

**Eléments de réponse sur les représentations
cartographiques des retombées de l'accident de Tchernobyl
en France**

Philippe Renaud, Fabrice Leprieur, Jean-Michel Métivier, Laurent Pourcelot, Céline Duffa
Nathalie Lemaitre, Gerno Linden, Didier Champion

Rapport DEI n° 04-02

Mars 2004

IRSN INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE
 DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT ET DE L'INTERVENTION

BP 35, 78116 LE VESINET CEDEX, France - Télécopie : 01.30.15.37.78 - Téléphone : 01.30.15.52.42

Demandeur	Contribution au groupe de travail sur les conséquences de l'accident de Tchernobyl en France
Référence de la demande	Lettre IRSN 2003-2048 du 7 juillet 2003 adressée au Pr Aurengo
Numéro de la fiche programme	

Éléments de réponse sur les représentations cartographiques des retombées de l'accident de Tchernobyl en France

Philippe Renaud, Fabrice Leprieur, Jean-Michel Métivier, Laurent Pourcelot, Céline Duffa
 Nathalie Lemaitre, Gernö Linden, Didier Champion

Rapport DEI n° 04-02

Mars 2004

	Réservé à l'unité		Visas pour diffusion		
	Auteur(s)	Vérificateur *	Chef du SESURE	Directeur de la DEI	Directeur Général de l'IRSN
Noms	Philippe Renaud Fabrice Leprieur	Gernö Linden	Nathalie Lemaitre	Didier Champion	Jacques Repussard
Dates	24/03/04	25/03/04	25/03/04	25/03/04	26/03/04
Signatures					

* rapport sous assurance de la qualité

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION.....	3
2. CONTEXTE GENERAL DE L'ELABORATION PAR L'IRSN DE LA CARTE DE 2003	3
3. DESCRIPTION DE LA METHODE APPLIQUEE PAR L'IRSN POUR L'OBTENTION DE LA CARTE 2003	7
3.1. Première étape (2001) : cartographie de l'est de la France.....	7
3.1.1. Etablissement de la relation « pluie-dépôt » dans la basse vallée du Rhône.....	8
3.1.2. Application de la relation « pluie-dépôt » dans l'est de la France.....	8
3.2. Deuxième étape (2003) : généralisation à l'ensemble de la France	9
3.2.1. Conditions d'application de la relation « pluie-dépôt » sur l'ensemble du territoire.....	9
3.2.2. Diminution d'est en ouest des activités de l'air et de l'eau de pluie en mai 1986.....	9
3.2.3. Commentaires sur la carte de France des dépôts de ¹³⁷ Cs en mai 1986.....	12
4. EVALUATION DES INCERTITUDES SUR LA MODELISATION DES DEPOTS.....	14
4.1. Incertitude sur la relation pluie/dépôt.....	14
4.1.1. Incertitude sur l'établissement de la relation pluie/dépôt dans la basse vallée du Rhône	14
4.1.2. Incertitude sur l'extrapolation de la relation sur l'est de la France.....	15
4.1.3. Incertitude associée à la prise en compte du gradient est-ouest.....	16
4.2. Incertitude sur l'estimation des hauteurs de pluie.....	17
4.3. Appréciation d'ensemble sur la représentativité des cartographies des dépôts	19
5. CONFRONTATION DES DEPOTS CALCULES AVEC D'AUTRES SOURCES D'ESTIMATION DES DEPOTS EN FRANCE OU A L'ETRANGER.....	19
5.1. Exploitation des séries de mesures de ¹³⁷ Cs dans les sols autour des sites nucléaires	20
5.2. Exploitation des mesures effectuées par le SCPRI en mai 1986.....	27
5.2.1. Les mesures d'activité de l'eau de pluie	27
5.2.2. Mesures de sols effectuées par le SCPRI en 1986.....	30
5.2.3. Exploitation des mesures de ¹³⁷ Cs dans les aérosols en 1986	31
5.2.3.1. Protocole de mesure appliqué pour le contrôle de la radioactivité atmosphérique	31
5.2.3.2. Mesures réalisées en 2002 sur les filtres aérosols	32
5.2.3.3. Représentation cartographique et commentaires	33
5.3. Comparaison avec les cartes étrangères des dépôts de ¹³⁷ Cs	35
5.3.1. Généralités.....	35
5.3.2. Cas de la Grande-Bretagne.....	36
5.3.3. Cas de la Belgique	37
5.3.4. Cas l'Allemagne	37
5.3.5. Cas de la Suisse	37
5.3.6. Cas de l'Italie.....	37
5.3.7. Cas de l'Espagne	38
6. CONCLUSION	38
7. REFERENCES :.....	40

1. INTRODUCTION

Le présent rapport a été préparé dans le but d'apporter une contribution de l'IRSN au groupe de travail constitué autour du professeur A. Aurengo, chargé de « réaliser la cartographie de la contamination du territoire français suite à l'accident de Tchernobyl ». Plus précisément, en réponse à un questionnaire du professeur Aurengo sur la validité du modèle pluie-dépôt utilisé par l'IRSN pour établir la cartographie des dépôts de césium 137 en France, présentée en 2003, l'IRSN a proposé dans sa lettre en date du 7 juillet 2003, d'apporter « des éléments de réponse aux questions suivantes :

- *la vérification des résultats obtenus par la modélisation en les confrontant aux données disponibles sur l'eau de pluie ;*
- *la quantification des intervalles de confiance associés à ces estimations, en tenant compte des incertitudes sur le modèle de contamination de l'air et sur la relation pluie-dépôt ;*
- *l'explication des discontinuités aux frontières entre les prévisions du modèle et les mesures de dépôt effectuées dans les pays limitrophes de la France. »*

Dans ce rapport, après un bref rappel des méthodes utilisées pour élaborer les cartes des dépôts consécutifs à l'accident de Tchernobyl (carte des dépôts sur l'est de la France et carte des dépôts sur l'ensemble du territoire), la discussion porte sur les incertitudes des paramètres « clé » de la cartographie de 2003 (incertitudes de la relation pluie-dépôt et incertitudes sur les précipitations), ainsi que de la représentativité de la cartographie. Ensuite, les dépôts calculés sont confrontés aux données de mesures provenant d'autres sources : mesures de sols (mesures IPSN, 1991-2001, mesures SCPRI, 1986-1990) et mesures d'air et d'eau de pluie (mesures SCPRI, 1986). Enfin, à défaut de disposer des mesures utilisées pour l'élaboration de l'Atlas des dépôts de césium en Europe après l'accident de Tchernobyl, malgré la demande faite par l'IRSN auprès de la Commission Européenne, le rapport présente une comparaison avec les cartes extraites de cet atlas pour les pays frontaliers et commente les discontinuités observées aux frontières.

2. CONTEXTE GENERAL DE L'ELABORATION PAR L'IRSN DE LA CARTE DE 2003

En 1999, l'IPSN a entrepris un travail visant à préciser la répartition initiale des dépôts de ^{137}Cs en France consécutifs à l'accident de Tchernobyl. En effet, jusqu'alors n'avaient été publiées que des cartes de dépôts moyens régionaux ou départementaux, qui ne permettaient pas de rendre compte de l'importante hétérogénéité de ces dépôts. Parmi ces cartes, on peut citer :

- la carte des activités surfaciques moyennes régionales de ^{137}Cs (figure 1) publiée par le SCPRI en 1986 et établie à partir de 80 mesures d'échantillons « sol + couverture végétale » prélevés sur l'ensemble du territoire ;
- la carte des activités surfaciques moyennes départementales de ^{137}Cs sur les surfaces agricoles en mai 1986 (figure 2), établie par l'IPSN en 1997 [2] à l'aide du code de calcul ASTRAL à partir des mesures d'activité d'échantillons de légumes feuilles et de lait prélevés en 1986 dans les grands centres de collecte départementaux ;
- la carte des dépôts de ^{137}Cs publiée en 1998 dans l'Atlas européen [1] (figure 3), établie par interpolation de 71 mesures d'échantillons "sol + couverture végétale"

prélevés en 32 points du territoire national et fournies par l'OPRI, auxquelles la Commission Européenne a ajouté les mesures réalisées par l'université d'Harwell (Grande-Bretagne) sur 4 échantillons de sol français .

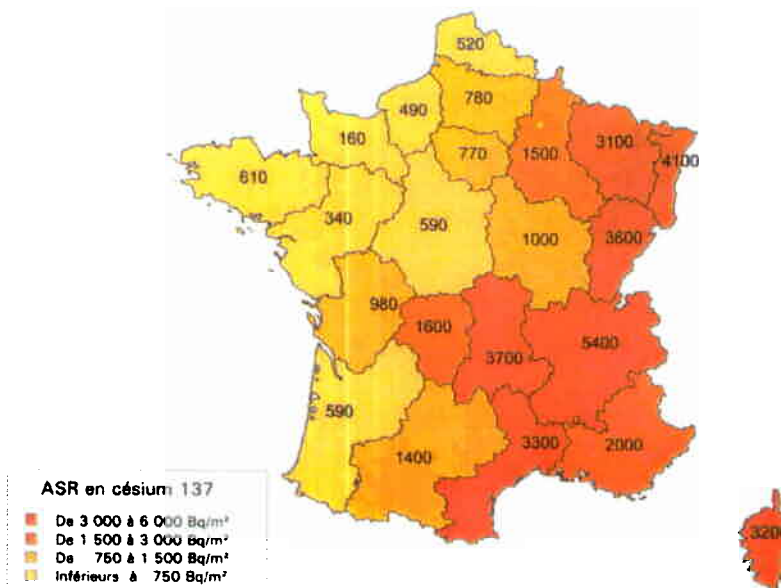


Figure 1 : carte des activités surfaciques rémanentes en césium 137 des surfaces agricoles en France en 1986, consécutives à l'accident de Tchernobyl. Mesure SCPRI (moyennes régionales) de 1986

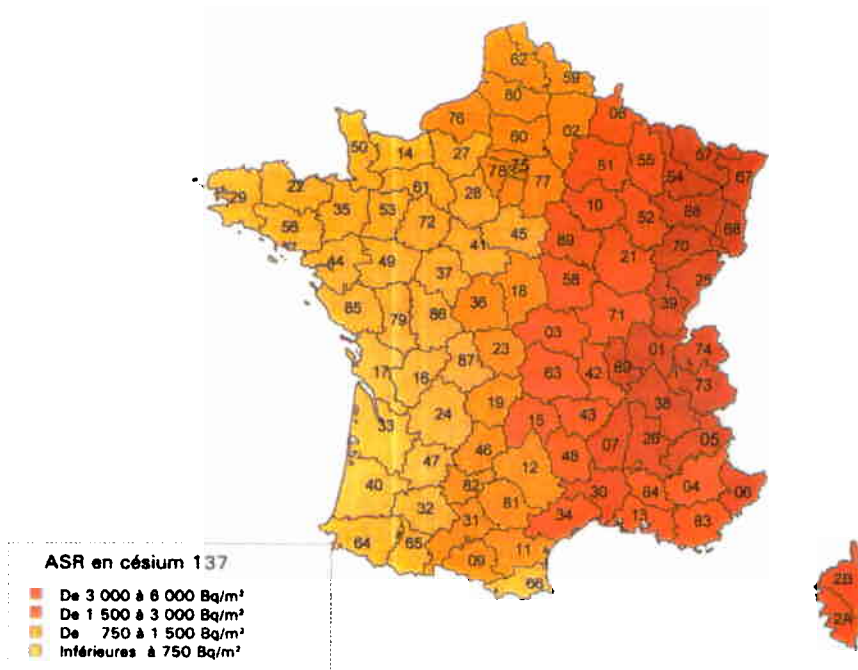


Figure 2 : carte des activités surfaciques moyennes départementales (numéros des départements indiqués sur la carte) en césium 137 des surfaces agricoles en France en mai 1986, consécutives à l'accident de Tchernobyl. Estimation par ASTRAL à partir d'activités mesurées dans le lait et les légumes feuilles par le SCPRI

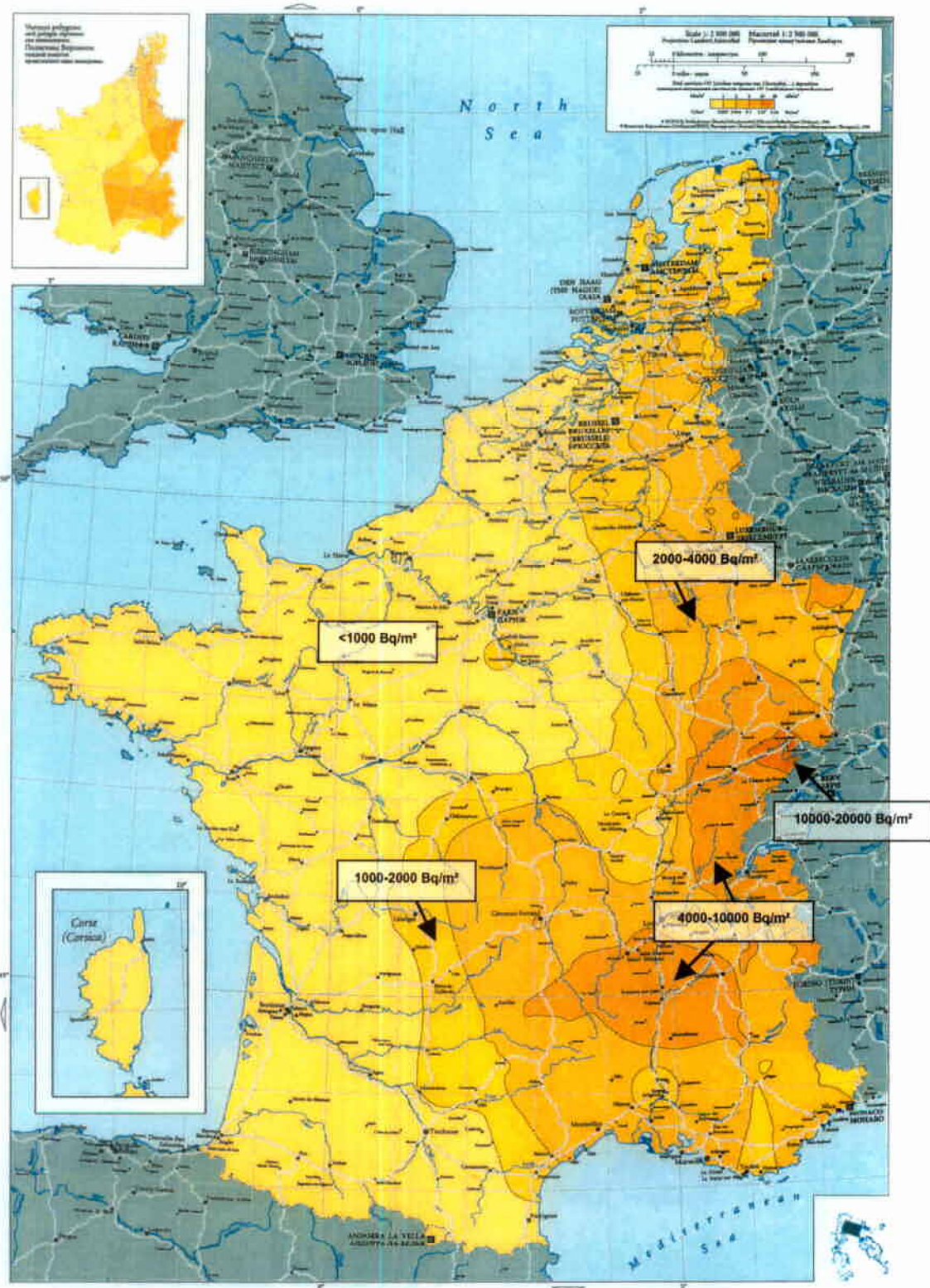


Figure 3 : carte des dépôts de césium 137 en France après l'accident de Tchernobyl en 1986, publiée dans l'Atlas européen

Ces cartes ont en commun de mettre en évidence une diminution générale est-ouest des dépôts. Dans le détail, il existe des écarts entre les cartes qui peuvent s'expliquer, d'une part par la densité et la représentativité des points de mesure, d'autre part par les techniques d'interprétation et de représentation cartographique de ces mesures.

Elles donnent une indication des dépôts « moyens » sur de grandes zones du territoire : la carte de l'Atlas européen est une interpolation à partir d'un nombre limité de points de mesure (32) ; celle établie par l'IPSN en 1997, à l'aide d'ASTRAL, est fondée sur des mesures de laits départementaux, avec un effet doublement intégrateur (de l'herbe diversement contaminée consommée par les vaches, puis regroupement du lait en coopérative).

Cette représentation de 1997, reflet de la contamination moyenne départementale du lait et des légumes feuilles, principaux contributeurs à l'atteinte de la population par ingestion d'aliments, peut être considérée comme satisfaisante pour estimer l'impact dosimétrique des retombées de l'accident de Tchernobyl pour une large majorité de la population. C'est notamment cette représentation de 1997 qui a servi au travail d'estimation des conséquences sanitaires de l'accident en France produit par l'InVS et l'IPSN en 2000 [16].

En revanche, dès 1997, l'IPSN soulignait dans son rapport [2] les limites de la représentativité de moyennes départementales pour des dépôts radioactifs très hétérogènes :

« de manière générale, l'utilisation de valeurs moyennes, même au niveau départemental comme dans la présente étude, conduit à masquer certaines disparités locales : effets des surfaces boisées, de l'altitude et de la pluviosité ».

« L'intensité des dépôts a été très étroitement liée aux pluies durant le passage des masses d'air contaminées. Ainsi, aux endroits où les précipitations ont dépassé 20 mm (...), les activités surfaciques déposées peuvent être jusqu'à 2 fois plus élevées que les moyennes départementales (...) » (p. 86, Chap. 2.3).

« Des activités moyennes d'environ 10 000 à 25 000 Bq.m⁻² peuvent être attendues sur l'ensemble des forêts des massifs de l'est de la France (Vosges, Jura, Alpes) » (p. 85).

Des valeurs mesurées par l'IRSN ou la CRII-RAD étaient fournies à titre d'exemple : de 1078 à 32 200 Bq.m⁻² dans le Bas-Rhin, de 2760 à 34 900 Bq.m⁻² dans le Jura, de 6730 à 31 820 Bq.m⁻² dans les Alpes-de-Haute-Provence. Bien que ces mesures aient été acquises sur la période 1987-1992, c'est-à-dire bien après l'accident de Tchernobyl, cette dispersion ne peut pas être expliquée par des phénomènes postérieurs au dépôt du césium ; en effet, de nombreuses études montrent que le césium 137 est très peu mobile dans les sols car piégé par les argiles, sauf dans des situations particulières (sols très sableux, par exemple) [13] [14]. Ainsi, cette hétérogénéité, bien qu'observée plus ou moins tard après l'accident, peut être considérée comme représentative de la situation initiale des dépôts de ¹³⁷Cs issus des retombées de l'accident de Tchernobyl.

