 850 $\text{m}^3 \text{ l}^{-1}$ (Renaud *et al.*, 2003). À Paris, une valeur de 700 $\text{m}^3 \text{ l}^{-1}$ a été calculée à partir de mesures d'air et d'eau de pluie collectés entre le 29 avril et le 1^{er} mai (Thomas et Martin, 1986). Par ailleurs, différentes études réalisées sur des polluants atmosphériques non organiques, radioactifs ou non et fixés sur des aérosols micrométriques, ont montré que lorsqu'une masse d'air est polluée de manière assez homogène sur une épaisseur suffisante (jusqu'aux nuages porteurs de pluies), le coefficient de lessivage est de l'ordre de $500 \pm 200 \text{ Bq l}^{-1}$ par Bq m^{-3} ($\text{m}^3 \text{ l}^{-1}$) et ceci quel que soit l'élément chimique constituant le polluant (DeBortoli et Gaglione, 1974 ; Peckar, 1996 ; Chester *et al.*, 1997 ; NCI-NDC, 2001 ; Renaud et Louvat, 2004).

La relation « pluie-dépôt » établie et validée dans l'Est de la France est donc applicable sur l'ensemble du territoire français métropolitain à la condition de prendre en compte les variations de l'activité des masses d'air.

TABEAU I
Activités moyennes de ^{131}I et ^{137}Cs dans l'air entre le 1^{er} et le 3 mai 1986.
Mean ^{131}I and ^{137}Cs activities in the air between 1st and 3rd May 1986.

Site	Longitude*	Activités (Bq m^{-3})	
		Cs	I
Cherbourg	-1,38	0,05	0,08
Biarritz	-1,32	0,012	0,015
Tours	0,43	0,11	0,28
Vesinet	2,08	0,69	0,75
Bourges	2,22	0,12	0,14
Lille	3,06	0,39	0,49
Marcoule	4,42	0,75	1,8
Grenoble	5,44	0,32	0,6
Cadarache	5,45	0,83	4,16
Nice	7,12	0,8	1,5

* 0 = méridien de Greenwich.

3. Diminution d'est en ouest des activités de l'air et de l'eau de pluie en mai 1986

En mai 1986, les activités de ^{131}I et ^{137}Cs dans l'air ont été mesurées par le Service central de protection contre les rayonnements ionisants (SCPRI) sur sept villes de France, dans le cadre de son programme de surveillance de l'environnement (SCPRI, 1986). Les activités moyennes de l'air pour deux périodes, du 1^{er} au 3 mai et du 4 au 31 mai, sont publiées dans le bulletin mensuel du SCPRI de mai 1986. Par ailleurs, les services de protection radiologique de certains centres du Commissariat à l'énergie atomique ont mesuré quotidiennement les activités de ces deux radionucléides dans l'air. Le tableau I présente ces activités mesurées entre le 1^{er} et le 3 mai 1986. Il apparaît que les activités diminuent en fonction de la longitude. Ainsi, pour ^{137}Cs , elles vont de plus de $0,8 \text{ Bq m}^{-3}$ à Nice à $0,05 \text{ Bq m}^{-3}$ à Cherbourg.

Cette évolution est-ouest est cohérente avec la trajectoire globale des masses d'air. Ainsi, la figure 1 montre que seuls les rejets du 27 avril sont parvenus sur l'Europe de l'Ouest et la France, suivant une trajectoire est, pour ceux du matin du 27, et sud-est pour ceux du 27 après-midi. La diminution des activités mesurées dans les masses d'air est due, d'une part à cette trajectoire du panache qui a laissé à sa marge l'Ouest de la France, et d'autre part aux pluies importantes dans l'Est de la France qui ont achevé le lessivage du panache qui avait déjà

Figure 2 – Diminution des activités en ^{131}I et ^{137}Cs de l'air en fonction de la longitude.
Decrease of ^{131}I and ^{137}Cs activities in air with respect to longitude.

commencé lors des épisodes pluvieux sur l'Autriche, la Suisse, l'Italie du Nord et l'Allemagne du Sud.

La figure 2 montre que les activités ont diminué exponentiellement d'est en ouest suivant des constantes très proches pour ^{137}Cs et ^{131}I de $0,41\text{ (}^\circ\text{) long}^{-1}$ et $0,48\text{ (}^\circ\text{) long}^{-1}$ respectivement.

