

IRSNINSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

**Interprétation phénoménologique
et analytique de la relation pluie-dépôt
utilisée pour la reconstitution
des dépôts de ^{137}Cs en France
consécutifs à l'accident de Tchernobyl**

Philippe RENAUD, Laurent GARCIA-SANCHEZ,
Jean-Michel MÉTIVIER, Laurent POURCELOT, Didier CHAMPION

Rapport DEI 2005-03
Novembre 2005

DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE L'INTERVENTION

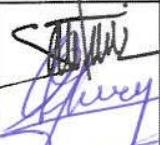
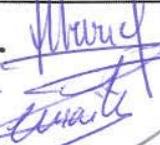
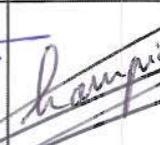
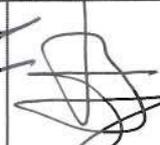
Demandeur	Participation de l'IRSN au groupe de travail « Aurengo » sur les conséquences de l'accident de Tchernobyl en France
Référence de la demande	Lettre IRSN/DIR/04-240 du 29 mars 2004
Numéro de la fiche programme	

INTERPRÉTATION PHÉNOMÉNOLOGIQUE ET ANALYTIQUE DE LA RELATION PLUIE-DÉPÔT UTILISÉE POUR LA RECONSTITUTION DES DÉPÔTS DE ^{137}Cs EN FRANCE CONSÉCUTIFS A L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL

Philippe RENAUD, Laurent GARCIA-SANCHEZ, Jean-Michel METVIER, Laurent POURCELOT, Didier CHAMPION

Direction de l'environnement et de l'intervention

Rapport Direction/DEI n° 2005-03

	Réservé à l'unité		Visas pour diffusion		
	Auteur(s)	Vérificateur*	Chef du SESURE Chef du SECRE	Directeur de la DEI	Directeur Général de l'IRSN
Noms	Philippe Renaud Laurent Garcia-Sanchez Jean-Michel Métivier Laurent Pourcelot Didier Champion	Gerno Linden Pascal Santucci	Nathalie Lemaitre Jean-Christophe Gariel	Didier Champion	J. REPUSSARD
Dates	7.09.05	7.09.05	26/9/05	09/11/05	10/11/05
Signatures					

* rapport sous assurance de la qualité

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS

Version	Date	Auteurs des modifications	Pages ou paragraphes modifiés	Description ou commentaires
Soumise à relecture	Septembre 2005	Auteurs du rapport + G. Linden + P. Santucci + D. Boulaud + J. Repussard + P. Gourmelon	Modifications ponctuelles sur l'ensemble du rapport	Amélioration de forme et clarification de certains passages (§ 2.1 : schéma conceptuel de base des dépôts au sol ; § 3.2 ; § 5)