Sur la base de ces observations, l'IPSN a entrepris en 1999 un travail visant à mieux comprendre et représenter les variations locales des dépôts liés à l'accident de Tchernobyl, principalement en rapport avec l'importance des précipitations pluvieuses lors du passage des masses d'air contaminées.

3. DESCRIPTION DE LA METHODE APPLIQUEE PAR L'IRSN POUR L'OBTENTION DE LA CARTE 2003

3.1. Première étape (2001) : cartographie de l'est de la France

La cartographie des dépôts de ^{137}Cs sur l'est du pays, proposée par l'IRSN en 2001 (figure 4), est fondée sur le constat d'une activité très hétérogène des sols dans la basse vallée du Rhône, et de la relation existant entre ces activités et les pluies survenues au cours de la première semaine de mai 1986, période durant laquelle les masses d'air contaminées ont survolé le territoire français. Les différentes bases d'établissement de cette carte, dont le détail est fourni dans le travail publié par l'IRSN [3], sont décrites ci-après.

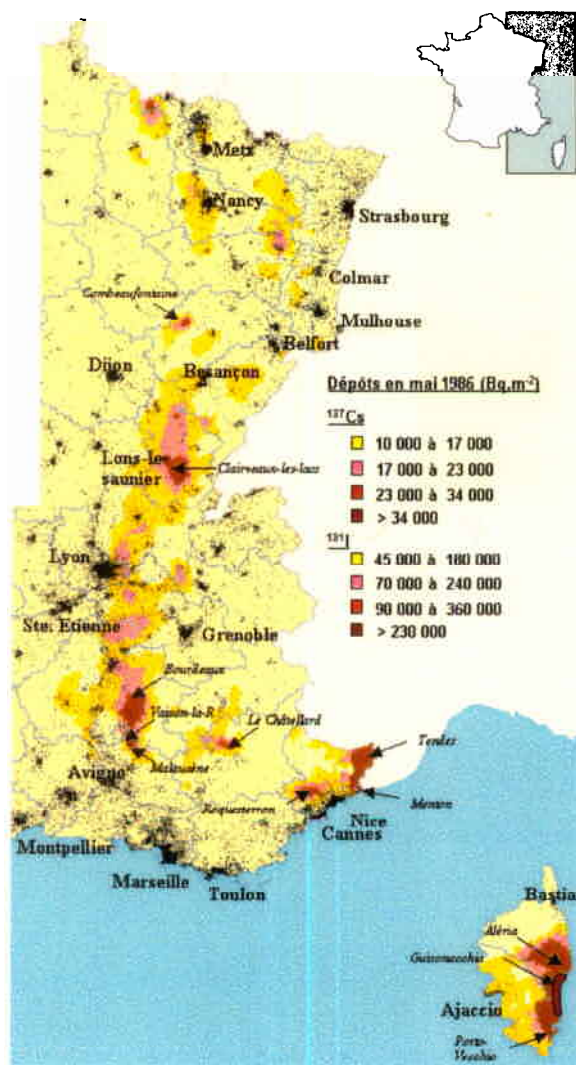


Figure 4 : estimation des dépôts de ^{137}Cs sur l'est de la France durant la première semaine de mai 1986, réalisée par l'IRSN en 2001 à partir d'une corrélation pluie-dépôt.

3.1.1. Etablissement de la relation « pluie-dépôt » dans la basse vallée du Rhône

Les mesures d'activité de ^{137}Cs dans 137 échantillons de sols prélevés entre 1999 et 2000 autour de 26 stations de Météo-France de la basse vallée du Rhône ont permis de quantifier cette relation par l'équation :

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

* cumul des précipitations qui ont eu lieu entre le 1^{er} et le 5 mai

Cette relation ne fait intervenir ni les mesures de l'activité de l'air, ni celles de l'eau de pluie effectuées en 1986, jugées trop peu nombreuses et difficilement interprétables pour l'objectif visé (cf. explications développées au paragraphe 5.2).

La pente de l'équation (1), $560 \text{ Bq.m}^{-2}.\text{mm}^{-1}$, est assez proche de celles obtenues dans d'autres pays d'Europe à la suite de l'accident de Tchernobyl, notamment au Royaume-Uni ($695 \text{ Bq.m}^{-2}.\text{mm}^{-1}$ [21]), en Irlande ($467 \text{ Bq.m}^{-2}.\text{mm}^{-1}$ [22]) et dans le sud de la Suède ($740 \text{ Bq.m}^{-2}.\text{mm}^{-1}$ [23]).

Cette pente, déterminée empiriquement à partir de mesures d'activité des sols et de hauteurs de pluie, rend compte du dépôt consécutif au lessivage des masses d'air par les pluies. Elle pourrait également être exprimée en Bq.l^{-1} , en considérant la hauteur de pluie (en mm) comme équivalente à un volume de pluie par unité de surface (en l.m^{-2}) ; elle représenterait ainsi l'activité volumique de l'eau de pluie résultant du lessivage des masses d'air. Dans la basse vallée du Rhône, l'activité de l'air au cours des 2 et 3 mai, jours précédant les épisodes pluvieux des 3 et 4 mai, était comprise entre 0,7 et 0,8 Bq.m^{-3} [3]. Il est ainsi possible d'en déduire une estimation du coefficient de lessivage (Washout ratio anglo-saxon) comprise entre $560/0,7$ et $560/0,8$, c'est-à-dire entre 700 et $800 \text{ Bq.l}^{-1}.\text{Bq}^{-1}.\text{m}^3$ (ou $\text{m}^3.\text{l}^{-1}$).

Ce rapport entre l'activité de l'eau de pluie et celle de l'air a été étudié par de nombreux auteurs. Il 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, d'autre part par entraînement des aérosols lors de leur chute. A 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 [24]. Par ailleurs, différentes études réalisées sur des polluants atmosphériques non organiques, radioactifs ou non, 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 $500 \pm 200 \text{ m}^3.\text{l}^{-1}$ et ceci quel que soit l'élément chimique constituant le polluant [17] [25] [26] [27] [28]. Le coefficient de lessivage de l'air apparaît ainsi comme un paramètre clé des modèles génériques de transfert atmosphérique des polluants.

En conclusion, le constat fait dans la basse vallée du Rhône, d'une relation linéaire directe entre la quantité de pluie tombée et les dépôts au sol est cohérent avec les conclusions tirées de différentes études portant sur ce phénomène, qui montrent que le rapport entre la charge en polluants non organiques de l'eau de pluie et celle de l'air est assez constant.

3.1.2. Application de la relation « pluie-dépôt » dans l'est de la France

Le 2 mai, juste avant les épisodes pluvieux, l'activité de l'air était homogène sur tout l'est de la France, comprise entre 0,5 et 1 Bq.m^{-3} , si l'on excepte l'Alsace et l'extrême sud-est où les valeurs mesurées ont dépassé 1 Bq.m^{-3} . Les 3 et 4 mai, cette

homogénéité était conservée pour des valeurs allant de 0,1 à 0,5 Bq.m⁻³, le quart sud-est se maintenant à des valeurs supérieures (0,5 à 1 Bq.m⁻³) (cf. § 5.2.3.3). La relation établie par l'équation 1 a pu ainsi être extrapolée à l'est d'une ligne Nîmes-Charleville-Mézières (longitude supérieure à 4° Est), compte tenu d'une relative homogénéité de l'activité des masses d'air sur cet ensemble. C'est sur cette base qu'a été établie la carte de la figure 4.

3.2. Deuxième étape (2003) : généralisation à l'ensemble de la France

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

Les explications fournies au paragraphe 3.1.1. sur le phénomène de dépôt pluvieux des aérosols atmosphériques montrent que la relation « pluie-dépôt » établie dans l'est doit pouvoir être appliquée à l'ensemble du territoire français métropolitain, à la condition de prendre en compte la variation de l'activité des masses d'air. Ainsi, dans une deuxième étape, l'IRSN a cherché à décrire cette variation, à l'échelle du pays.

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

En mai 1986, les activités volumiques en ¹³¹I et ¹³⁷Cs dans l'air ont été mesurées par le Service Central de Protection contre les Rayonnements Ionisants (SCPRI) dans sept villes de France, dans le cadre de son programme de surveillance de l'environnement [18]. Les activités moyennes de l'air pour deux périodes, du 1^{er} au 3 mai et du 4 au 31 mai, ont été publiées dans le bulletin mensuel du SCPRI de mai 1986. Par ailleurs, les services de protection radiologique de certains centres du Commissariat à l'Energie Atomique ont mesuré quotidiennement les activités de ces deux radionucléides dans l'air. Le tableau 1 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 le ¹³⁷Cs, elles vont de 0,8 Bq.m⁻³ à Nice à 0,05 Bq.m⁻³ à Cherbourg.

Tableau 1 : activité moyenne de ¹³¹I et ¹³⁷Cs dans l'air entre le 1^{er} et le 3 mai 1986

Site	Longitude*	Activités (Bq.m ⁻³)	
		¹³⁷ Cs	¹³¹ I
Cherbourg	-1,38	0,05	0,08
Biarritz	-1,32	0,01	0,02
Tours	0,43	0,11	0,28
Vésinet	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	0,60
Cadarache	5,45	0,83	4,2
Nice	7,12	0,80	1,5

* 0 = méridien de Greenwich

Cette évolution est-ouest est cohérente avec les trajectoires globales des masses d'air. Ainsi, seuls les rejets émis le 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 ces trajectoires du panache qui ont laissé à leur marge l'ouest de la France, d'autre part aux pluies importantes dans l'est de la France qui ont achevé le lessivage du panache qui avait déjà commencé lors des épisodes pluvieux sur l'Autriche, la Suisse, l'Italie du Nord et l'Allemagne du Sud.

La figure 5 montre que la diminution des activités volumiques dans l'air d'est en ouest est assez bien décrite par une relation exponentielle de la longitude, 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.

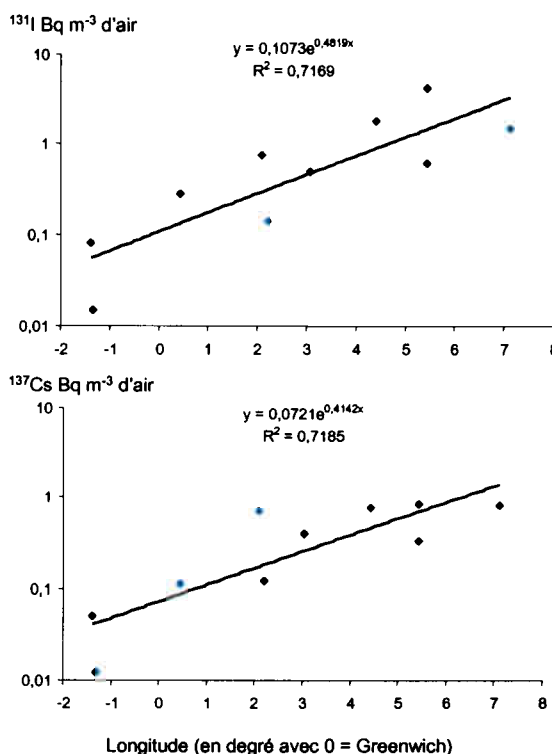


Figure 5 : variations des activités volumiques en ^{131}I et ^{137}Cs mesurées dans l'air entre le 1^{er} et le 3 mai 1986, en fonction de la longitude

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 du cumul des précipitations pendant la période du 1^{er} au 7 mai (figure 6) [18]. Les constantes de décroissance exponentielle d'est en ouest de l'activité de l'eau de pluie sont proches de celles des masses d'air : $0,39\text{ (}^\circ\text{) long}^{-1}$ pour le ^{137}Cs et de $0,47\text{ (}^\circ\text{) long}^{-1}$ pour ^{131}I .

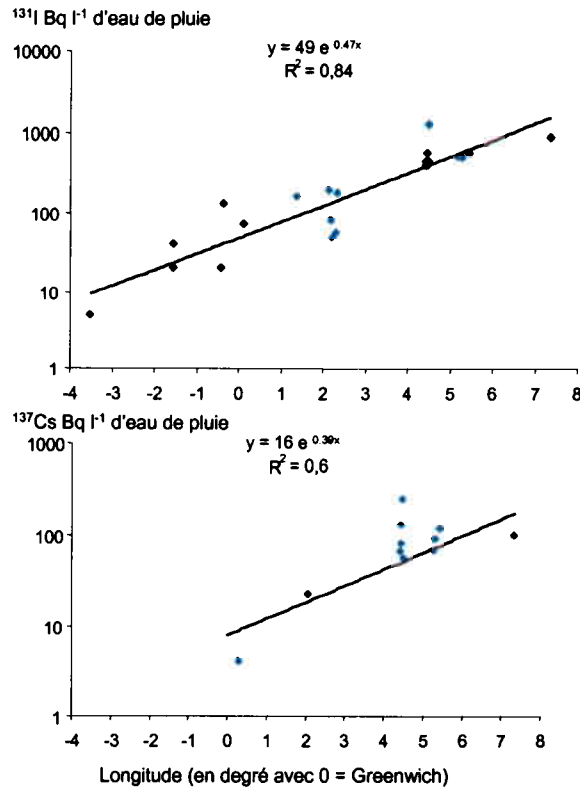


Figure 6 : variations des activités volumiques en ¹³¹I et ¹³⁷Cs mesurées dans l'eau de pluie du 1^{er} au 7 mai 1986, en fonction de la longitude

L'appauvrissement des masses d'air en ¹³⁷Cs et en ¹³¹I s'est donc traduit par une diminution d'est en ouest des dépôts pluvieux ainsi que des dépôts secs. Pour décrire globalement cette diminution sur l'ensemble du territoire, l'IRSN a retenu une fonction exponentielle décroissante de constante égale à 0,43 (°) long⁻¹, moyenne des quatre constantes obtenues pour ¹³⁷Cs et ¹³¹I dans l'air et l'eau de pluie. Les dépôts de ¹³⁷Cs de mai 1986 à l'ouest de 4° de longitude est ont ainsi été calculés, en fonction des hauteurs de pluie enregistrées par Météo-France et de la longitude (long i), par l'équation (2) [6] :

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

* cumul des précipitations qui ont eu lieu entre le 1^{er} et le 5 mai

La valeur de 1000 Bq.m⁻² est une estimation de l'activité surfacique déposée par temps sec [3].

3.2.3. Commentaires sur la carte de France des dépôts de ^{137}Cs en mai 1986

La figure 7 présente la carte de France des dépôts de ^{137}Cs en mai 1986, estimés à partir de l'équation (2) appliquée aux hauteurs de pluies mesurées par Météo-France sur plus de 3700 stations uniformément réparties sur le territoire français métropolitain. La méthode d'interpolation spatiale adoptée est celle utilisée par la Commission Européenne pour cartographier les dépôts de ^{137}Cs sur l'Europe [1] [29] [30].

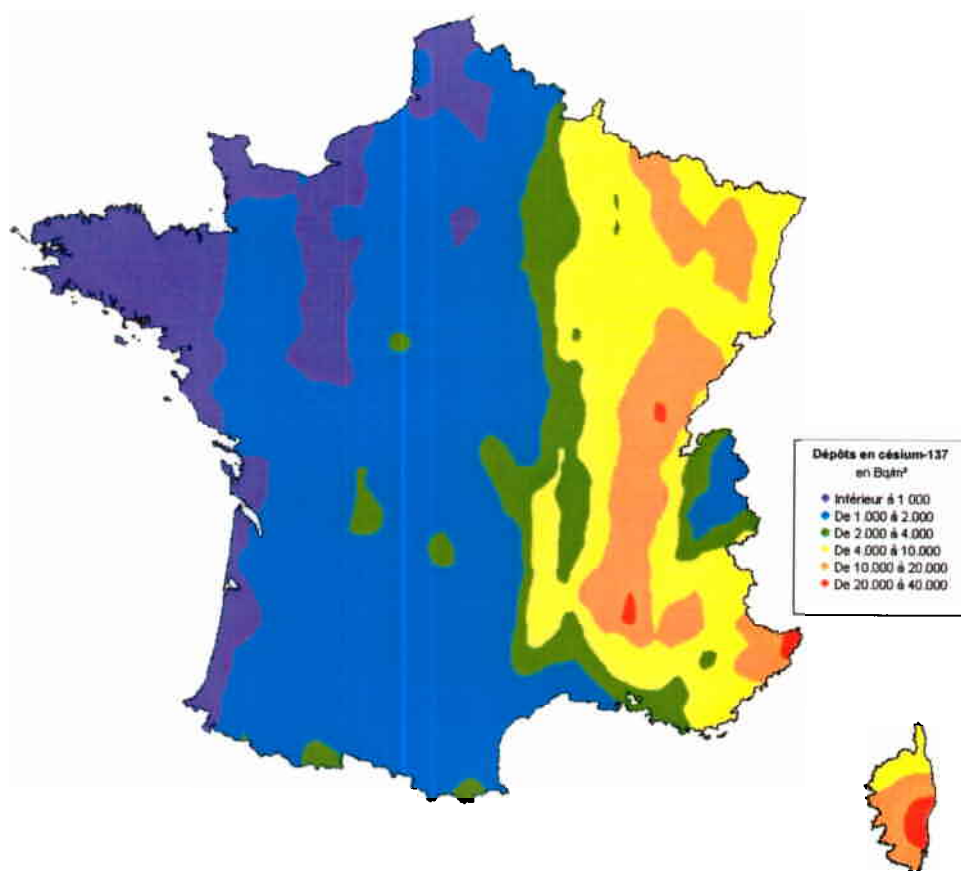


Figure 7 : carte des dépôts de ^{137}Cs sur la France en mai 1986, estimés en 2003 par l'IRSN à partir de la relation pluie-dépôt

La figure 8, 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.