Cette diminution de l'activité des masses d'air en ^{131}I et ^{137}Cs , s'est accompagnée d'une diminution de l'activité de l'eau de pluie des précipitations cumulées sur la période du 1^{er} au 7 mai (Fig. 3) (SCPRI, 1986). Les constantes

Figure 3 – Diminution des activités en ^{131}I et ^{137}Cs de l'eau de pluie en fonction de la longitude.
Decrease of ^{131}I and ^{137}Cs activities in rainwater with respect to longitude.

de décroissance exponentielle d'est en ouest de l'activité de l'eau de pluie sont proches de celles des masses d'air : $0,36\text{ (}^\circ\text{) long}^{-1}$ pour le ^{137}Cs et de $0,47\text{ (}^\circ\text{) long}^{-1}$ pour ^{131}I .

L'appauvrissement des masses d'air en ^{137}Cs et en ^{131}I s'est donc traduit par une diminution d'est en ouest des dépôts pluvieux ainsi que des dépôts secs. Cet appauvrissement peut être modélisé par une décroissance exponentielle de constante égale à $0,43\text{ (}^\circ\text{) long}^{-1}$, moyenne des quatre constantes obtenues pour

Figure 4 – Carte des dépôts de ^{137}Cs sur la France en mai 1986.
 ^{137}Cs deposition map in May 1986.

^{137}Cs et ^{131}I dans l'air et l'eau de pluie. Les dépôts de ^{137}Cs de mai 1986 à l'ouest de 4° de longitude est peuvent donc être calculés en fonction des hauteurs de pluies enregistrées par Météo-France et de la longitude ($\text{Long } i$), par l'équation (3)

$$\text{Dépôt de } ^{137}\text{Cs} (\text{Bq m}^{-2})_{(\text{Long } i)} = [560 \times [\text{hauteur de pluie en mm}] + 1000] \times e^{(0,43 \times (\text{Long } i - 4,5))} \quad (3)$$

La valeur de $1\,000 \text{ Bq m}^{-2}$ est une estimation de l'activité déposée par temps sec (Renaud *et al.*, 2003).

4. Carte de France des dépôts de ^{137}Cs en mai 1986 consécutifs à l'accident de Tchernobyl

La figure 4 présente les dépôts de ^{137}Cs en mai 1986. Elle a été obtenue à partir de l'équation (3) appliquée aux hauteurs de pluies mesurées par Météo-France sur plus de 3 700 stations uniformément réparties sur le territoire français

Figure 5 – Carte des hauteurs de précipitations enregistrées par Météo-France entre le 1^{er} et le 5 mai 1986.
Map of Rainfall amounts recorded by Météo-France network from the 1st to the 5th of May 1986.

métropolitain. La méthode d'interpolation spatiale adoptée est celle utilisée par la Commission européenne pour cartographier les dépôts de ^{137}Cs sur l'Europe (CCE, 1998 ; Dubois et DeCort, 2001, Bossew *et al.*, 2001).

La figure 5 qui présente les hauteurs de pluies enregistrées par Météo-France entre le 1^{er} et le 5 mai 1986 est un élément de compréhension de la carte des dépôts.

Comme attendu, on observe une diminution d'est en ouest des activités de ^{137}Cs déposées, de plus de 20 000 Bq m^{-2} dans l'Est à moins de 1 000 Bq m^{-2} dans l'Ouest. À l'est d'une ligne Nîmes-Charleville-Mézière (4° de longitude est), les zones présentant les dépôts les plus importants, supérieurs à 10 000 Bq m^{-2} sont celles où les pluies cumulées ont été supérieures à 20 mm. Sur approximativement 200 communes françaises, les dépôts ont pu dépasser 20 000 Bq m^{-2} . À l'ouest de cette ligne, les contreforts du Massif Central, qui ont reçu des précipitations supérieures à 10 mm durant la première semaine de mai 1986, se distinguent avec des dépôts compris entre 4 000 et 10 000 Bq m^{-2} . Plus à l'ouest, les dépôts ont été

le plus souvent inférieurs à $2\,000\text{ Bq m}^{-2}$ et se répartissent entre les classes « inférieur à $1\,000\text{ Bq m}^{-2}$ » et « $1\,000$ à $2\,000\text{ Bq m}^{-2}$ ». L'effet des variations des hauteurs de pluies est atténué par l'appauvrissement des masses d'air. C'est notamment le cas sur le Massif Armoricain, où, malgré des précipitations supérieures à 20 mm et ponctuellement supérieures à 40 mm, les dépôts de ^{137}Cs sont restés en deçà de $1\,000\text{ Bq m}^{-2}$. En revanche, sur une zone orientée nord-sud s'étendant du Sud-Cotentin au pays Basque, la contamination de l'air était encore suffisante pour que des pluies supérieures à 20 mm entraînent des dépôts légèrement supérieurs. Les petits îlots de classe de dépôt supérieure ou inférieure au voisinage et que l'on trouve sur une grande moitié ouest du pays (cf. Fig. 4) n'ont pas de réelle signification. Il s'agit d'artefacts liés au choix des classes de dépôts qui ne doivent pas conduire à stigmatiser les dépôts sur ces zones.