LISTE DES PARTICIPANTS

Nom	Organisme

LISTE DE DIFFUSION

Nom	Organisme

TABLE DES MATIÈRES

SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE	3
1. INTRODUCTION	11
2. PHÉNOMÉNOLOGIE DE FORMATION DES DÉPÔTS DE ¹³⁷CS ET MÉTHODES DE RECONSTITUTION	12
2.1. ORIGINES DES ACTIVITÉS SURFACIQUES RÉMANENTES DU ¹³⁷ CS DANS LES SOLS APRÈS L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL.....	12
2.2. LA MÉTHODE DE RECONSTITUTION DES DÉPÔTS ATMOSPHÉRIQUES PAR LA RELATION EMPIRIQUE PLUIE-DÉPÔT (IRSN 2003).....	14
2.3. FORMULATION ANALYTIQUE DE L'ACTIVITÉ RÉMANENTE DU ¹³⁷ CS DANS LES SOLS APRÈS L'ACCIDENT.....	16
3. DÉTERMINATION DES DONNÉES DISPONIBLES ET ANALYSE DE LEUR REPRÉSENTATIVITÉ	17
3.1. L'ACTIVITÉ SURFACIQUE D_i	17
3.1.1 ORIGINE DU CÉSIUM 137 PRÉSENT DANS LES SOLS FRANÇAIS.....	17
3.1.2 REPRÉSENTATIVITÉ D'UNE MESURE AU REGARD DE L'ACTIVITÉ PRÉSENTE DANS LA PORTION DE SOL PRELEVÉE.....	18
3.1.3 REPRÉSENTATIVITÉ DE L'ACTIVITÉ D'UNE PORTION DE SOL AU REGARD DE LA « MOYENNE » DES SOLS ENVIRONNANTS.....	20
3.1.4 REPRÉSENTATIVITÉ DE L'ACTIVITÉ « MOYENNE » DES SOLS D'UN SITE AU REGARD DES DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES.....	24
3.1.5 ORIGINE ET QUALITÉS DES DONNÉES DISPONIBLES.....	26
3.1.6 CONCLUSION SUR LES JEUX DE DONNÉES UTILISABLES POUR CETTE ÉTUDE.....	32
3.2. ACTIVITÉ SURFACIQUE RÉMANENTE DES RETOMBÉES DES ESSAIS ATMOSPHÉRIQUES D'ARMES NUCLÉAIRES R_i	34
3.2.1 LES DÉPÔTS EN FRANCE CONSÉCUTIFS AUX ESSAIS ATMOSPHÉRIQUES D'ARMES NUCLÉAIRES.....	34
3.2.2 RÉMANENCE DE CES DÉPÔTS DANS LES SOLS FRANÇAIS EN 1986.....	35
3.2.3 FRACTION DES R_i ESTIMÉS PRÉSENTE DANS L'ACTIVITÉ D_i MESURÉE.....	39
3.3. ACTIVITÉS VOLUMIQUES QUOTIDIENNES DU ¹³⁷ CS DANS L'AIR : C_i (J).....	39
3.3.1 LES DONNÉES DISPONIBLES.....	39
3.3.2 REPRÉSENTATIVITÉ DE L'ACTIVITÉ DE L'AIR MESURÉE LORS DES PLUIES.....	43
3.3.3 REPRÉSENTATIVITÉ DE L'AIR MESURÉE AU NIVEAU DU SOL.....	43
3.3.4 REPRÉSENTATIVITÉ D'UNE MESURE SUR UN SITE AU REGARD DE L'ENSEMBLE DE SA ZONE D'INFLUENCE.....	43
3.3.5 INTERPOLATION SPATIALE.....	44
3.3.6 CONCLUSION SUR LA REPRÉSENTATIVITÉ DES ACTIVITÉS DE L'AIR INTERPOLÉES.....	52

3.4. HAUTEURS DE PRÉCIPITATIONS QUOTIDIENNES : P_i (J)	52
3.4.1 MESURES DE HAUTEURS DE PRÉCIPITATIONS DISPONIBLES	52
3.4.2 REPRÉSENTATIVITÉ DES HAUTEURS DE PLUIE INTERPOLÉES	54
4. DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES α ET β.....	56
4.1. MÉTHODES DE DÉTERMINATION	56
4.2. APPLICATION AUX DONNÉES SÉLECTIONNÉES	56
4.2.1 LE MODÈLE ORIGINAL (1).....	57
4.2.2 LE MODÈLE AVEC DÉPHASAGE (2).....	57
4.2.3 LE MODÈLE AVEC EFFET TEMPS (3).....	58
4.2.4 LE MODÈLE AVEC FACTEUR CORRECTIF (4)	59
4.2.5 LE MODÈLE AVEC EFFET RÉGION (5).....	59
4.2.6 DISCUSSION DES RÉSULTATS	60
5. APPLICATION DES MODELES ET COMPARAISON AVEC LES MESURES DANS LES SOLS	67
6. CONCLUSION.....	70
6.1. RECONSTITUTION DES DÉPÔTS DE ^{137}Cs INDUITS PAR L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL	70
6.2. AMÉLIORATION DES MÉTHODES D'ÉVALUATION DES CONSÉQUENCES POST-ACCIDENTELLES RÉSULTANT DE RETOMBÉES ATMOSPHÉRIQUES DE POLLUANTS RADIOACTIFS.....	74
7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	76
ANNEXE 1 : LES DONNÉES DISPONIBLES.....	78
ANNEXE 2 : LES DONNÉES RETENUES.....	93
ANNEXE 3 : LE KRIGEAGE	99
ANNEXE 4 : MÉTHODES DE DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES α ET β.....	102

SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE

Contexte

Depuis 1999, l'IPSN puis l'IRSN ont entrepris un travail visant à mieux prendre en compte les facteurs de variabilité à l'origine de la formation des dépôts de ^{137}Cs en France à la suite de l'accident de Tchernobyl en 1986, notamment les dépôts associés aux pluies. En effet, les travaux antérieurs, notamment ceux menés par l'IPSN à partir de l'interprétation des mesures de contamination des légumes à feuilles et du lait réalisées par le SCPRI en 1986, ne permettaient pas d'accéder à cette variabilité et ne donnait qu'une représentation moyenne par grandes zones, suffisante pour l'évaluation des doses reçues par la population en général. Ces travaux ont conduit l'IRSN à présenter en 2003 une reconstitution cartographique à l'échelle de la France, permettant de mieux représenter les variations des retombées atmosphériques de ^{137}Cs en mai 1986 (synthèse IRSN « Tchernobyl, 17 ans après » (avril 2003), Renaud et al (2004)).