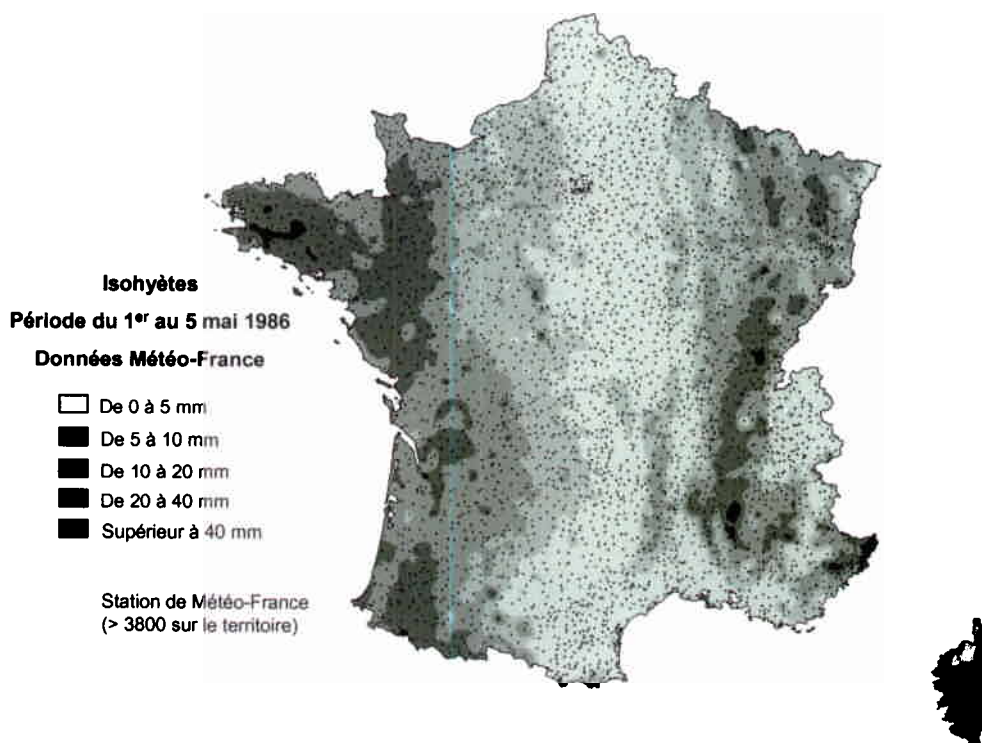


Figure 8 : carte des précipitations enregistrées par Météo-France entre le 1^{er} et le 5 mai 1986

Comme attendu, cette représentation cartographique montre 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 1000 Bq.m⁻² dans l'ouest. A l'est d'une ligne Nîmes-Charleville-Mézières (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 les territoires où les précipitations ont été les plus abondantes dans l'est de la France, les dépôts auraient pu, selon cette estimation, dépasser 20 000 Bq.m⁻². A 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, auraient accumulé des dépôts compris entre 4000 et 10 000 Bq.m⁻². Plus à l'ouest, les dépôts auraient été le plus souvent inférieurs à 2000 Bq.m⁻². L'effet des variations des hauteurs de pluie 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 estimés en deçà de 1000 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 aient pu entraîner 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 n'ont pas de réelle signification. Il s'agit d'artefacts liés au choix des classes de dépôts qui, compte tenu des incertitudes sur la démarche d'estimation, ne doivent pas conduire à stigmatiser les dépôts sur ces zones.

Les mesures de ^{137}Cs dans les sols aux alentours des C.N.P.E. d'EDF, obtenues dans le cadre des études radioécologiques menées par l'IPSN depuis 1991, constituent un élément de validation des dépôts résultant de l'application de cette relation sur l'ensemble du territoire (cf. paragraphe 5.1).

4. EVALUATION DES INCERTITUDES SUR LA MODELISATION DES DEPOTS

Les cartes de dépôts de ^{137}Cs proposées par l'IRSN résultent de l'application de modèles empiriques à une estimation pluviométrique. Il existe donc deux sources d'incertitudes, celle liée à l'application de la relation pluie/dépôts sur l'ensemble du territoire 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.

4.1. Incertitude sur la relation pluie/dépôt

4.1.1. Incertitude sur l'établissement de la relation pluie/dépôt dans la basse vallée du Rhône

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 météorologiques, d'autre part à prendre en compte la variabilité des activités mesurées autour de ces moyennes, qui est elle-même le reflet des variations initiales des dépôts à l'échelle locale et de l'évolution des dépôts entre mai 1986 et le moment du prélèvement pour analyse.

La figure 9 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 précipitation moyens (15 à 20 mm), et jusqu'à 26% pour les pluies les plus importantes enregistrées en France (près de 100 mm en Corse).

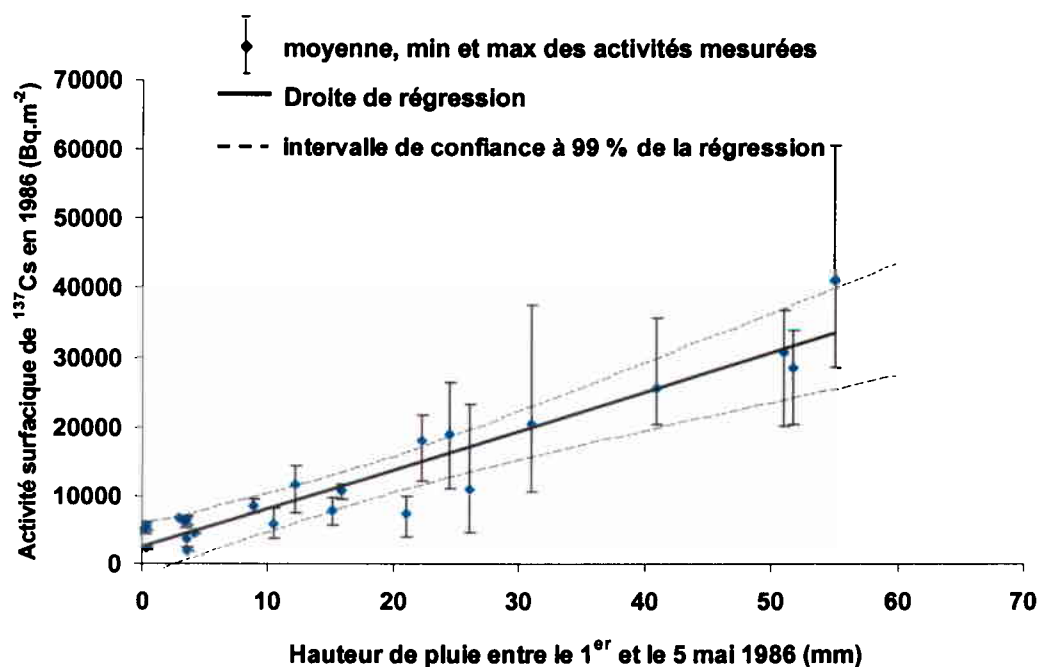


Figure 9 : activités en ^{137}Cs des sols de la basse vallée du Rhône (corrigées de la décroissance radioactive) en fonction des hauteurs de pluie mesurées par Météo-France durant la première semaine de mai 1986. Droite de régression et limites de l'intervalle de confiance de la droite de régression.

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 9, les écarts entre les activités maximales et minimales mesurées [3]. 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 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 [3].

4.1.2. Incertitude sur l'extrapolation de la relation sur l'est de la France

Une 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 (bassins versants du Var, du Tavignano et de la Moselle, en 1986 ainsi que Sisteron et la Roche de Glun, en 2001), a été effectuée [3]. Le tableau 2 montre que, dans de nombreux cas, le rapport entre les dépôts calculés au moyen du modèle et les activités mesurées dans les sols est proche de 1 (La Roche de Glun, Sisteron, St-Jean-d'Ormont, etc.). Dans les autres cas, les écarts restent inférieurs à 50%. Ils peuvent résulter d'une mauvaise estimation du dépôt par le modèle ou d'une insuffisante représentativité de la mesure de l'activité du sol.

Une mauvaise estimation du dépôt par le modèle est possible car la relation pluie-dépôt est entachée d'incertitudes liées à la détermination de la hauteur de pluie en un point par interpolation des valeurs mesurées sur les stations de Météo France (cf. § 4.2). Par ailleurs, les données de terrain témoignent de fortes variabilités de l'activité des sols sur les zones les plus arrosées : les coefficients de variation de l'activité des sols sont compris entre 41% et 136% [3] (cf. § 4.1.1).

Tableau 2 : Précipitations (1^{er}-5 mai 1986), dépôts de mai 1986 calculés à partir de la relation empirique (1) et activités surfaciques mesurées dans les sols des bassins versants du Var, de la Moselle et du Tavignano et mesures plus récentes

Zone étudiée (année)	Site	Précipitations (mm)	Activité ^{137}Cs calculée (Bq.m^{-2})	Activité moy. ^{137}Cs mesurée dans des sols (Bq.m^{-2})	Activité mesurée/activité calculée
Var (1986)	Entraunes	6	5 350	6 950	1,3
	Puget	10	7 600	3 450	0,5
	Mallaussène	12	8 700	3 700	0,4
	Madonne Utel	21	13 750	11 900	0,9
	Valdebore	25	16 000	11 300	0,7
	St Auban	25	16 000	15 100	0,9
	Isola 2000	30	18 750	12 100	0,6
	Boreon	32	19 900	25 250	1,3
Moselle (1986)	Esteng	36	22 150	22 050	1,0
	St Jean d'O.	33	20 450	23 500	1,1
Tavignano (1986)	Gérardmer	32	19 900	27 400	1,4
	Corte	39	23 800	15 500	0,7
Autres (2001)	Aléria	48	28 850	19 500	0,7
	La Roche de G.	37	22 700	19 800	0,9
	Sisteron	40	24 400	24 500	1,0

4.1.3. Incertitude associée à la prise en compte du gradient est-ouest

La prise en compte de la diminution est-ouest des activités des masses d'air repose sur une régression exponentielle par rapport à la longitude. Cette régression a été déterminée sur la base des activités moyennes en ^{137}Cs et ^{131}I des masses d'air entre le 1^{er} et le 3 mai 1986 sur 10 stations, et sur celles des eaux de pluie échantillonnées entre le 1^{er} et le 7 mai (cf. § 3.2.2). Une connaissance plus précise du gradient est-ouest est aujourd'hui disponible : en 2002, l'IRSN a réalisé un mesurage complémentaire des activités de ^{137}Cs des filtres relevés quotidiennement entre le 30 avril et le 6 mai sur 33 stations réparties sur l'ensemble du territoire (en 1986, ces filtres n'avaient fait l'objet que d'un mesurage bêta global). Les résultats sont présentés dans les graphiques ci-dessous (figure 10). Une représentation cartographique est également représentée au paragraphe 5.2.3.

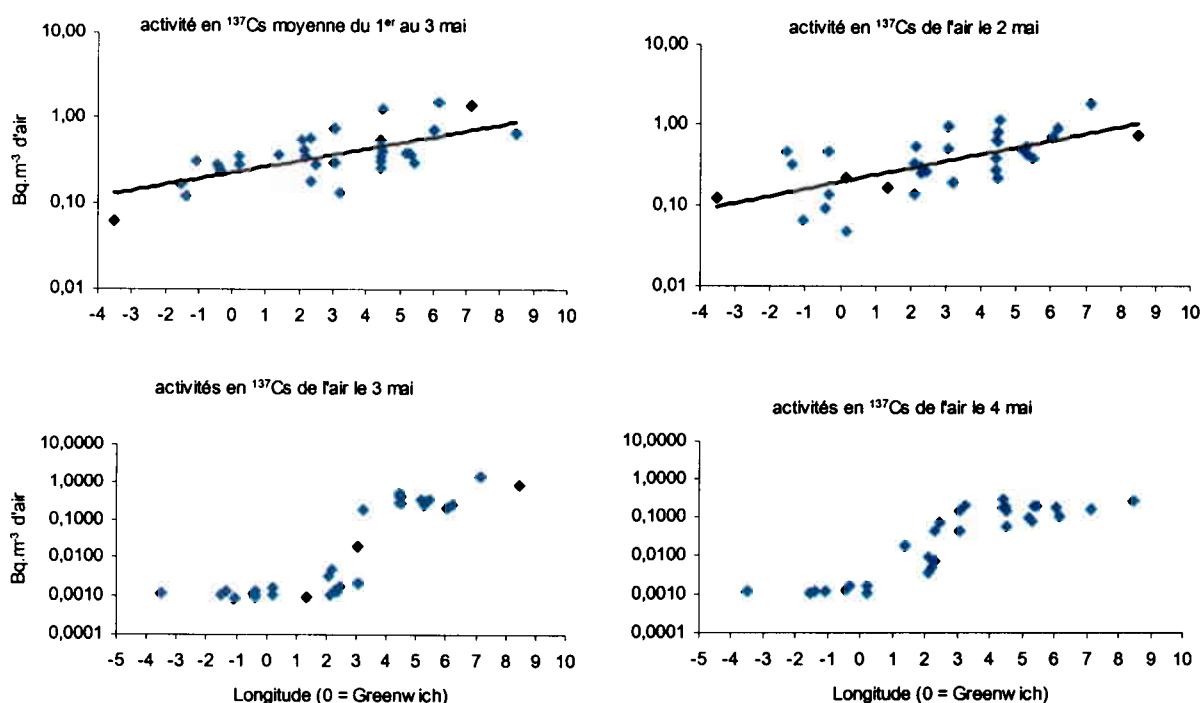


Figure 10 : variations des activités volumiques en ^{137}Cs mesurées dans l'air (moyenne 1^{er} - 3 mai ainsi que les 2, 3 et 4 mai 1986), en fonction de la longitude

L'activité moyenne de l'air entre le 1^{er} et le 3 mai sur ces 33 stations est présentée dans le graphique en haut à gauche. La diminution exponentielle d'est en ouest est légèrement moins marquée que dans la relation utilisée pour modéliser la carte de la figure 7. Elle aurait conduit à une estimation des dépôts deux fois plus élevée dans l'extrême ouest de la France. Mais, l'intérêt de ces nouveaux mesurages réside surtout dans la connaissance de l'évolution quotidienne de l'activité des masses d'air. Une importante discontinuité dans le gradient est-ouest apparaît notamment dans la diminution des activités mesurées le 3 mai, principal jour de pluie. Ce jour là, deux masses d'air se partageaient le territoire. Celle située à l'est de 3° de longitude, assez homogène (entre 0,2 et 1 Bq.m⁻³), présentait une activité deux cent fois plus élevée que celle située à l'ouest de cette longitude (0,001 à 0,005 Bq.m⁻³). Cette situation, qui est peut-être la conséquence de l'opposition de deux masses d'air aux caractéristiques différentes, formant le front perturbé à l'origine des pluies, tend à disparaître le 4 mai. La méconnaissance de cette situation et l'hypothèse d'une diminution est-ouest

continue de l'activité des masses d'air lors de l'établissement de la carte, ont pu conduire à surestimer ces activités de manière significative pour les longitudes du centre de la France. Néanmoins, cette surestimation éventuelle de l'activité de l'air ne se traduirait pas par une surestimation importante des dépôts en raison de très faibles précipitations sur cette zone (cf. figure 8, paragraphe 3.2.3). Les dépôts présentés dans la carte comme compris entre 1000 et 2000 Bq.m⁻², auraient été inférieurs à 1000 Bq.m⁻². De plus, il s'agit d'activités de l'air au niveau du sol et rien n'indique que le même gradient existait également à l'altitude où se condensent les gouttes d'eau.

Malgré une corrélation satisfaisante entre l'activité de l'air et la longitude (coefficients de corrélation compris entre 0,6 à 0,84 dans les graphiques des figures 5 et 6), il apparaît qu'une étude plus précise des trajectoires des masses d'air pourrait a priori permettre une meilleure description du gradient est-ouest de l'activité de l'air sur l'ensemble du territoire, en tenant compte à la fois de la longitude et de la latitude. Cependant, les enjeux liés à cette étude complémentaire sont faibles. En effet, sur une grande moitié ouest du territoire français, les dépôts estimés par modélisation restent faibles dans l'absolu, quel que soit le modèle appliqué, et l'intérêt d'une plus grande précision de l'estimation s'en trouve limité. Par ailleurs, l'utilisation d'un modèle mieux ajusté pour retracer le parcours des masses d'air resterait entaché d'incertitudes liées à l'interpolation entre les points de mesure, assez dispersés, ayant servi à caler le modèle.

4.2. Incertitude sur l'estimation des hauteurs de pluie

La cartographie des dépôts, présentée sur la figure 7, repose sur l'interpolation des hauteurs de précipitations mesurées en 1986 par les 3700 stations de Météo-France qui couvrent la totalité du territoire. Afin de s'affranchir des effets de lissage de cette interpolation, une première étape de la représentation cartographique de l'estimation des activités surfaciques en ¹³⁷Cs à partir de la relation « pluie-dépôt » discutée ci-dessus, consiste à ne fournir des valeurs que pour les 3700 stations. C'est ce que montre la figure 11.

A l'échelle de représentation cartographique retenue dans les travaux de l'IRSN, cette figure montre une distribution des dépôts tout à fait semblable à celle de la figure 7 qui résulte d'un traitement supplémentaire d'interpolation et de lissage en contours d'isovaleurs. Néanmoins, dans le détail, elle montre mieux l'hétérogénéité des précipitations et donc des dépôts radioactifs dans les zones les plus arrosées. Ainsi, dans la Meuse, et notamment au niveau de la frontière belge, des dépôts estimés localement supérieurs à 20 000 Bq.m⁻² (point rouge sur la frontière), se trouvent à quelques kilomètres de dépôts inférieurs à 10 000 Bq.m⁻² (points jaunes), et à quelques dizaines de kilomètres de dépôts localement inférieurs à 4000 Bq.m⁻² (points verts). Par conséquent, l'interpolation qui a conduit à attribuer dans la figure 7, des dépôts compris entre 10 000 et 20 000 Bq.m⁻² à toute une zone allant des Vosges à la frontière belge ne permet pas de représenter correctement ces hétérogénéités. Il en est de même, dans une moindre mesure, de l'arrière-pays niçois ou des abords de la vallée de la Durance.

La méthode d'interpolation spatiale utilisée par l'IRSN, identique à celle adoptée par la Commission Européenne dans son Atlas, est une méthode déterministe qui ne permet pas d'évaluer les incertitudes associées aux interpolations. Seul le krigeage permettrait de traiter les probabilités et donc les incertitudes associées aux interpolations sur les précipitations [15]. Il serait alors possible de réaliser une intercomparaison des différentes méthodes d'interpolation spatiales, déterministes et géostatistiques, ces dernières permettant d'évaluer les incertitudes associées aux valeurs interpolées.

Entre deux stations de Météo-France, la connaissance du dépôt et l'incertitude associée sont celles de la hauteur de pluie. Compte tenu du caractère très aléatoire des précipitations, cette incertitude peut être importante mais elle est difficile à quantifier exactement.