5. Discussion

D'après l'équation (3), la carte des dépôts de ^{137}Cs proposée résulte de l'application de modèles empiriques à une estimation pluviométrique. Il existe donc deux sources d'incertitudes, celle liée à l'application du modèle et celle liée à la détermination de la hauteur de pluie en un point par interpolation des valeurs mesurées sur les stations de Météo-France.

Estimer les incertitudes liées à l'application de la relation empirique exprimée par l'équation (1) revient, d'une part à déterminer l'intervalle de confiance de la régression linéaire établie sur les moyennes des activités mesurées dans les sols aux alentours des stations météo, et d'autre part à prendre en compte la variabilité des activités mesurées autour de ces moyennes. La figure 6 présente l'évolution des activités mesurées dans les sols de la basse vallée du Rhône en fonction des hauteurs de pluies, la droite de régression ainsi que les limites de son intervalle de confiance à 99 %. L'erreur faite sur l'estimation du dépôt à partir d'une hauteur de pluie est de l'ordre de 20 % pour les niveaux de précipitations moyens (15 à 20 mm), et jusqu'à 26 % pour les pluies les plus importantes enregistrées en France (près de 100 mm en Corse). Par ailleurs, l'examen des mesures effectuées dans la vallée du Rhône a permis d'évaluer la variabilité des dépôts rémanents dans les environs de chaque station de Météo-France sur la base des 4 à 8 mesures effectuées dans un rayon de 1 km autour de chacune d'elles. Les coefficients de variation, calculés sur chaque site, sont compris entre 16 % et 26 % pour les pluies inférieures à 25 mm et jusqu'à 136 % pour les pluies les plus élevées, comme en témoignent sur la figure 6 les écarts entre les activités maximales et minimales mesurées (Renaud et Métivier, 2000). Les coefficients les plus élevés s'expliquent principalement par des phénomènes de migrations postérieurs aux dépôts. En effet, les plus fortes activités de ^{137}Cs ont été mesurées sur des surfaces extrêmement

Figure 6 – Activités en ^{137}Cs des sols de la basse vallée du Rhône en fonction des hauteurs de pluie mesurées par Météo-France les 3 et 4 mai 1986 (corrigés de la décroissance radioactive). Droite de régression et limites de l'intervalle de confiance de la droite de régression.

Soil ^{137}Cs surface activity (radioactive decay corrected) vs. Rainfall amounts recorded on the 3rd and the 4th of May 1986 in the lower Rhône valley and regression confidence interval.

planes dont on a pu vérifier qu'elles avaient conservé la totalité des dépôts. Les activités les plus faibles ont été mesurées sur des pentes qui, bien que faibles, ont perdu une partie des dépôts entraînés par les pluies en contrebas (Renaud *et al.*, 2001). Enfin, la confrontation entre des dépôts calculés au moyen de cette relation et des mesures effectuées sur une vingtaine d'autres sites de l'est de la France, a montré que l'écart est inférieur à 50 % (Renaud *et al.*, 2003).

Les incertitudes liées à l'application de la relation empirique (1) sont donc faibles au regard de celles liées au caractère aléatoire des pluies dont ont dépendu les dépôts radioactifs. En effet, il est possible qu'entre deux stations de Météo-France soient survenues des pluies plus ou moins importantes que celles enregistrées. Par ailleurs, une pluie ou un autre phénomène de concentration des dépôts, ayant pu conduire localement à des dépôts supérieurs ou inférieurs à ceux estimés dans cette étude, ne peuvent pas avoir été considérés et représentés. Ainsi, sur la côte orientale de la Corse, dans les environs de Solenzara, où les pluies ont dépassé 60 mm, les dépôts ont pu excéder $40\,000\text{ Bq m}^{-2}$ sur quelques communes qui ne peuvent être représentées à cette échelle. De même, les tâches d'activités

très élevées sur de petites surfaces (quelques décimètres-carrés) dues aux dépôts neigeux mises en évidence en montagne ne peuvent figurer sur cette carte (Pourcelot *et al.*, 2003). Des phénomènes locaux de re-concentrations, impluvium naturel, pieds d'arbres ou de toitures, ont pu conduire également à des dépôts significativement plus élevés sur quelques mètres-carrés.