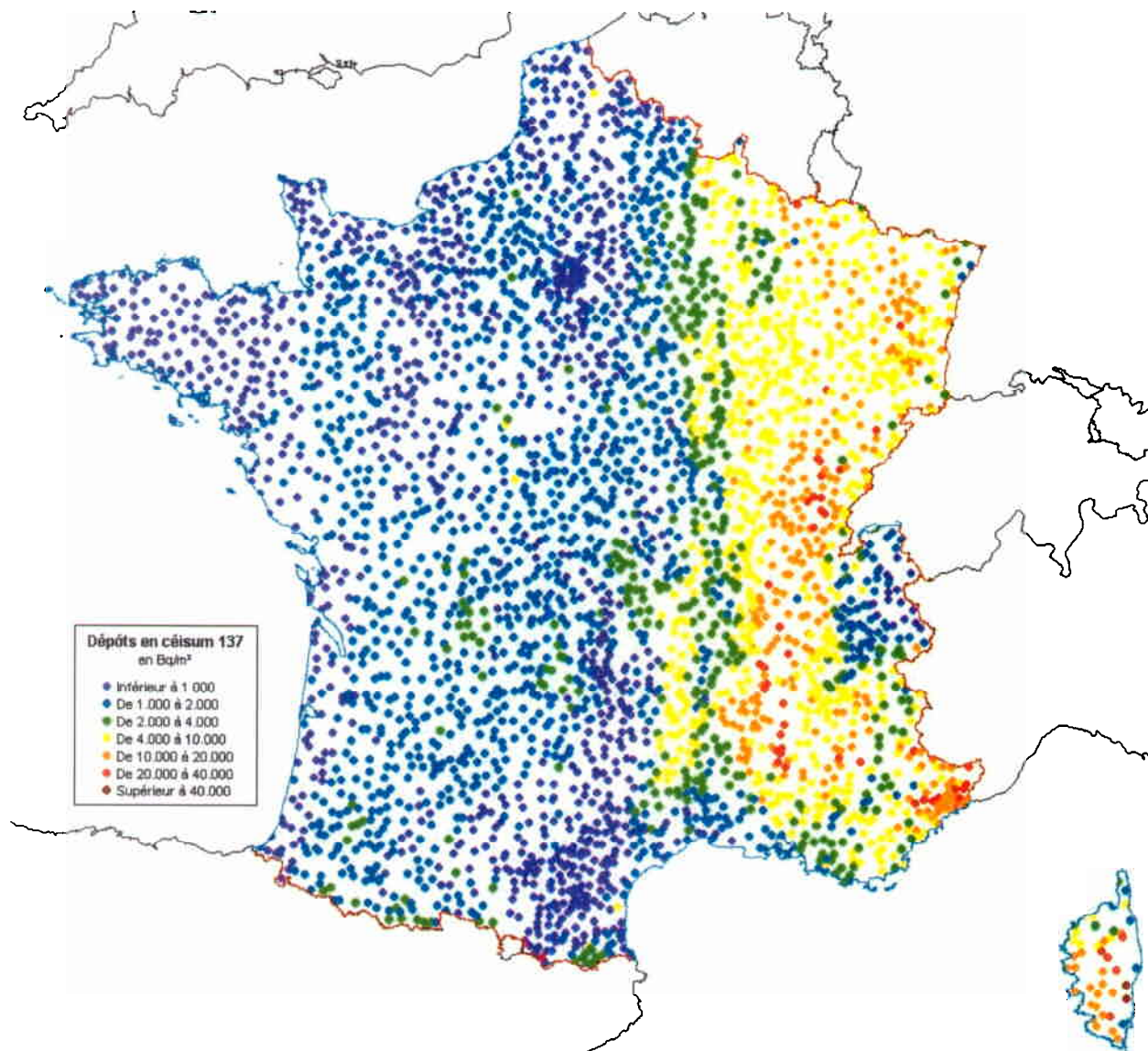


Figure 11 : répartition des stations Météo-France et valeurs des dépôts surfaciques calculés en chaque point à l'aide du modèle de relation pluie-dépôt

En conclusion, l'échelle de représentation cartographique utilisée par l'IRSN ne justifie pas d'approfondir l'analyse d'incertitude liée à l'interpolation entre les stations de Météo-France, compte tenu de la forte densité de points figurés à cette échelle (figure 11). En revanche, si l'intention était de faire une étude locale de la distribution initiale des dépôts au moyen de cette méthode (typiquement à l'échelle d'un département), la prise en compte de l'incertitude liée à l'interpolation deviendrait importante compte tenu de la variabilité locale des phénomènes pluvieux.

4.3. Appréciation d'ensemble sur la représentativité des cartographies des dépôts

De l'analyse qui précède, l'IRSN considère que la carte proposée à la figure 7 fournit 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 la valeur en un point précis. Compte tenu du paramétrage de la représentation cartographique, repris de celui utilisé pour l'Atlas européen, son échelle de lecture est le 1/1 000 000^{ème} ou au maximum le 1/500 000^{ème}.

A cette échelle, l'estimation apparaît acceptable pour l'est de la France, qui est la zone où les dépôts ont été les plus importants. Compte tenu du mode de construction empirique des modèles utilisés, l'incertitude relative sur l'estimation des dépôts augmente en se dirigeant vers l'ouest. L'IRSN considère que l'imprécision qui en résulte est d'une importance secondaire dans la mesure où l'ouest de la France est la partie la moins affectée par les retombées de l'accident de Tchernobyl.

A une échelle plus grande, typiquement départementale ou en deçà, il est possible qu'entre deux stations de Météo-France soient survenues des pluies plus ou moins importantes que celles enregistrées. Ainsi, 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. Notons que 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 Bq.m⁻² sur quelques communes qui ne peuvent pas être représentées sur une cartographie à l'échelle du territoire [5]. De même, les taches d'activités très élevées sur de petites surfaces (quelques décimètres carrés), dues aux dépôts neigeux, mises en évidence en montagne, ne peuvent pas apparaître dans le modèle cartographique [7]. Des phénomènes locaux de reconcentration, impluvium naturel, pieds d'arbres ou de toitures, ont pu conduire également à des dépôts significativement plus élevés sur quelques mètres carrés. Ainsi, la reconstitution du dépôt à une telle échelle, si la nature du sol s'y prête, doit s'appuyer sur l'expertise des activités et des rapports des activités des radioéléments artificiels encore mesurables dans les sols [4].

Les « précipitations occultes », c'est-à-dire les dépôts par temps de brouillard, n'ont pas donné lieu à des précipitations mesurables. Des études montrent que le brouillard concentre certains polluants atmosphériques [8]. En revanche, la vitesse de dépôt au sol des polluants contenus dans ces brouillards est mal connue. Il est possible que les brouillards aient donné des dépôts radioactifs plus importants que les dépôts secs [9]. Toutefois, compte tenu des coefficients de lessivage, une pluie de quelques mm suffit pour considérer comme négligeables les dépôts brumeux.

5. CONFRONTATION DES DEPOTS CALCULES AVEC D'AUTRES SOURCES D'ESTIMATION DES DEPOTS EN FRANCE OU A L'ETRANGER

Les dépôts estimés sur la partie est de la France ont été confrontés à quelques mesures de sols effectuées sur les zones les plus touchées par les retombées de l'accident de Tchernobyl (données 1986 et 2001) (cf. § 4.1.2). Il est proposé ici de confronter la cartographie à d'autres mesures d'activités effectuées par l'IRSN (études EDF 1991-2001) ainsi que le SCPRI (mesures d'activité des sols, de la pluie et de l'air de mai 1986). Cette approche permet d'éprouver la fiabilité du modèle empirique de dépôt et de discuter la pertinence d'autres indicateurs du dépôt (activités de l'air et de l'eau de pluie).

5.1. Exploitation des séries de mesures de ^{137}Cs dans les sols autour des sites nucléaires

L'IRSN dispose de 480 résultats de mesure de l'activité surfacique du ^{137}Cs dans les sols obtenus entre 1991 et 2001 dans le cadre des études radioécologiques réalisées chaque année autour des C.N.P.E. (Centres Nucléaires de Production d'Electricité), réalisées à la demande de l'exploitant EDF. Ces sites électronucléaires, au nombre de 20, sont relativement bien répartis sur l'ensemble du territoire. Sur chaque site, des prélèvements de sols cultivés sont réalisés tous les ans (20 cm de profondeur dans ces sols supposés homogènes), en tenant compte à la fois de la nature et de l'occupation du sol, ainsi que de la situation du prélèvement par rapport au rejet atmosphérique d'EDF. Les études radioécologiques ont, en outre, montré l'absence de marquage significatif dû aux rejets de césium par les C.N.P.E. dans le milieu terrestre [10].

La présence de ce radionucléide dans les sols s'explique :

- d'une part par les retombées des essais atmosphériques nucléaires pratiqués entre 1945 et 1980. Pour quantifier cet apport, l'IRSN s'est appuyé sur le modèle proposé par Mitchell et al. [11] [28] ;
- d'autre part par les dépôts liés à l'accident de Tchernobyl. Cet apport est déterminé au moyen de la relation (2).

Les graphiques de la figure 12 représentent l'évolution des séries de mesures de ^{137}Cs autour de chaque site, comparée à l'évolution théorique des dépôts calculés à partir des modèles en tenant compte de la décroissance radioactive du césium.

Ces graphiques montrent une forte variabilité des résultats autour d'un même site, d'un point de prélèvement à l'autre. Ainsi, cette variabilité dépasse un facteur 5 en 1992 sur le site de Creys et en 1996 sur le site de Fessenheim. Cette variabilité résulte des dépôts initiaux mais aussi de l'évolution des radionucléides après leur dépôt.

Autour de chaque site, on observe une décroissance générale de l'activité du ^{137}Cs au fil du temps. Les courbes de tendance calculées à partir des résultats de mesures permettent de quantifier une période de décroissance effective (T_{eff}) des activités dans les sols sous l'effet conjugué de la décroissance radioactive du ^{137}Cs (période $T_{\text{rad}} = 30,1$ ans) et de la migration dans les sols par lessivage, remaniement ou érosion (T_{mig} : période de perte par migration, variable selon le type de sol et les influences locales). La relation entre ces trois périodes est établie par l'équation 3 :

$$T_{\text{mig}}^{-1} = T_{\text{eff}}^{-1} - T_{\text{rad}}^{-1} \quad (3)$$

Les courbes de décroissance effective établies à partir des séries de mesures disponibles pour chaque site électronucléaire peuvent être extrapolées à l'année 1986, afin de pouvoir comparer la valeur d'activité surfacique ainsi déterminée avec celle calculée à partir des modèles de dépôt des retombées des essais nucléaires atmosphériques et des retombées de l'accident de Tchernobyl (tableau 3).

Les sites de Civaux et Cattenom ont été écartés de ce calcul, Civaux en raison d'une chronique insuffisante, Cattenom en raison d'une estimation de T_{eff} dépassant la période radioactive du ^{137}Cs (effet probable d'une forte variabilité des résultats de mesure). Pour les autres sites, les valeurs estimées de T_{mig} , comprises le plus souvent entre 9 ans et 26 ans, pour une moyenne de 15 ans, sont tout à fait cohérentes avec les connaissances radioécologiques sur ce paramètre et notamment avec les avis des experts consultés par la Commission Européenne et la Commission américaine de réglementation nucléaire en 1997 [32]. Les sites de Fessenheim et Tricastin présentent des périodes supérieures : 87 ans et 1155 ans, respectivement. Dans le cas de Tricastin, cette période très longue résulte d'une part des caractéristiques des sols de

la région, très argileux, qui piègent le ^{137}Cs , d'autre part de l'absence de labours dans les sols de vigne ou de verger échantillonnés [3] [5] [9] [12]. De telles périodes restent cependant dans les limites des valeurs retenues par les experts.

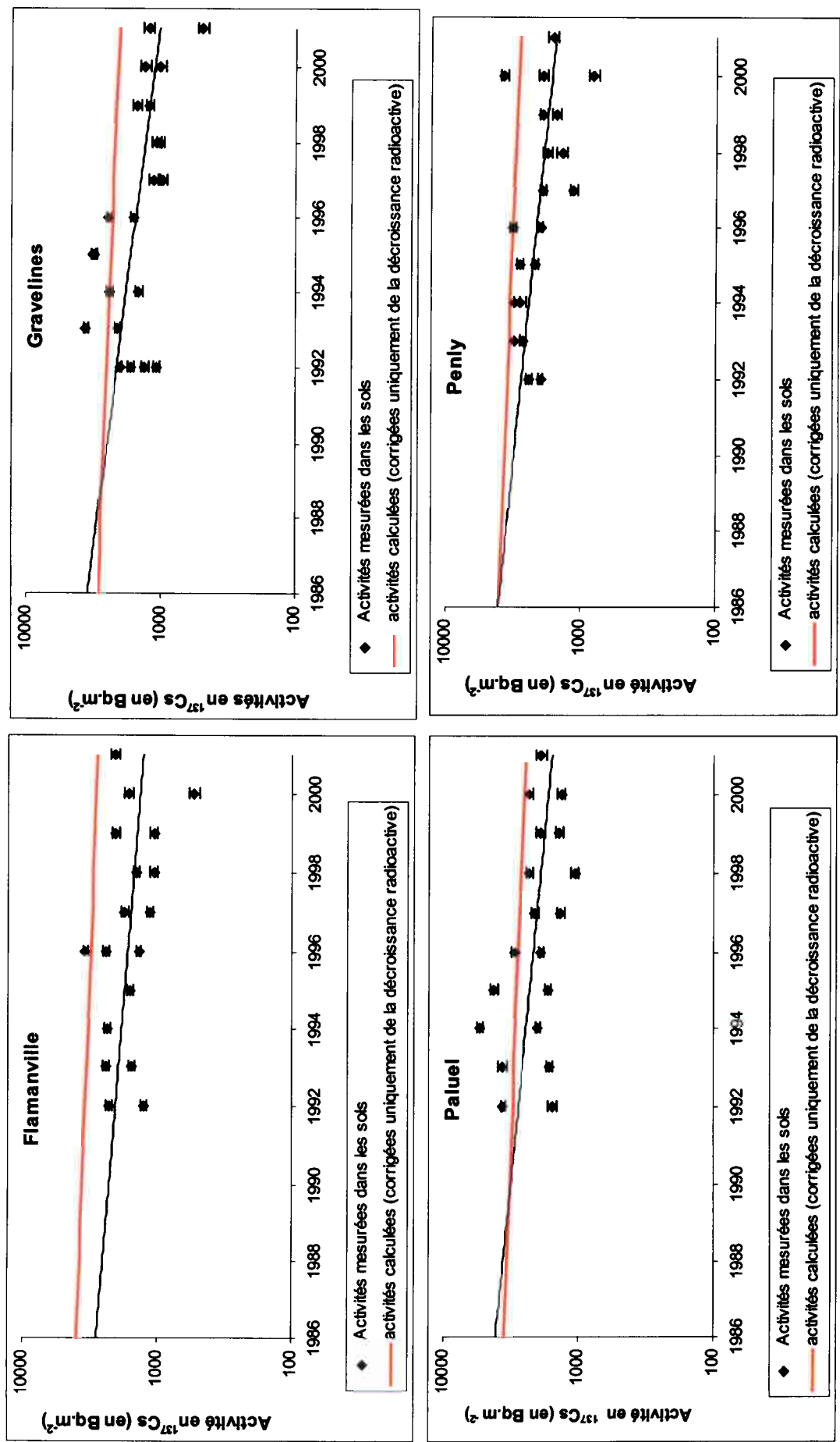
Tableau 3 : activités théoriques cumulées de ^{137}Cs des retombées des essais nucléaires et des dépôts de Tchernobyl comparées aux activités mesurées dans les sols lors du suivi radioécologique des C.N.P.E. (1991-2001) (données corrigées de la décroissance radioactive à l'année 1986 et exprimées en Bq.m^{-2}), périodes effectives (T_{eff}) et par migration (T_{mig}) de décroissance de l'activité de ^{137}Cs dans le sol (ans)

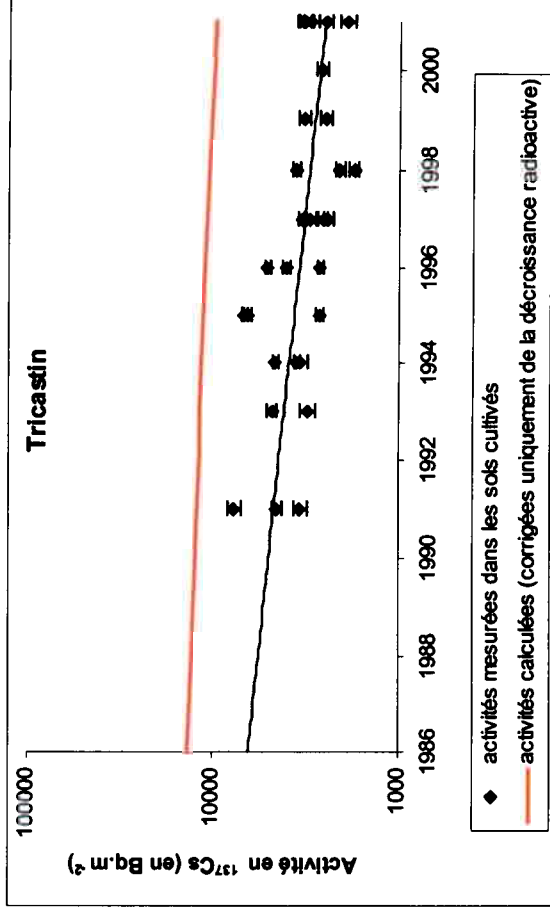
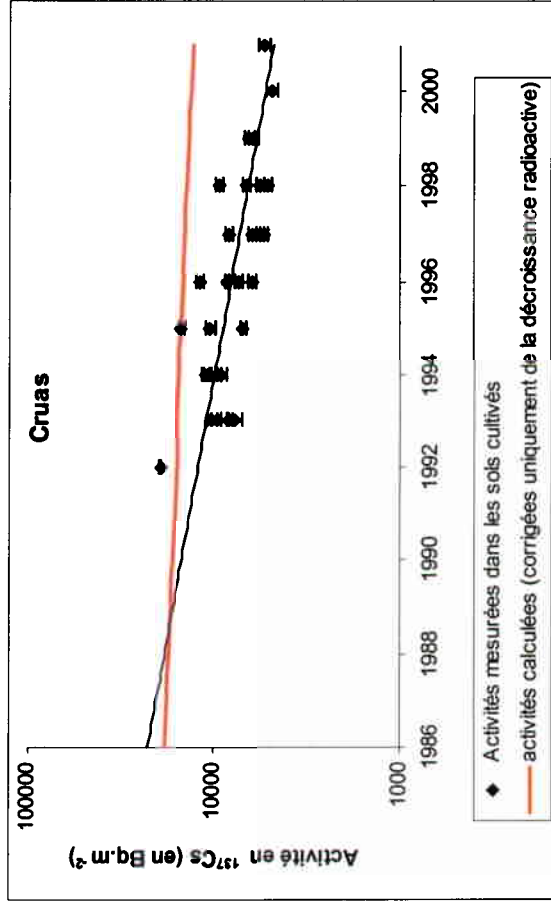
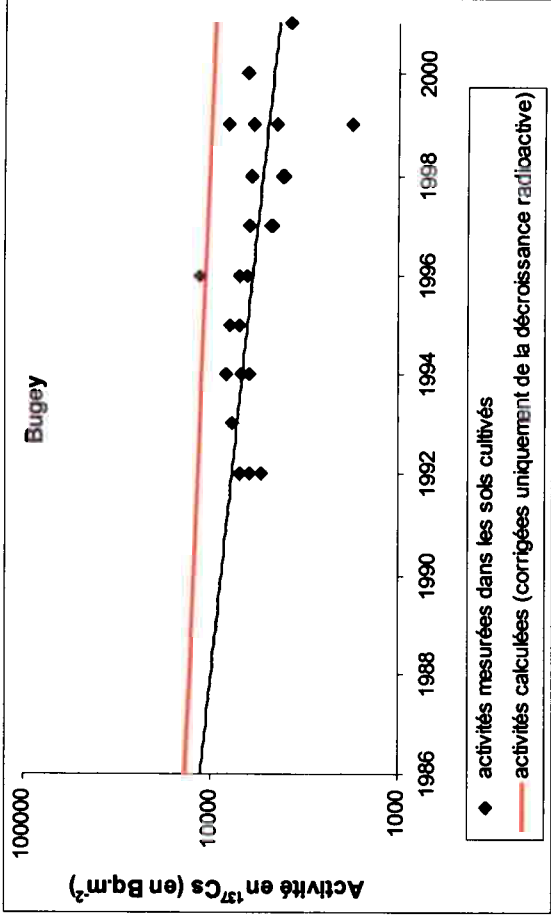
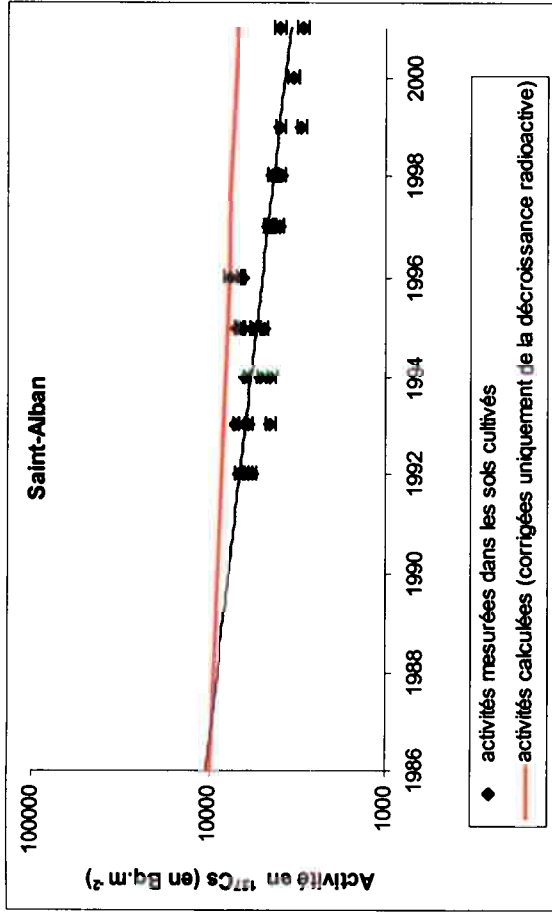
Sites nucléaires	Dépôts "Tchernobyl" calculés (Bq.m^{-2})	Dépôts "essais nucléaires" calculés pour l'année 1986 (Bq.m^{-2})	Dépôts cumulés « Tchernobyl + essais nucléaires » en 1986 (Bq.m^{-2})	Activité surfacique extrapolée à 1986 à partir des mesures autour des sites (Bq.m^{-2})	Période effective (an) T_{eff}	Période par migration (an) T_{mig}
Saint Alban	6900	2900	9800	10 000	9	14
Belleville	1750	2500	4250	3400	14	26
Blayais	1150	3250	4400	4000	8	11
Bugey	10 050	3450	13 500	10 100	11	17
Cattenom	11 250	2850	14 100		42	
Chinon	1000	2400	3400	4500	6	8
Chooz	7300	2850	10 150	6000	9	13
Civaux	1150	2600	3750			
Creys-Malville	10 100	3600	13 700	21 000	7	9
Cruas	15 000	3300	18 300	22 000	7	9
Dampierre	1250	2400	3650	4100	9	12
Fessenheim	6900	2450	9350	5000	22	87
Flamanville	500	3450	3950	2800	13	23
Golfech	1300	2350	3650	2900	12	20
Gravelines	450	2500	2950	3500	9	12
Saint-Laurent	1250	2450	3700	5500	8	10
Nogent	1750	2400	4150	4500	11	18
Paluel	700	2800	3500	4000	11	17
Penly	1100	2900	4000	4000	11	17
Tricastin	10 850	2900	13 750	6200	29	1155

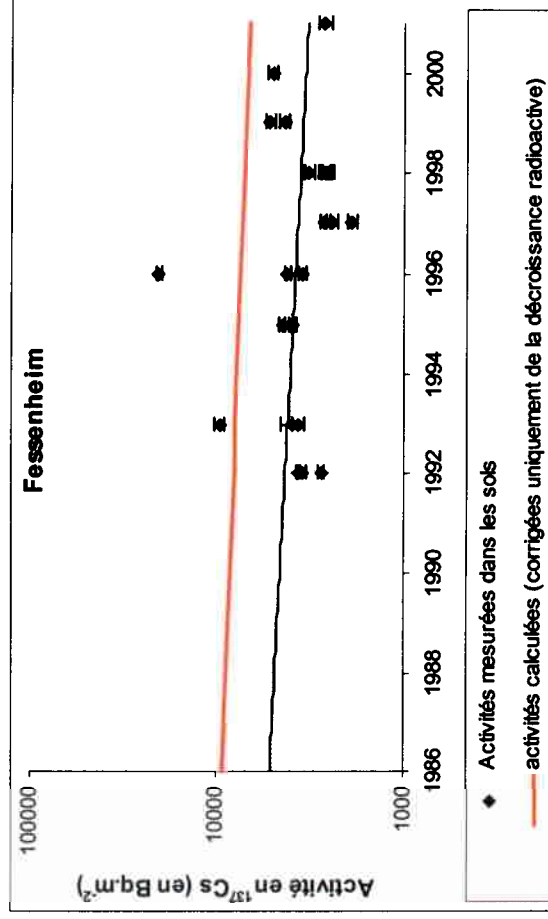
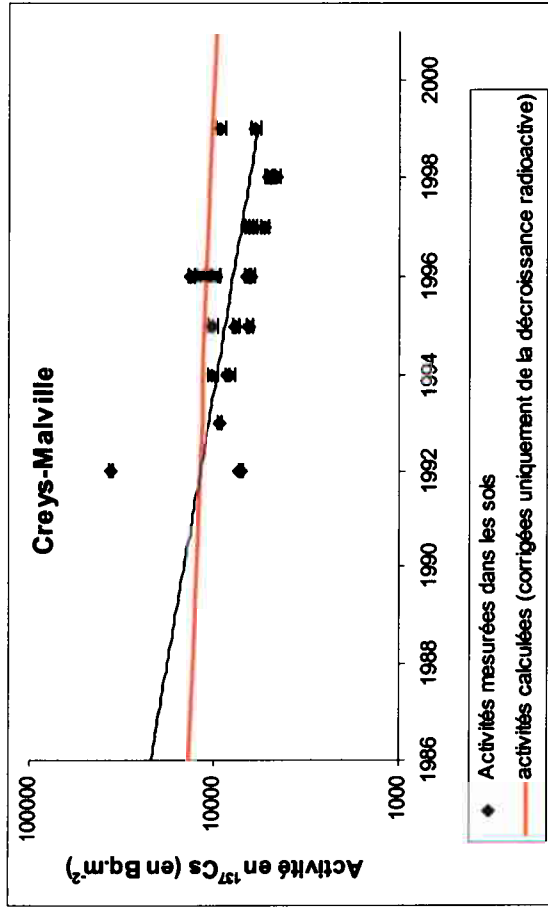
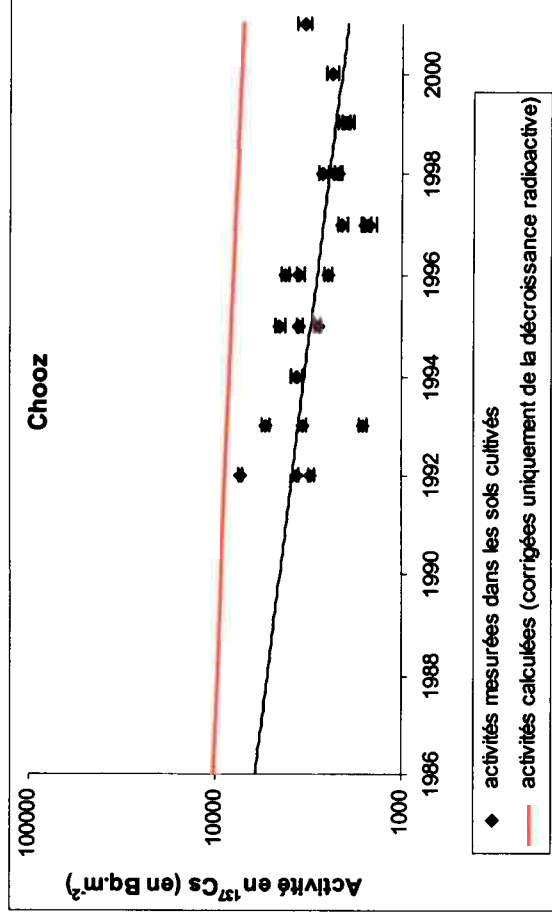
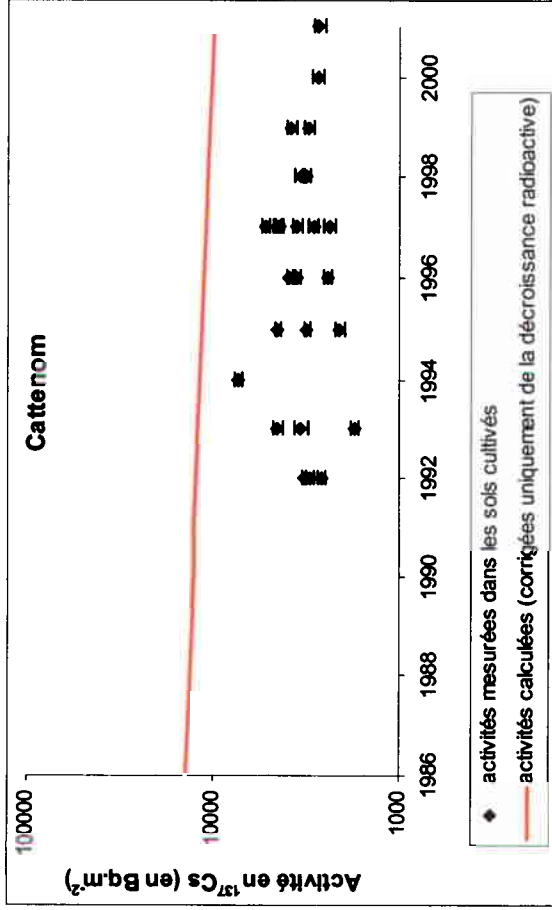
La confrontation des dépôts de mai 1986 ainsi estimés à partir des mesures et des dépôts calculés se révèle assez satisfaisante pour la plupart des sites. L'écart est inférieur à la variabilité observée entre les mesures faites sur un même site et souvent une même année.

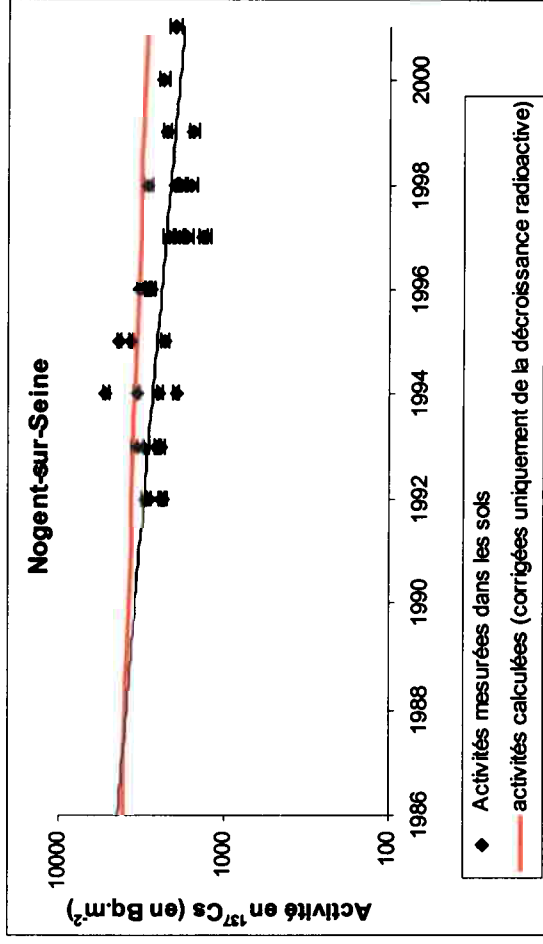
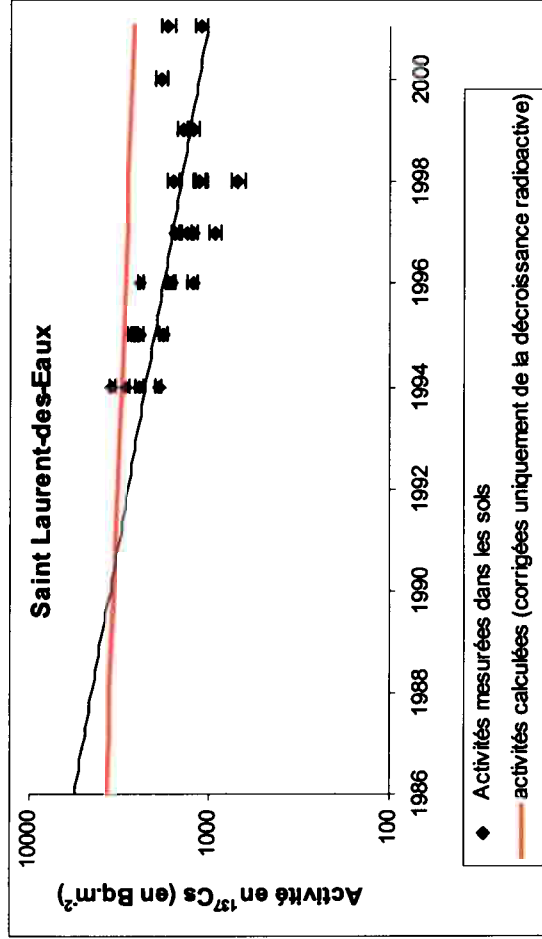
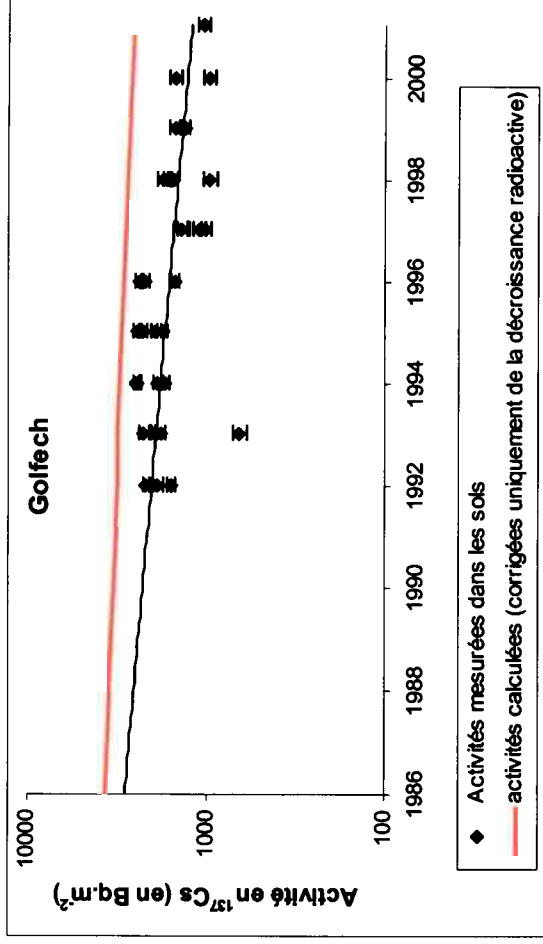
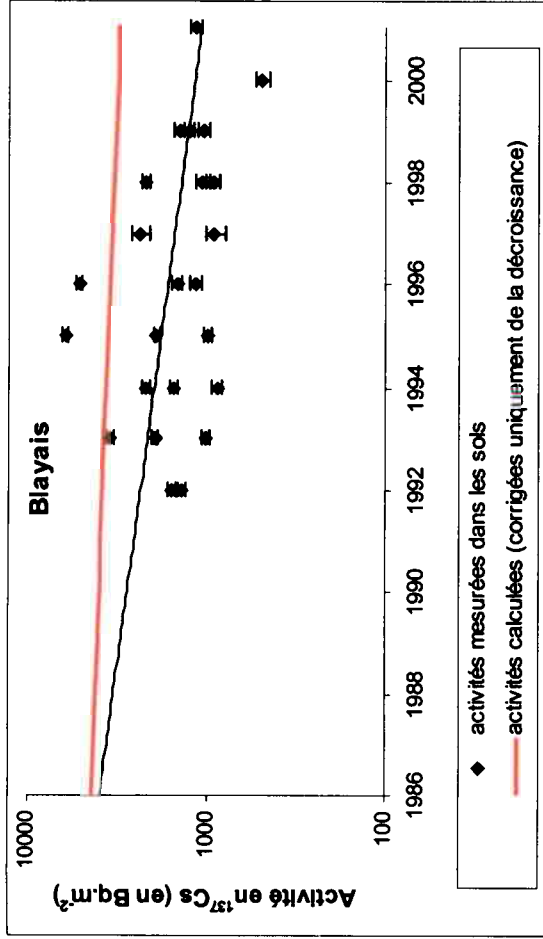
Dans quelques cas, les écarts entre les résultats de modélisation et la valeur extrapolée à partir des résultats de mesures atteignent un facteur 2 (sites de Fessenheim, Flamanville et Tricastin). Dans le cas de Flamanville, la contribution du ^{137}Cs provenant des retombées des tirs atmosphériques est importante. Il est probable que le césium de ces retombées a migré au delà de la profondeur de prélèvement (20 cm), conduisant à une sous-estimation par la mesure de l'activité du sol. Dans le cas de Fessenheim, l'importante variabilité des mesures mentionnée précédemment nuit à la représentativité de la période de décroissance apparente des activités dans les sols. Dans le cas de Tricastin, l'écart qui ne peut pas être imputé à une perte de ^{137}Cs par migration dans les sols, pourrait provenir d'autres sources de variabilité, notamment au caractère aléatoire des précipitations dans cette région.