La méthode d'interpolation spatiale, adoptée par la Communauté européenne et reprise dans cette étude, est une méthode déterministe qui ne permet pas d'évaluer les incertitudes associées aux interpolations. Seul le *krigeage* traite les probabilités et donc les incertitudes associées aux interpolations. Par ailleurs, compte tenu du nombre important de stations de Météo-France sur le territoire, une taille de la maille plus petite que celle utilisée pour dresser la carte de l'Europe, de 10 km de côté, permettrait une meilleure résolution. Ainsi, un complément indispensable à cette étude serait une inter comparaison des différentes méthodes d'interpolation spatiales, déterministes et géostatistiques, ces dernières permettant d'évaluer les incertitudes associées aux valeurs interpolées.

La prise en compte de la diminution est-ouest des masses d'air repose sur une régression exponentielle par rapport à la longitude (Éq. (3)). Malgré des coefficients de détermination R^2 satisfaisants, compris entre 0,6 à 0,84, il est possible qu'une étude plus précise des trajectoires des masses d'air puisse permettre la détermination d'une abscisse curviligne, qui, en restituant mieux ces trajectoires, améliore la modélisation de l'appauvrissement des masses d'air. Cette étude reste à développer.

La carte proposée ayant été établie sur la base des hauteurs de pluie mesurées, ne prend pas en compte les « précipitations occultes ». Il s'agit de dépôts par temps de brouillard qui n'ont pas donné lieu à des précipitations mesurables. Des études montrent que le brouillard concentre certains polluants atmosphériques (Herckes *et al.*, 2002). En revanche, la vitesse de dépôt au sol des polluants contenus dans ces brouillards est mal connue. Il est possible que les brouillards aient pu donner des dépôts radioactifs plus importants que des dépôts secs. En revanche, compte tenu des coefficients de lessivage estimés précédemment, une pluie de quelques mm suffit pour considérer comme négligeable les dépôts brumeux.

6. Comparaison de la carte obtenue avec les cartes des pays voisins

L'intégration de la carte obtenue dans celle de l'Europe de l'Ouest publiée par la Commission européenne en 1998 (Fig. 7) montre que les activités de ^{137}Cs déposées et les surfaces concernées sont cohérentes avec celles des pays voisins.

Figure 7 – Carte publiée par la Commission européenne en 1998.

Map published by the European Commission in 1998.

Dans l'est du pays, on retrouve des zones de dépôts croissants imbriquées les unes dans les autres à l'instar de celles qui caractérisent tout l'arc alpin. En Italie du Nord, Suisse et Allemagne du Sud, où les niveaux de précipitations ont été proches de ceux enregistrés sur les zones les plus touchées de France, les cartes

présentent des dépôts équivalents. Par exemple, dans la région de Lecco, d'Ivrea et au nord d'Udine, à Lugano et dans le sud de la Bavière, où les précipitations ont dépassé 40 mm, les dépôts ont été supérieurs à $20\,000\text{ Bq m}^{-2}$, comme dans les environs de Vaison-la-Romaine, de Lons-le-Saunier ou de la côte orientale Corse. Toutefois, les zones de dépôts les plus élevées, supérieures à $40\,000\text{ Bq m}^{-2}$ qui apparaissent sur l'arc alpin ne figurent pas sur la carte de France. De même, les zones comprises entre $10\,000$ et $20\,000\text{ Bq m}^{-2}$ ont souvent une extension moindre que celles de nos voisins de l'Est. Il est possible que ce marquage globalement plus faible soit en partie dû à l'appauvrissement des masses d'air avant qu'elles ne parviennent en France, par les pluies survenues sur l'arc alpin.

Les discontinuités transfrontalières sont dues au fait que la figure 7 n'est qu'un montage cartographique. Ces discontinuités disparaîtraient si les données qui ont servi à l'établissement de la carte de France étaient prises en compte dans le traitement d'interpolation spatiale de l'ensemble des données européennes. En effet, cette interpolation conduirait à passer progressivement, au niveau des frontières, des valeurs calculées en France à celles calculées à l'étranger, supprimant ainsi les effets de bords et refermant les courbes d'iso dépôts.