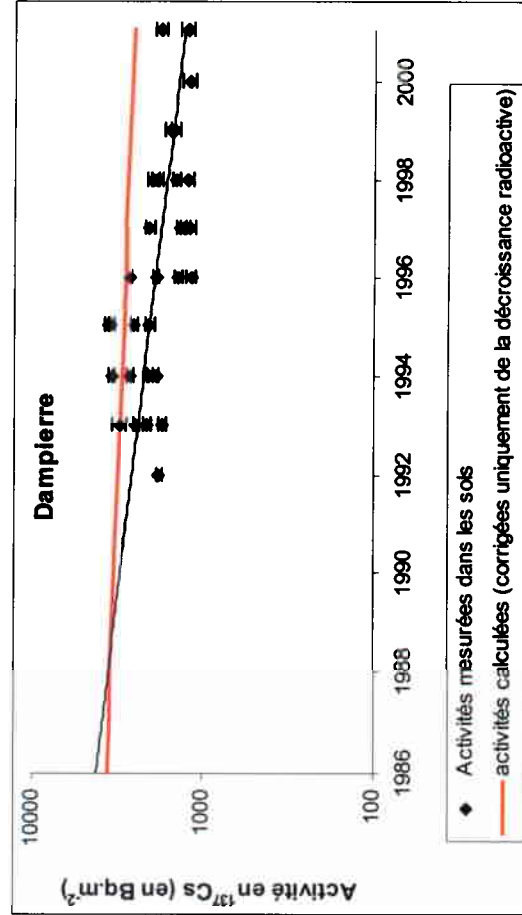
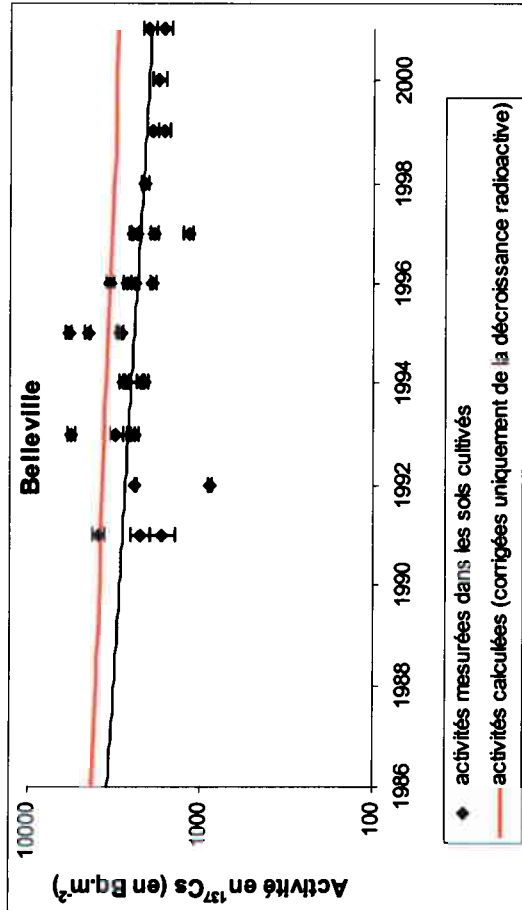
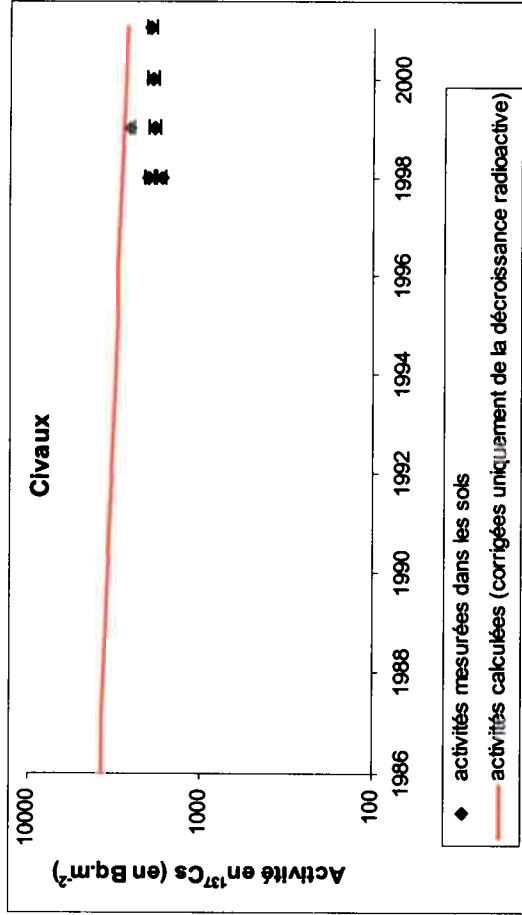
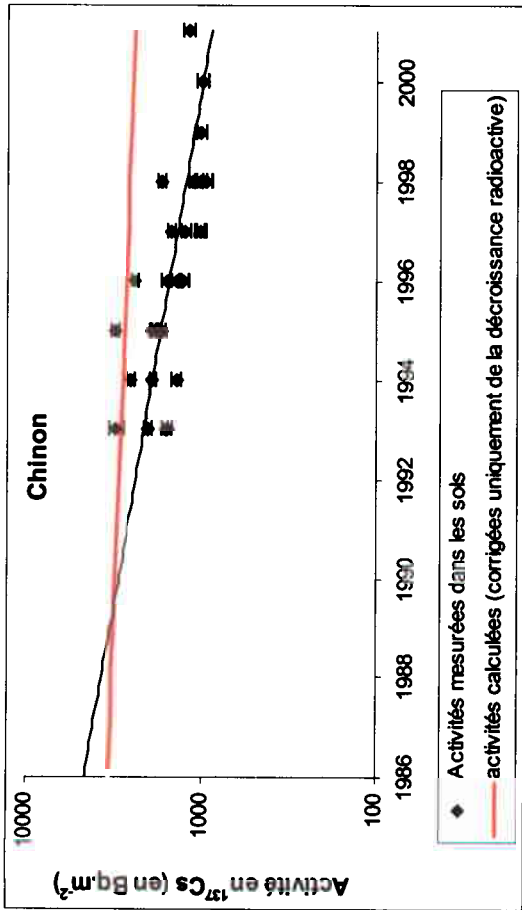
Figure 12 : Activités théoriques cumulées des retombées des essais nucléaires et des dépôts de Tchernobyl (en rouge) comparées aux activités mesurées dans les sols lors du suivi radioécologique des C.N.P.E. (1991-2001) (en noir)











En conclusion, le jeu de données fourni par les études radioécologiques effectuées au voisinage des C.N.P.E. depuis 1991 valident, pour la plupart des sites, l'ordre de grandeur des dépôts estimés par l'IRSN à l'aide de la relation pluie-dépôt.

5.2. Exploitation des mesures effectuées par le SCPRI en mai 1986

Dans le présent paragraphe, il est proposé de confronter l'estimation des dépôts de ^{137}Cs à partir de la relation pluie-dépôt explicitée précédemment aux mesures réalisées en 1986 par le SCPRI dans le milieu terrestre (mesure de sols avec végétaux) ou dans le milieu atmosphérique (mesures d'eau de pluie et d'air), susceptibles de constituer des indicateurs pertinents pour évaluer les dépôts.

L'analyse qui suit permet également de tester la cohérence des différentes sources de données environnementales et d'évaluer ainsi la possibilité de les utiliser pour caractériser les dépôts provoqués par l'accident de Tchernobyl, avec une fiabilité suffisante.

5.2.1. Les mesures d'activité de l'eau de pluie

Afin d'exploiter les mesures de l'activité du ^{137}Cs réalisées par le SCPRI sur les eaux de pluie collectées dans onze stations de l'est de la France, une première vérification consiste à tester la cohérence de ces mesures entre elles et avec les activités mesurées dans l'air lors des pluies (tableau 4). Ce tableau montre que les activités de l'eau de pluie sont extrêmement variables, allant de 7 Bq.l⁻¹ à Creys-Malville, à 250 Bq.l⁻¹ à Cruas.

Les activités de l'air entre le 1^{er} et le 5 mai 1986 fournies dans ce tableau pour 10 de ces stations ont été mesurées en 2002 par l'IRSN sur les filtres conservés depuis cette époque (cf. § 5.2.3). Ce mesurage *a posteriori* n'a pas pu être effectué dans le cas du site de Fessenheim pour lequel l'IRSN ne dispose que de l'ordre de grandeur de ces activités. Durant ces 5 jours, des pluies sont survenues, principalement les 3 et 4 mai. Les cumuls de précipitations entre le 1^{er} et le 5 mai fournis dans le tableau vont de 7,6 à 25,6 mm.

Les pluies survenues après le 5 mai et dont les cumuls sont donnés pour les périodes du 6 au 7 mai et du 10 au 11 mai n'ont fait que diluer les activités des eaux de pluie recueillies sur les périodes indiquées dans la 3^{ème} colonne du tableau. Le tableau fournit les valeurs du coefficient de dilution, c'est-à-dire la part des précipitations du 1^{er} au 5 mai par rapport aux précipitations totales collectées durant la période de prélèvement, calculées selon l'équation 4 :

$$\text{Coeff. Dilution} = P_{1-5 \text{ mai}} (\text{mm}) / P_{\text{pendant la durée du prélèvement}} (\text{mm}) \quad (4)$$

A St Alban par exemple, les 14,3 mm tombés entre les 6 et 7 mai ont diminué d'un facteur 2 (dilution de 0,5) les activités présentes dans les 13,9 mm correspondant aux pluies des 3 et 4 mai. Dans le cas de Creys-Malville, les pluies du 6 mai n'ont que très peu dilué les activités des pluies des 3 et 4 mai (dilution de 0,9). Le tableau donne les valeurs de l'activité volumique de l'eau de pluie corrigée de ce coefficient de dilution.

Dans la vallée du Rhône, des précipitations d'intensité variable sont survenues les 3 et 4 mai. Durant ces deux jours, les activités volumiques dans l'air étaient homogènes spatialement et dans leur évolution. Mais, pour proposer une stricte comparaison de l'activité volumique de l'air avec celle de l'eau de pluie, nous avons calculé l'activité volumique moyenne de l'air juste avant les épisodes pluvieux en prenant en compte la répartition des hauteurs de précipitation. Cette valeur d'activité de l'air pondérée, fournie dans la dernière colonne du tableau, est calculée par l'équation 5 :

$$\text{Activité vol. pond. air} = \sum [P_{i \text{ mai}} (\text{mm}) \times \text{Activité vol. air}_{i-1 \text{ mai}}] / P_{1-5 \text{ mai}} (\text{mm}) \quad (5)$$

Dans la vallée du Rhône, les activités volumiques de l'air ainsi pondérées étaient assez proches : 0,43 Bq.m⁻³ à Cruas, 0,47 Bq.m⁻³ à Creys-Malville et Bugey, 0,50 Bq.m⁻³ à Tricastin.

Le rapport entre l'activité de l'air et celle de l'eau de pluie est un paramètre assez bien connu en radioécologie. De manière générale, ce rapport, qui rend compte d'un phénomène physique de chargement des gouttes d'eau, varie peu (cf. paragraphe 3.1.1). Ainsi, l'activité volumique de l'eau de pluie pour ces trois sites devrait être assez proche (pour un coefficient de lessivage de 700 m³.l⁻¹, l'activité volumique de l'eau de pluie devrait être de 315 Bq.l⁻¹ lorsque l'activité volumique de l'air est de 0,45 Bq.m⁻³) ; or il apparaît que les valeurs mesurées sur ces 3 sites ont été extrêmement variables, allant de 6,6 Bq.l⁻¹ à Creys-Malville à 250 Bq.l⁻¹ à Cruas. La forte variabilité des activités de l'eau de pluie présentée dans le tableau 4 n'est donc pas cohérente avec la connaissance acquise sur le processus physique de chargement des gouttes d'eau.

Il résulte de cette analyse que les activités mesurées dans l'eau de pluie en 1986, par le SCPRI, ne sont pas cohérentes entre elles, ni avec les mesures d'activité volumique dans l'air. La cause de cette incohérence est encore à l'étude ; actuellement, l'IRSN recherche et examine les données encore disponibles sur les conditions de réalisation des prélèvements et d'analyse des échantillons de pluie, afin de dégager des éléments d'explication acceptables. Dans l'immédiat, ces mesures d'eau de pluie n'ont pas pu être retenues par l'IRSN pour être confrontées aux estimations établies en 2003 à partir de la relation pluie-dépôt.

Tableau 4 : Données relatives aux dépôts pluvieux sur 11 sites de l'est de la France

Station	Mesures d'eau de pluie		Hauteurs de pluie : mm											Paramètres calculés				
	Activité Bq l ⁻¹	Période de prélèvement	Mesures d'air Act. dans l'air : Bq m ⁻³					1-5					6-7	10-11	Dilution eau de pluie*	Act. Eau de pluie corrigée**	Act. air pondérée***	
			1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1-5	6-7	10-11			
Bugey	97	1-7 mai	0,36	0,47	0,33	0,09	0,10	0	0	20	0	0	20	15	SO	0,6	170	0,47
Chooz	58	1-7 mai	2,40	1,10	0,27	0,06	0,04	0,1	0	2,1	11,6	0,1	13,9		SO	1,0	58	0,39
Creys-Malville	6,6	1-6 mai	0,39	0,53	0,23	0,08	0,11	0	0	7,4	2	0	9,4	0,8	SO	0,9	7	0,47
Cruas	250	3-4 mai	0,16	0,60	0,41	0,13	0,12	0	2,8	6,4	16,4	0	25,6	SO	SO	1,0	250	0,43
Grenoble	120	1-7 mai	0,18	0,38	0,32	0,18	0,11	0	0	5,8	1,8	0	7,6	15,7	SO	0,3	370	0,37
Phénix/Codolet	69	1-4 mai	0,23	0,38	0,41	0,17	0,15	0	0,7	0	21,6	0	22,3	SO	SO	1,0	69	0,40
Saint-Alban	130	1-7 mai	0,41	0,79	0,41	0,15	0,01	0	0	11,6	2,3	0	13,9	14,3	SO	0,5	264	0,73
Tricastin	84	1-5 mai	0,20	0,64	0,50	0,18	0,14	0	0	0,5	20,7	0	21,2	SO	SO	1,0	84	0,50
Vioménil	64	1-11 mai	3,50	0,86	0,25	0,10	0,08	0	0	17	1	0	18	6	12,8	0,5	130	0,83
Méandre	92	1-11 mai	0,38	0,41	0,29	0,18	0,03	0	0,7	9,1	6,4	0,4	16,6	25,7	1	0,4	240	0,36
Fessenheim	10	1-6 mai	> 1	> 1	0,1	- 1		0	0	16	1	0	17	6	SO	0,7	14	

* : Coeff. Dilution = $P_{1-5 \text{ mai}}(\text{mm}) / P_{\text{pendant la durée du prélèvement}}(\text{mm})$

** : Eau de pluie corrigée = Activité eau de pluie / Coeff. Dilution

*** : Activité vol. pond. air = $\sum [P_{i \text{ mai}}(\text{mm}) \times \text{Activité vol. air}_{i-1 \text{ mai}}] / P_{1-5 \text{ mai}}(\text{mm})$

SO : sans objet, les données de cette période ne sont pas utilisées dans les calculs

NC : non connu

5.2.2. Mesures de sols effectuées par le SCPRI en 1986

Les résultats obtenus par le SCPRI en 1986, dans le compartiment terrestre, concernent en particulier des sols et des échantillons mixtes de sol et végétation.

Les résultats obtenus sur les sols provenant de 9 stations réparties sur le territoire national sont ceux qui ont été retenus pour la confrontation avec les valeurs des dépôts calculés. En effet les mesures dans les sols ont été réalisées par le SCPRI depuis les années 60 suivant des protocoles de prélèvement et de mesure toujours identiques.

En revanche, l'IRSN estime qu'il n'est pas pertinent de mener une telle confrontation avec les mesures effectuées par le SCPRI sur les prélèvements de « sol + couverture végétale » qui n'ont débuté en ces mêmes stations qu'en juin 1986, c'est-à-dire après le passage du nuage de Tchernobyl en France. En effet, ces mesures ont été réalisées sur les échantillons directement après le prélèvement, sans préparation préalable en laboratoire, au contraire des échantillons de sols qui étaient soumis à un traitement spécifique avant analyse (élimination des racines, pierres, séchage à 110 °C, broyage et mise en flacon normalisé) ; elles avaient pour objectif une évaluation globale des dépôts radioactifs consécutifs au passage du nuage, mais ne permettaient pas une quantification des dépôts suffisamment précise pour des fins d'expertise.

Tableau 5 : confrontation entre les dépôts estimés à partir des mesures d'activités des sols effectuées par le SCPRI et ceux calculés au moyen du modèle « pluie-dépôt » de l'IRSN

	Moyenne* des mesures de sols		Evaluation des dépôts Tchernobyl	
	1984-1985	1986-1990	A partir des mesures**	Avec le modèle IRSN
Anglade	2790±690	3135±299	< 1334	1700
Bellenave	2595±517	5220±965	2625±1482	2700
Bussy	3060±931	5130±572	2070±1503	3700
Cléville	1635±310	1560±222	< 457	610
Méaudre	3195±776	11790±2143	8595±2919	5700
Montfaucon	1455±293	5650±649	4095±942	8900
Nainville	1080±293	1125±120	< 458	760
Vésinet	1275±362	1560±171	< 818	850
Vioménil	2385±879	5040±666	2655±1545	7200

* : intervalle de confiance à 95% déterminé par la loi de Student pour de petits effectifs d'échantillons.

** : valeur obtenue par différence des moyennes (avant/après l'accident) et addition de la somme des intervalles de confiance des moyennes.

Le tableau 5 permet de confronter les dépôts consécutifs à l'accident de Tchernobyl estimés à partir des mesures réalisées par le SCPRI dans les sols et ceux calculés à partir de la relation « pluie-dépôt » établie par l'IRSN. Dans la colonne 2 figurent les moyennes des activités surfaciques mesurées en 1984 et 1985 ainsi que leur intervalle de confiance. Ces activités de ¹³⁷Cs sont la rémanence des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires sur les sols. La colonne 3 présente les moyennes des activités mesurées sur ces stations durant les 4 années qui ont suivi l'accident de Tchernobyl (13 à 17 échantillons analysés sur cette période, 37 pour le Vésinet et 7 pour la station d'Anglade pour laquelle les prélèvements se sont arrêtés en 1988). Les activités de ¹³⁷Cs ajoutées sur chaque station par les dépôts de mai 1986 peuvent être déduites en faisant la différence des deux moyennes. Lorsque cette différence est très faible au regard de l'incertitude sur les moyennes, ce qui est le cas sur les sites d'Anglade, Cléville, Nainville et du Vésinet, elle est considérée comme non significative. Il s'agit des sites les plus à l'ouest qui ont reçu de faibles dépôts, estimés par le modèle de l'IRSN à moins de 1000 Bq.m⁻² (1700 Bq.m⁻² dans le cas d'Anglade). Sur les 5 autres sites, la concordance entre les deux estimations est assez bonne compte tenu d'une part des incertitudes sur les moyennes des activités mesurées, d'autre part de celles liées à l'application du modèle sur des communes où les hauteurs de pluies ont été interpolées. C'est

vraisemblablement cette interpolation qui explique les écarts observés sur les sites de Méaudre, Vioménil et Montfaucon. Par exemple, sur la commune de Méaudre les valeurs des hauteurs de pluie interpolées vont de 8 à 15 mm, ce qui correspondrait à des dépôts compris entre 4500 et 8400 Bq.m⁻², cette dernière valeur étant très proche de celle déduite des mesures.

5.2.3. Exploitation des mesures de ¹³⁷Cs dans les aérosols en 1986

Parmi toutes les voies de recherche sur l'estimation des dépôts d'aérosols radioactifs en mai 1986 à la suite de l'accident de Tchernobyl, celle s'appuyant sur la mesure de l'activité résiduelle des aérosols atmosphériques collectés sur filtre au moment du passage du nuage sur le territoire français est une des plus intéressantes puisqu'elle permet d'accéder presque directement à la contamination atmosphérique. Elle constitue donc un support supplémentaire pour l'étude de la reconstitution des dépôts de ¹³⁷Cs sur le territoire français par corrélation avec les autres données disponibles (activité de l'eau de pluie, des sols, des végétaux).

5.2.3.1. Protocole de mesure appliqué pour le contrôle de la radioactivité atmosphérique

La technique utilisée par le SCPRI dans ses stations de prélèvements consistait en 1986 (et consiste toujours) à prélever sur un filtre relevé quotidiennement des aérosols ou des poussières. Toutefois, pour mettre en évidence une éventuelle contamination atmosphérique par des radioéléments artificiels, c'est-à-dire les produits de fission provenant des expériences nucléaires militaires atmosphériques des années 1960, des retombées du nuage de Tchernobyl et, marginalement, des rejets d'effluents gazeux des installations nucléaires, il est nécessaire de laisser décroître pendant environ cinq jours la radioactivité des descendants naturels solides du radon et du thoron.

Les propriétés intrinsèques des filtres utilisés quotidiennement depuis le début des années 60 sur les stations de prélèvements, font de ces filtres de bons média pour le contrôle sanitaire en vue notamment du mesurage de l'activité bêta globale.

Ces filtres à relevé quotidien étaient traités de la manière suivante :

a) Dès leur réception et au plus tard deux à trois jours après le prélèvement, les filtres quotidiens faisaient l'objet d'un comptage bêta global qui permettait d'obtenir un ordre de grandeur de l'activité due aux descendants solides du thoron - compte tenu de leur décroissance depuis la fin du prélèvement - et éventuellement de celle due à des radioéléments artificiels surajoutés.

b) Sur les mêmes filtres, un nouveau comptage bêta global était réalisé le sixième jour après le prélèvement. Etaient alors évaluée la radioactivité imputable presque exclusivement aux seuls éléments artificiels susceptibles d'être présents dans l'air. Ces résultats étaient publiés dans les tableaux mensuels de mesures du SCPRI.

c) Une mesure systématique en spectrométrie gamma était en outre réalisée une fois par mois sur les filtres groupés des 16 stations de surveillance de l'environnement et des 23 stations de surveillance des sites nucléaires. En 1986, hormis le filtre du système DAPAF implanté au Vésinet, la spectrométrie gamma était donc uniquement effectuée sur des échantillons regroupés (voir le rapport mensuel SCPRI de mai 1986).

En 1986, les seuls résultats disponibles concernant la période de début mai 1986, pour les activités en ¹³⁷Cs des filtres atmosphériques, étaient ceux des stations à prélèvements mensuels exclusifs. Ce réseau d'appareils de mesure en continu sur filtre déroulant permettait des mesures instantanées et différées à 48 heures. Les bandes mensuelles des

stations de Bourges, Tours, Lille, Cherbourg, Biarritz et Nice avaient ainsi été récupérées au Vésinet et analysées en laboratoire par spectrométrie gamma sur deux périodes (du 1^{er} au 3 mai 1986, puis du 3 mai au 31 mai 1986). Ces résultats ont été exploités notamment pour la prise en compte du gradient est-ouest dans la formule de calcul des dépôts (équation 2).

5.2.3.2. Mesures réalisées en 2002 sur les filtres aérosols

En 1986, le réseau aérosol du SCPRI comprenait 41 stations de prélèvement réparties sur tout le territoire français (figure 1). Dans les archives mises en place depuis l'origine, plus de 600 000 filtres sont classés, représentant plus de 40 années de surveillance de l'air au sol (1961-2003). Les filtres aérosols de 35 stations en fonctionnement en 1986 (dont 33 avec filtre à relevé quotidien) ont ainsi pu être récupérés pour être (re)mesurés.



Figure 14 : localisation des stations du réseau aérosols atmosphériques en 1986 en France

Chacun des filtres atmosphériques provenant de ces 35 stations pour la période du 29 avril 1986 au 7 mai 1986, a fait l'objet pendant le mois de février 2002 d'un comptage bêta global et d'une spectrométrie gamma destinée à mettre en évidence la présence résiduelle des césiums 137 et 134, prélevés au cours de cette période critique.

Les principaux résultats sont synthétisés dans le tableau 7.

Tableau 7 : Activités volumiques moyennes (¹³⁷Cs et bêta global) dans les aérosols atmosphériques pendant la période critique du 1^{er} au 5 mai 1986 (mesures 2002)

Code site	Nom	Département	¹³⁷ Cs (Bq/m ³)	Bêta global (Bq/m ³)
AJC	Ajaccio	2A	0,55	5,35
BAU	Baugy	58	0,23	2,16
BEL	Bellenaves	03	0,25	2,52
BNL	Brennilis	29	0,05	0,42
BOR	Bordeaux	33	0,19	1,58
BUG	Bugey	01	0,33	3,58
CHG	Cherbourg	50	0,09	0,85
CHI	Chinon	37	0,28	2,45
CHO	Chooz	08	0,98	7,10
CRM	Creys Malville	38	0,30	2,83
CRU	Cruas	07	0,33	3,05
DAM	Dampierre	45	0,14	2,73
FLA	Fiamanville	50	0,12	0,93
FON	Fontenay aux Roses	92	0,26	0,64
GNB	Grenoble	38	0,28	2,75
LIL	Lille	59	0,58	4,15
MEA	Méaudre	38	0,33	3,13
MON	Montfaucon	30	0,28	2,80
MRC	Marcoule	30	0,25	2,45
NIC	Nice	06	1,10	10,90
NLR	Nainville	91	0,43	3,65
PAL	Paluel	76	0,19	1,60
PHX	Phénix	30	0,30	3,08
PLC	Pauillac	33	0,21	2,03
PRE	Prévessin	01	0,55	3,95
RPR	La Rochelle	17	0,23	2,34
SAC	Saclay	91	0,33	2,83
SLC	Saint Laurent de Ceris	16	0,21	2,13
SLE	Saint Laurent des Eaux	41	0,28	2,33
STA	Saint Alban	38	0,45	4,00
TRI	Tricastin	26	0,38	3,63
VES	Le Vésinet	78	0,40	3,80
VIO	Vioménil	88	1,16	6,83

5.2.3.3. Représentation cartographique et commentaires

Les cartes (figures 17 et 18) présentées ne constituent qu'une illustration visuelle des résultats. Elles sont issues d'une interpolation spatiale effectuée à l'aide d'un système d'information géographique ; cependant la faible densité de points de mesure (dans le sud-ouest de la France notamment) ne permet pas géostatistiquement d'établir une carte précise de l'activité de l'air au niveau du sol en mai 1986. Ces cartes constituent néanmoins un support supplémentaire utile pour l'étude et la reconstitution des dépôts de ¹³⁷Cs sur le territoire français.

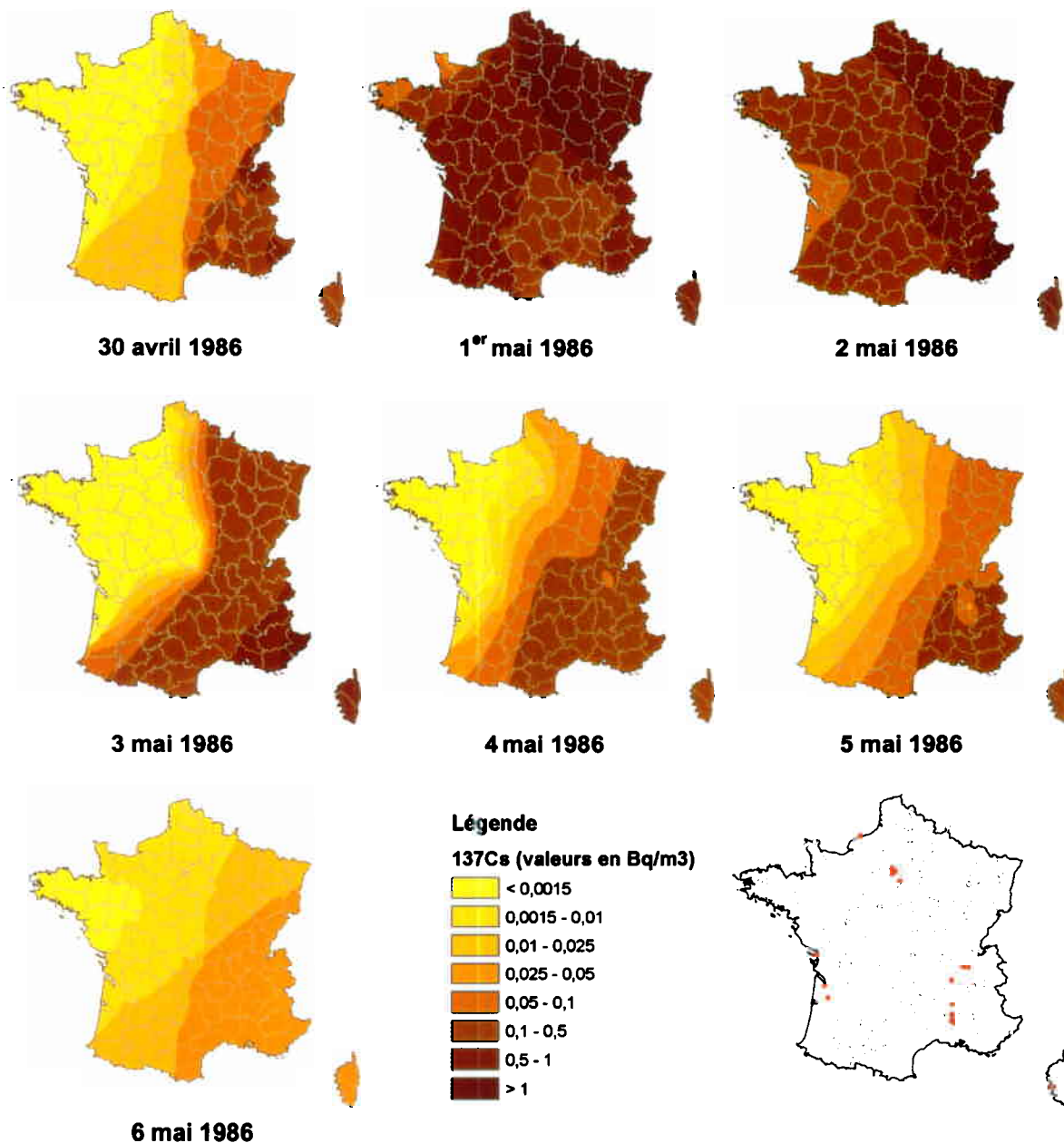


Figure 17 : évolution de l'activité en ¹³⁷Cs dans les aérosols entre le 30 avril et le 6 mai 1986

L'activité volumique en ¹³⁷Cs diminue d'est en ouest, ce qui est cohérent avec la trajectoire globale des masses d'air pendant cette période. Les rejets du 27 avril 1986 atteignent l'est de la France le 30 avril. Sous l'effet conjugué des deux panaches (suivant des trajectoires est et sud-est), les nuages chargés de particules radioactives couvrent la totalité du territoire français entre le 1^{er} mai et le 2 mai 1986. Le 3 mai, on observe une différence nette d'activité en ¹³⁷Cs dans les aérosols entre de la moitié est de la France (entre 0,1 et 0,5 Bq/m³) et la moitié ouest (<0,01 Bq/m³). Cette tendance est confirmée les jours suivants, parallèlement avec la diminution progressive de la radioactivité dans les aérosols sur l'ensemble du territoire français.

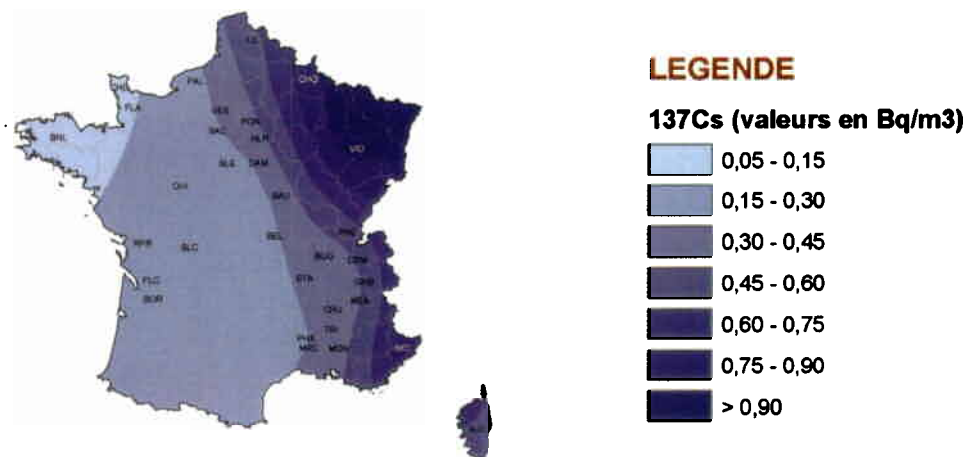


Figure 18 : moyenne des activités en ^{137}Cs mesurées dans les aérosols atmosphériques sur la période critique du 1^{er} au 5 mai 1986

La figure 18 illustre assez bien l'appauvrissement est-ouest de l'activité des aérosols transportés par les masses d'air. Cette diminution résulte des pluies importantes dans l'est de la France qui ont continué de lessiver les panaches (cf. paragraphe 3.2). Cependant l'existence d'un front perturbé délimitant deux masses d'air de caractéristiques différentes pourrait également expliquer les valeurs plus élevées mesurées sur la partie orientale du territoire.

Ces données actualisées sur l'activité volumique du ^{137}Cs dans les aérosols ont été exploitées au paragraphe 4.1.3 pour estimer l'incertitude associée à la prise en compte du gradient est-ouest. Rappelons ici que, malgré la possibilité offerte d'une meilleure prise en compte de la distribution est-ouest de la contamination de l'air en ^{137}Cs , l'intérêt de modifier le modèle initial de l'IRSN apparaît limité car l'incidence sur le résultat final dans le centre et l'ouest de la France resterait modérée dans l'absolu (dépôts de faible importance).

5.3. Comparaison avec les cartes étrangères des dépôts de ^{137}Cs

5.3.1. Généralités

L'intégration de la carte obtenue dans celle de l'Europe de l'Ouest publiée par la Commission Européenne en 1998 (figure 19) montre que les activités de ^{137}Cs déposées et les surfaces concernées sont cohérentes avec celles des pays voisins.

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 Bq.m⁻², comme dans les environs de Vaison-la-Romaine, de Lons-le-Saunier ou de la côte orientale Corse. Toutefois, des zones de dépôts présentant des valeurs encore plus élevées, supérieures à 40 000 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 Bq.m⁻² ont souvent une extension moindre que celles des pays de l'Europe 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.

Un commentaire détaillé des estimations des dépôts aux frontières est présenté ci-après.

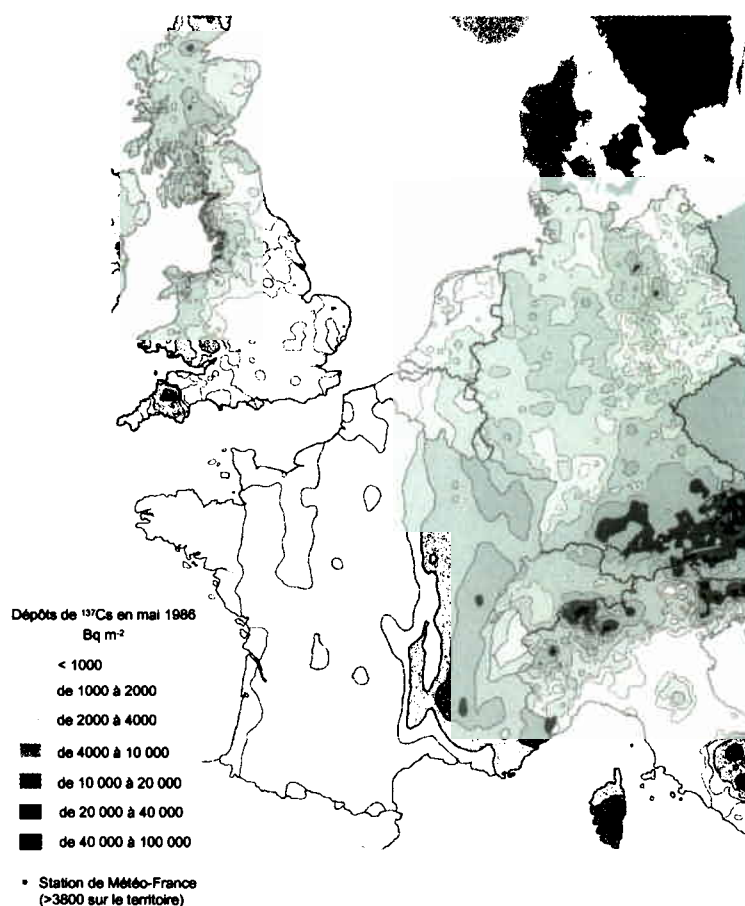


Figure 19 : intégration de la carte obtenue des dépôts en France dans celle d'Europe de l'Ouest publiée par la Commission Européenne

5.3.2. Cas de la Grande-Bretagne

Les britanniques sont les seuls à avoir publié très tôt, dès 1986, et dans une revue scientifique majeure (*Nature*) [31], une carte précise des dépôts de ^{137}Cs sur le Royaume-Uni, reprise dans l'Atlas européen, et reposant sur un très grand nombre (395) de points donnant une valeur d'activité surfacique en ^{137}Cs . Cette carte, comme celle obtenue par l'IRSN en 2003, est basée sur le constat de la relation entre les précipitations et les dépôts radioactifs. Il en résulte une excellente cohérence entre les cartes des deux pays. Le sud de l'Angleterre qui a reçu de faibles précipitations, présente des dépôts de l'ordre de 1000 à 2000 Bq.m⁻² qui prolongent logiquement ceux du grand quart nord-ouest de la France. Les fortes précipitations enregistrées dans l'est du Pays de Galles et de l'Ecosse ont amené des dépôts plus importants, supérieurs à 20 000 Bq.m⁻², comparables 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 qui, après avoir survolé l'est de la France, sont parvenues sur les îles Britanniques, laissant la Bretagne sur leur bordure ouest.