Au nord, les dépôts sur le sol français sont proches de ceux estimés en Belgique, au Luxembourg et en Allemagne. En revanche, s'il y a continuité entre la France et l'est de la Grande Bretagne, les fortes précipitations enregistrées dans l'est du Pays de Galle et de l'Écosse ont amené des dépôts importants, comparable à ceux de l'est de la France, alors qu'à la même longitude, les précipitations sur la Bretagne (Monts d'Arrée) ont conduit à de très faibles dépôts. Ceci s'explique par la trajectoire des masses d'air (Fig. 1) qui, après avoir survolé l'est de la France, sont parvenues sur les îles britanniques, laissant la Bretagne sur leur flanc ouest.

Comme la côte Atlantique française, l'Espagne a été épargnée par les retombées de l'accident de Tchernobyl.

7. Conclusion

La reconstitution des dépôts de ^{137}Cs sur la France, consécutifs à l'accident de Tchernobyl répond à deux préoccupations. Tout d'abord, il est important de disposer d'une carte qui puisse rendre compte de la répartition et notamment de l'hétérogénéité des activités de ^{137}Cs déposées en mai 1986, telles qu'elles peuvent être encore mesurées dans les sols aujourd'hui, et cela avec une précision approchant celle des autres pays européens. Par ailleurs, cette étude souligne l'importance des précipitations dans la constitution d'un dépôt radioactif consécutif à une contamination atmosphérique, et fourni des éléments qui permettraient une identification plus rapide des surfaces les plus exposées dans le

cas d'une nouvelle situation accidentelle. En effet, c'est sur la base de cette première appréciation des dépôts que sera établie une stratégie d'échantillonnage de l'environnement destinée à conforter notre connaissance des dépôts et à estimer l'atteinte de la chaîne alimentaire.

La reconstitution des dépôts de ^{137}Cs proposée dans cette étude repose sur des résultats de mesures et sur des relations empiriques établies entre ces résultats de mesures. Elle a été délicate pour trois raisons qui par ailleurs lui confèrent ses limites.

Tout d'abord, les 15 ans écoulés entre les prélèvements de sols et l'accident ont brouillé la perception que l'on a de la relation entre les pluies des premiers jours de mai 1986 et les dépôts radioactifs, telle qu'elle a pu apparaître aux scientifiques de certains pays qui l'on étudié beaucoup plus tôt. Cela a nécessité de montrer que les activités mesurées dans les sols en 1999 et 2000 étaient représentatives des dépôts de 1986 et que les sols, de part leurs caractéristiques, avaient conservé l'essentiel des activités déposées. L'analyse statistique a par ailleurs montré que, dans ces conditions, les incertitudes liées à cette relation « pluie-dépôts » sont faibles : statistiquement l'erreur que l'on peut faire en estimant un dépôt à partir d'une hauteur de pluie connue ne dépasse pas 26 %.

Une fois validée sur l'est du pays, l'application de cette relation à l'ensemble du territoire a nécessité de prendre en compte la diminution est-ouest de l'activité des masses d'air. Pour cela, une relation empirique a été établie entre les activités mesurées dans l'air et dans l'eau de pluie à l'époque et la longitude du site de prélèvement. Compte tenu de la bonne corrélation existant entre ces deux variables, la longitude reste le paramètre le plus pertinent si l'on souhaite se référer aux mesures faites en 1986. Toute modélisation plus complexe entraînerait des incertitudes plus importantes.

La troisième et principale source d'incertitudes qui constitue également la principale limite de cette carte provient de la connaissance que l'on a des pluies à un endroit donné. En effet, bien que très dense (3 700 stations réparties de manière assez homogène sur le territoire), le réseau de Météo-France ne permet pas de rendre compte de l'hétérogénéité locale des pluies, notamment dans les zones où elles ont été les plus abondantes. Une étude géostatistique devrait être menée pour évaluer les incertitudes associées à cette spatialisation des données. Cette étude permettra de déterminer l'intervalle de confiance des valeurs interpolées en utilisant différentes méthodes de construction cartographique.

Cette carte fournit donc une estimation des dépôts de ^{137}Cs en 1986 sur le territoire français, fiable en ce qui concerne leur ordre de grandeur, approximative

en ce qui concerne leur valeur à un endroit précis. C'est pourquoi son échelle de lecture est le 1/1 000 000-ème ou au maximum le 1/500 000-ème.