5.3.3. Cas de la Belgique

La carte des dépôts de ^{137}Cs en Belgique repose, de même que la carte française de l'Atlas européen, sur un nombre très restreint de mesures : 11 analyses de sols. Ce faible nombre comparé à celui de l'Angleterre se justifie par des dépôts plus faibles sur la majeure partie du territoire belge. Tout au long de la frontière, 6 sites seulement ont été échantillonnés. Sur toute une moitié nord de la frontière franco-belge, c'est-à-dire de la mer du Nord jusqu'au niveau de Charleroi, les deux cartes sont en parfaite cohérence avec des dépôts inférieurs à 1000 Bq.m^{-2} ou compris entre 1000 et 2000 Bq.m^{-2} . Plus au sud et jusqu'au Luxembourg, les dépôts vont de 2000 à 4000 Bq.m^{-2} côté belge (valeurs fondées sur 3 sites d'échantillonnage) et de 4000 à 20000 Bq.m^{-2} côté français. Une faible représentativité des mesures effectuées en Belgique au regard de l'hétérogénéité des dépôts et le « lissage » résultant de l'interpolation spatiale côté français (cf. paragraphe 4.2) peuvent expliquer cet écart.

5.3.4. Cas de l'Allemagne

Au niveau de la Sarre, les dépôts sont cohérents des deux côtés de la frontière : entre 4000 et $10\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$, localement supérieurs à $10\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$ côté français. C'est sur le Rhin que la discontinuité entre la carte de l'IRSN et celle de l'Atlas européen est la plus importante avec des dépôts estimés entre 4000 et $10\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$ côté français et compris entre 1000 et 4000 Bq.m^{-2} côté allemand. Il faut noter que l'évaluation en Allemagne ne repose que sur 4 sites d'échantillonnage entre Baden-Baden et Bâle.

5.3.5. Cas de la Suisse

Avec l'Angleterre et l'Autriche, la Suisse présente la plus forte densité de points de mesures : 190 sites échantillonnés sur $41\,000 \text{ km}^2$, ce qui permet une meilleure représentativité pour une carte plus précise. Tout au long de la frontière, les estimations des dépôts sont concordantes entre la France et la Suisse. Les valeurs les plus faibles, entre 4000 et $10\,000$ côté suisse et entre 1000 et $10\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$ côté français, se situent dans la partie sud en face de la Savoie. Les valeurs les plus élevées se trouvent au niveau de Montbéliard et de Biel : entre $10\,000$ et $20\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$.

5.3.6. Cas de l'Italie

L'Italie a concentré une part importante des 436 mesures effectuées sur son territoire sur les zones les plus touchées par les retombées de l'accident de Tchernobyl : la région des lacs et le massif des Dolomites. Dans ces régions, les fortes précipitations, équivalentes voire supérieures à celles des régions les plus arrosées de France, ont conduit à des dépôts dépassant $20\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$ et atteignant localement $100\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$ près des localités de Lecco et Ivrea. Très peu de mesures ont été faites dans les Alpes frontalières côté italien. La plupart ont été faites en plaine, à plusieurs dizaines de kilomètres de la frontière. De la faible représentativité de ces quelques mesures compte tenu de l'hétérogénéité des précipitations et donc des dépôts, il résulte des divergences entre les deux côtés de la frontière. De la Suisse au tunnel du Fréjus, les estimations faites en Italie sont supérieures aux françaises : 4000 à $10\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$ côté italien, moins de 4000 Bq.m^{-2} côté français. Plus au sud, la situation est complètement inversée : 4000 à $10\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$ côté français, moins de 4000 Bq.m^{-2} côté italien.

5.3.7. Cas de l'Espagne

Pays le moins touché d'Europe par les retombées de l'accident de Tchernobyl avec le Portugal, l'Espagne n'a effectué qu'une trentaine d'analyses de sols prélevés sur l'ensemble de son territoire. Les estimations des dépôts en Espagne au niveau de la frontière reposent sur seulement trois analyses d'échantillons prélevés relativement loin de celle-ci.

6. CONCLUSION

Les éléments fournis dans le présent rapport apportent un éclairage sur les la méthode d'élaboration et les limites des représentations cartographiques des retombées de césium ^{137}Cs en France consécutives à l'accident de Tchernobyl, en focalisant plus particulièrement l'analyse sur celle présentée en 2003 par l'IRSN à partir d'une modélisation fondée sur la relation pluie-dépôt. Dans ce but, l'IRSN a cherché à exploiter l'intégralité des données disponibles en rapport direct ou indirect avec les dépôts de ^{137}Cs sur les sols, soit obtenues au moment de l'accident de Tchernobyl, soit obtenues par la suite dans le but notamment d'en évaluer l'impact sur le territoire métropolitain.

Qualitativement, l'importance des dépôts de ^{137}Cs résultant de l'accident de Tchernobyl est principalement conditionnée, d'une part par la répartition des masses d'air plus ou moins contaminées sur le territoire entre le 1^{er} et le 5 mai 1986, d'autre part par l'intensité des précipitations pluvieuses durant la même période. Ce dernier facteur a provoqué une forte variabilité des dépôts sur le territoire, impossible à représenter en cartographie au moyen d'un nombre trop limité de mesures de sol, aussi bonnes soient-elles. Partant de ce constat, l'IRSN a tenté, à partir de 1999, de modéliser cette variabilité en se fondant sur une corrélation entre l'importance des dépôts et l'intensité des pluies, appliquée à près de 3700 valeurs de hauteur de pluie entre le 1^{er} et le 5 mai 1986, disponibles sur l'ensemble du territoire.

Une telle approche est bien sûr entachée d'incertitudes associées principalement à l'application de la relation pluie-dépôt sur tout le territoire et à l'interpolation entre les points où une hauteur de pluie a été relevée en 1986.

Plus précisément, en ce qui concerne la relation pluie-dépôt :

- la relation établie dans la zone atelier (basse vallée du Rhône) à partir des moyennes de mesures d'activité du ^{137}Cs dans les sols en différents points est associée à un intervalle de confiance de 20 à 26 %. Il s'y ajoute une variabilité autour des moyennes déterminées en chaque point, de l'ordre de 20 % dans les zones où les pluies n'ont pas excédé 25 mm, plus élevée (jusqu'à 136 %) lorsque les pluies étaient plus fortes ;
- l'extrapolation de cette relation à tout l'est de la France (à l'est de la longitude 4°) donne des estimations de dépôt de ^{137}Cs qui ont pu être confrontées à des mesures dans les sols disponibles en 15 sites différents. La corrélation est globalement satisfaisante et l'écart entre la valeur estimée par le modèle et la valeur mesurée n'excède pas 50 % ;
- l'extrapolation de la relation vers l'ouest de la France, en appliquant une loi empirique de décroissance de l'activité volumique du ^{137}Cs dans l'air en fonction de la longitude, a introduit une erreur relative certainement plus importante. En effet, disposant de nouvelles données sur l'activité du césium dans les aérosols acquises en 2002 sur les prélèvements de mai 1986, il est désormais possible d'avoir une meilleure représentation de l'évolution de la contamination des masses d'air en France du 1^{er} au 5 mai 1986. Ces nouvelles données permettent de conclure que l'extrapolation vers l'ouest de la France a pu conduire à surestimer l'activité volumique de l'air de manière significative au niveau des longitudes centrales du

pays ; néanmoins l'incidence de cette surestimation sur le calcul des dépôts reste limitée en raison de très faibles précipitations sur la plus grande partie des zones concernées. L'utilisation d'un modèle mieux ajusté pour retracer le parcours des masses d'air sera toujours entachée d'incertitudes liées à l'interpolation entre les points de mesure, assez dispersés, ayant servi à caler le modèle.

Par ailleurs, l'incertitude associée à l'interpolation entre deux stations de Météo France est directement liée à celle de l'estimation de la hauteur de pluie ; compte tenu du caractère très aléatoire des précipitations, cette incertitude peut être importante mais elle est difficile à quantifier exactement. La méthode d'interpolation spatiale utilisée par l'IRSN, identique à celle adoptée par la Commission Européenne dans son Atlas, est une méthode qui ne permet cependant pas d'évaluer les incertitudes associées aux interpolations. Malgré cette difficulté, et compte tenu du nombre important de points de relevé pluviométrique (3700), l'IRSN estime que l'incertitude résultant des interpolations sur les hauteurs de pluie n'a pas de conséquence importante à l'échelle usuelle de représentation de la carte établie par l'IRSN en 2003.

La confrontation des estimations des dépôts issus du modèle empirique établi par l'IRSN aux autres données de mesure disponibles, sols, aérosols, eaux de pluie, a permis d'éprouver la fiabilité de ce modèle et de discuter la pertinence des différents indicateurs du dépôt. Plusieurs enseignements sont tirés de cette confrontation :

- lorsqu'il existe des séries de mesures de l'activité du ^{137}Cs en nombre suffisant, comme c'est le cas des études radioécologiques réalisées de 1991 à 2001 autour des 20 sites électronucléaires français, il est possible de mettre en évidence une variabilité locale des résultats autour d'un même site. Cette variabilité résulte des dépôts initiaux mais aussi de l'évolution des radionucléides après leur dépôt. Cette observation conduit à la conclusion qu'il est préférable d'éviter de comparer directement des résultats de mesures isolées avec les estimations fournies par le modèle « pluie-dépôt » utilisé par l'IRSN ;
- les séries de données fournies par les études radioécologiques effectuées au voisinage des C.N.P.E. depuis 1991 ont permis, pour la plupart des sites, de retrouver les ordres de grandeur des dépôts estimés par l'IRSN. Dans les cas les plus défavorables, les mesures de ^{137}Cs dans les sols autour des sites EDF, en ce qui concerne la fraction attribuée pour l'année 1986 aux retombées de l'accident de Tchernobyl, s'écartent d'un facteur 2 en dessous ou au dessus de la valeur estimée par le modèle « pluie-dépôt » ;
- l'analyse des activités mesurées dans l'eau de pluie en 1986 montre des difficultés d'interprétation des variations d'un site à l'autre et de corrélation avec les mesures d'activité volumique dans l'air réalisées dans les mêmes lieux. Ces mesures d'eau de pluie n'ont dès lors pas pu être exploitées par l'IRSN pour être confrontées aux estimations établies en 2003 à partir de la relation pluie-dépôt ;
- les séries de mesures réalisées par le SCPRI dans les sols ont également été exploitées. Pour les sites les plus à l'ouest, qui ont reçu de faibles dépôts, la différence entre les résultats de mesures avant et après l'accident de Tchernobyl n'est pas significative. Pour les autres sites, la concordance entre les deux estimations est assez bonne compte tenu d'une part des incertitudes sur les moyennes des activités mesurées, d'autre part de celles liées à l'application du modèle sur des communes où les hauteurs de pluies ont été interpolées. Dans les cas les plus défavorables, l'écart entre la valeur calculée par le modèle et celle obtenue par des mesures ne dépasse pas un facteur 2.

Enfin, la représentation cartographique des résultats de mesure de l'activité résiduelle des aérosols atmosphériques collectés sur filtre au moment du passage du nuage sur le territoire français a permis d'actualiser la connaissance de la distribution de la contamination des masses d'air en césium 137 au début de mai 1986 et a servi à évaluer

la cohérence des résultats de modélisation et des diverses séries de mesures disponibles.

En conclusion, la confrontation des estimations obtenues à l'aide de la relation pluie-dépôt avec des résultats de mesures consolidés, obtenus sur des prélèvements bien maîtrisés et référencés, est globalement positive. Ces écarts sont par ailleurs compatibles avec les incertitudes estimées précédemment pour le modèle « pluie-dépôt ».

L'intégration de la carte obtenue dans celle de l'Europe de l'Ouest publiée par la Commission Européenne en 1998 montre que les activités de ^{137}Cs déposées et les surfaces concernées sont cohérentes avec celles des pays voisins. Dans le détail, les défauts de concordance des courbes d'isovaleur des dépôts de ^{137}Cs s'expliquent principalement par la technique d'interpolation entre les points pour lesquels une valeur de dépôt est disponible, compte tenu de la densité de ces points sur les différents territoires. Par rapport aux pays situés à l'est, il est possible que le marquage globalement plus faible sur le territoire français 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. C'est sur le Rhin que la discontinuité entre la carte de l'IRSN et celle de l'Atlas européen est la plus importante. Il faut noter que l'évaluation en Allemagne pour la zone frontalière ne repose que sur 4 sites d'échantillonnage. Dans le cas de la Grande-Bretagne où la même approche de représentation cartographique a été utilisée, il y a une excellente cohérence entre les cartes.

Les différences notables sont autant dues aux différences de modalités de cartographie (densité et localisation des points représentatifs, type de données utilisées) qu'à de vraies différences de valeurs de dépôts. Même dans ces cas, une forte hétérogénéité des dépôts pluvieux peut suffire à expliquer des écarts significatifs.

7. RÉFÉRENCES :

- [1] European Commission. ATLAS of caesium deposition on Europe after the Chernobyl accident. EUR 16733. Office for Publications of the European Communities, Luxembourg 1998, European Commission, 176 A3.
- [2] Renaud, Ph., Beaugelin, K., Maubert H., and Ledenvic Ph. "Conséquences radioécologiques et dosimétriques de l'accident de Tchernobyl" (Radioecological consequences and dosimetry of the Chernobyl accident), IPSN Report 97-03 1997 (205 p.).
- [3] Renaud, Ph., Pourcelot, L., Métivier, J-M, Morello, M. ^{137}Cs deposits and behaviour over eastern France after the Chernobyl accident. The Sciences of the Total Environment 2003; 309: 257-264.
- [4] Pourcelot, L., Renaud, Ph., Morello, M., Marquet, J. Etat de la contamination en ^{137}Cs des sols de la commune de Sisteron (Alpes de Haute Provence) - Institut de protection et de Sûreté Nucléaire, IPSN/DPRE/SERNAT Report 2001-28, 2001, 8 p.
- [6] Renaud, Ph., Metivier, J M, Castelier, E., Pourcelot, L., Louvat, D. Cartographie des dépôts de ^{137}Cs en mai 1986 sur l'ensemble du territoire français métropolitain, in press *Radioprotection*.
- [7] Pourcelot, L., Louvat, D., Gauthier-Lafaye, F., Stille, P. Formation of radioactivity enriched soils in mountain areas. Journal of Environmental Radioactivity, 2003; 68, 215-233.
- [8] Herckes, P., Mirabel, Ph., Wortham; H. Cloud water deposition at a high-elevation site in the Vosges mountains (France). The Science of the Total Environment; 2001: 295, 59-75.
- [9] Santchi, P.H., Bohlhader, S., Farrenkoltzen, K., Lueck, A., Zingg, S., Strurm, M. Chernobyl radionuclides in the environment : tracers for the tight coupling of atmospheric, terrestrial and aquatic geochemical processes. Environment Sciences and Technology, 1988; 22, 510-516.
- [10] Duffa, C., Claval, D., Masson, M., Gontier, G., Renaud, Ph. Synthèse des études radioécologiques annuelles menées dans l'environnement des centrales électronucléaires françaises depuis 1991, Radioprotection 2004. à paraître.
- [11] Mitchell, P.I., Sanchez-Cabeza, J.A., Ryan, T.P., MCGarry, A.T., Vidal-Quatras; A. Preliminary estimates of cumulative caesium and plutonium deposition in the Irish terrestrial environment. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1990. 138, 241-256.
- [12] Renaud, Ph., Metivier, J. M., Morello, M. Modélisation de la répartition spatiale des dépôts de ^{137}Cs dans les sols de la basse vallée du Rhône, IPSN/DPRE/SERNAT Report 2001-17, 2001, 55 p.

- [13] Cremers, A., Elsen, A., De Preter, P., Maes, A. Quantitative analysis of radiocesium retention in soils. *Nature*, 1988. 335, 247-249.
- [14] Facchinelli, A., Gallini, L., Barberis, E., Magnoni, M., Hursthouse, A.S. The influence of clay mineralogy on the mobility of radiocesium in upland soils on NW Italy. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2001. 56, 299-307.
- [15] Taupin, J.-D. Précision de l'estimation des précipitations au Sahel selon la densité du réseau d'observation pluviométrique. *C. R. Geoscience*, 2003. 335, 215-225.
- [16] Verger, P., Chérié-Challine, L. Evaluation des conséquences sanitaires de l'accident de Tchernobyl en France : dispositif de surveillance épidémiologique, état des connaissances, évaluation des risques et perspectives. *Rapport IPSN-InVS 2000-15*, 2000.
- [17] Chester, R., Nimmo, M., Corcoran, P.A., Rainwater-aerosol trace metal relationship at Cap-Ferrat: a coastal site in the western Mediterranean. *Marine Chemistry*, 1997. 58, 293-312.
- [18] République Française, Ministère de la Santé, Service Central de Protection Contre les Rayonnements Ionisants (SCPRI) 1986. *Bulletin mensuel de résultats de mesures de mai 1986*.
- [19] Renaud, Ph., Métivier, J.-M. Caractérisation des zones de France métropolitaine ayant reçu les dépôts de ¹³¹I les plus importants à la suite de l'accident de Tchernobyl - Institut de protection et de Sûreté Nucléaire, IPSN/DPRE/SERNAT Report 2000-33, 2000, 20 p.
- [20] Doury, le vademecum des transferts atmosphériques, 1983: rapport CEA-DSN 440
- [21] Clark, M.J., Smith, F.B. Wet and dry deposition of Chernobyl releases. *Nature*, 1988. 332, 245-249.
- [22] McAulay, I.R., Moran, D. Relationships between deposition of Chernobyl originating caesium and ruthenium radionuclides and rainfall in Ireland. *Analyst*; 1991. 117, 455-459.
- [23] Isaksson, M., Erlandsson, B., Linderson, M. Calculations of the deposition of ¹³⁷Cs from nuclear bomb tests and from the Chernobyl accident over the province of Skane in the southern part of Sweden based on precipitation. *Journal of environmental radioactivity* 2000. 49, 97-112.
- [24] Thomas, A.J., Martin, J.M. First assessment of Chernobyl radioactive plume over Paris. *Nature*, 1986. 321, 817-819.
- [25] DeBortoli, M., Gaglione, P. Variability of washout ratio for some fallout radionuclides. In: *Physical behavior of radioactive contaminants in the atmosphere, 1974. Proceeding of an International Atomic Energy Agency symposium. Vienna.*
- [26] Peckar, M. 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, 1996. EMEP/MSC-E Report 9/96.
- [27] NCI-NDC, 2001. Health consequences to the american population of nuclear weapons tests conducted by the United States. A report prepared for the US congress 2001.
- [28] Renaud, Ph., Louvat, D. Magnitude of fission products deposition from atmospheric nuclear weapon test fallout in France, in press *Health Physics*, april 2004.
- [29] Dubois, G., De Cort, M., Mapping ¹³⁷Cs deposition: data validation methods and data interpretation. *Journal of environmental radioactivity*, 2001. 53, 271-289.
- [30] Bossew, P., Ditto, M., Flakner, T., Eberhardt, H., Kienzl, K., Rapelsberger, U. Contamination of Austrian soil with caesium ¹³⁷. *Journal of environmental radioactivity* 2001. 55, 187-194.
- [31] Clark, M.J., Smith, F.B. Wet and dry deposition of Chernobyl releases. *Nature*, 1988: 332, 23.
- [32] US Nuclear Regulatory Commission and European Communities, 1997. Probabilistic accident consequence uncertainty analysis. publication EUR16771.