Elle constitue un point de départ pour des travaux complémentaires de vérification et d'interprétation. En effet, les estimations de dépôts faites pour les deux-tiers-ouest du pays ne peuvent être validées comme l'ont été celles du tiers-est, en raison de l'absence de mesures effectuées dans les mois suivant les dépôts. Néanmoins, des recoupements d'informations sont possibles et doivent être effectués avec les cartes précédemment établies et notamment celle déduite des mesures de lait et publiée en 1999 (Renaud *et al.*, 1999).

REFERENCES

- Bossew P., Ditto M., Flakner T., Eberhardt H., Kienzl K., Rapelsberger U. (2001) Contamination of Austrian soil with caesium 137, *J. Environm. Radioact.* **55**, 187-194.
- CCE (1998) ATLAS of caesium deposition on Europe after the Chernobyl accident, EUR 16733, Office for Publications of the European Communities, Luxembourg, European Commission, 176 A3.
- Chester R., Nimmo M., Corcoran P.A. (1997) Rainwater-aerosol trace metal relationship at Cap-Ferrat: a coastal site in the western Mediterranean, *Marine Chem.* **58**, 293-312.
- Clark M.J., Smith F.B. (1988) Wet and dry deposition of Chernobyl releases, *Nature* **332**, 245-249.
- DeBortoli M., Gaglione P. (1974) Variability of washout ratio for some fallout radionuclides. In: Physical behavior of radioactive contaminants in the atmosphere, *Proceeding of an International Atomic Energy Agency symposium*, Vienna.
- Doury A. (1983) Le vademecum des transferts atmosphériques, Rapport CEA-DSN 440.
- Dubois G., DeCort M. (2001) Mapping ^{137}Cs deposition: data validation methods and data interpretation, *J. Environm. Radioact.* **53**, 271-289.
- Herckes P., Mirabel Ph., Wortham H. (2002) Cloud water deposition at a high-elevation site in the Vosges mountains (France), *Sc. Tot. Envir.* **295**, 59-75.
- IPSN (1986) L'accident de Tchernobyl, IPSN2/86, Report, 163 p.
- Isaksson M., Erlandsson B., Linderson M. (2000) Calculations of the deposition of ^{137}Cs from nuclear bomb tests and from the Chernobyl accident over the province of Skane in the southern part of Sweden based on precipitation, *J. Environm. Radioact.* **49**, 97-112.
- McAulay I.R., Moran D. (1991) Relationships between deposition of Chernobyl originating caesium and ruthenium radionuclides and rainfall in Ireland, *Analyst.* **117**, 455-459.
- NCI-NDC (2001) National Cancer Institute, Human Services Centers for Diseases Control and Prevention, Health Consequences to the American population of nuclear weapons tests conducted by the United States, A report prepared for the U.S. Congress.
- Peckar M. (1996) Regional models LPMOD and ASIMD algorithms, parameterization and results of application to Pb and Cd in Europe scale, Co-operative Program for Monitoring and evaluation of the long range transmission of air-pollutants in Europe, EMEP/MSC-E Report 9/96.
- Pourcelot L., Louvat D., Gauthier-Lafaye F., Stille P., DelNero M. (2003) Mechanism of formation of concentration spots soils radioactivity in mountain soils, *J. Environm. Radioact.* **68**, 215-233.
- Renaud Ph., Louvat D. (2004) Magnitude of Fission Product Depositions from Atmospheric Nuclear Weapon Test Fallout in France, *Healph Phys.* (to be published).

- Renaud Ph., Métivier J.M. (2000) Caractérisation des zones de France Métropolitaines les plus touchées par les retombées de l'accident de Tchernobyl, Rapport IRSN/SERNAT 2000-33.
- Renaud Ph., Beaugelin K., Maubert H., Ledenvic Ph. (1999) *Les retombées en France de l'accident de Tchernobyl*. EDP Sciences, Les Ulis.
- Renaud Ph., Métivier J.M., Morello M. (2001) Modélisation de la répartition spatiale du ^{137}Cs dans la basse vallée du Rhône, Rapport IRSN/SERNAT 2001-17
- Renaud Ph., Métivier J.M., Pourcelot L., Morello M. (2003) Mapping of ^{137}Cs deposition over eastern France 16 years after the accident, *Sc. Tot. Environment*, **309**, 257-264.
- SCPRI (1986) République française, ministère de la Santé, Service central de protection contre les rayonnements ionisants, Bulletin mensuel de résultats de mesures de mai 1986.
- Thomas A.J., Martin J.M. (1986) First assessment of Chernobyl radioactive plume over Paris, *Nature* **321**, 817-819.