Cette représentation cartographique était fondée sur le constat d'une relation empirique entre l'activité surfacique mesurée dans les sols de la basse vallée du Rhône en 1999 et 2000 et la hauteur des précipitations pluvieuses cumulées du 1^{er} mai au 5 mai 1986, période durant laquelle les masses d'air contaminées par l'accident de Tchernobyl ont survolé la France. L'extrapolation de cette relation empirique sur le tiers est du pays a été confrontée aux résultats de mesure d'activité des sols disponibles. Il a ainsi pu être vérifié une concordance satisfaisante (au plus un facteur 2 d'écart en-dessous ou au-dessus de la valeur estimée par la relation empirique) ; elle traduit une relative homogénéité de la contamination atmosphérique en ^{137}Cs pendant la période de dépôt sur cette partie du territoire.

L'extension de cette relation au reste du territoire a nécessité la prise en compte de la diminution de la contamination atmosphérique d'est en ouest. Les données disponibles à ce sujet étant assez peu nombreuses, l'IRSN a retenu une loi empirique de décroissance ne dépendant que de la longitude et calée sur les mesures d'activité volumique moyenne des aérosols entre le 1^{er} et le 5 mai 1986, publiées par le SCPRI en 1986.

Les deux relations empiriques ainsi obtenues, la première valable à l'est du 4^{ème} degré de longitude, la seconde valable à l'ouest de ce méridien, ont été appliquées aux 3657 points où ont été relevées quotidiennement les hauteurs de pluie entre le 1^{er} et le 5 mai 1986, ce qui a conduit à la carte présentée par l'IRSN en 2003.

Au début de l'année 2004, l'IRSN a évalué la cohérence de cette cartographie des retombées de l'accident de Tchernobyl en France au regard des mesures d'activité de sols de différentes origines (Rapport IRSN/DEI n° 04-02). Cette confrontation a donné des résultats globalement satisfaisants mais deux axes d'investigation ont été identifiés par l'IRSN, visant à traiter deux limites de l'approche empirique :

- les relations empiriques mises en œuvres pour élaborer la carte de 2003 reposent sur des hypothèses simplifiées, souvent implicites, dont la validité générale n'est pas avérée : uniformité de l'activité rémanente des tirs sur tout l'est de la France (en réalité, cette contribution varie selon le lieu) ; uniformité de l'activité volumique de l'air entre le 1^{er} et le 5 mai 1986, sur tout l'est de la France (en pratique, la contamination de l'air a connu des fluctuations, avec un déphasage possible par rapport aux épisodes pluvieux) ; décroissance de la contamination de l'air à l'ouest de la longitude 4° ne dépendant

que de la longitude (globalement vrai pour l'ensemble des 5 jours, mais avec des variations d'un jour à l'autre) ;

- ces relations sont calées sur l'événement particulier de l'accident de Tchernobyl et ne peuvent pas être appliquées à d'éventuels autres accidents de même nature qui pourraient survenir à l'avenir. Il est donc pertinent de rechercher une formulation généralisable, en précisant son domaine d'application.

Le présent rapport a pour objet de présenter les travaux menés par l'IRSN à la suite de ce constat.

Méthodologie de l'étude

La méthode retenue dans cette étude consiste à quantifier les différentes composantes à l'origine des dépôts de ^{137}Cs mesurables dans les sols après l'accident de Tchernobyl, à savoir les retombées atmosphériques sèches et humides liées à l'accident et les dépôts hérités des retombées anciennes des tirs atmosphériques d'armes nucléaires. Cette quantification repose sur une formulation analytique générale prenant en compte les phénomènes élémentaires à l'origine de l'activité du ^{137}Cs présent dans les sols :

$$D_i = \alpha \times \sum_j (C_i(j) \times P_i(j)) + \beta \times \sum_j C_i(j) + R_i$$

- Avec :
- D_i : activité surfacique théoriquement mesurable dans les sols à l'issue des dépôts au point i (Bq/m^2) ;
 - α : constante pour les dépôts humides, assimilable à un « washout ratio », en m^3/l (équivalent à $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ dans l'eau de pluie/ $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ dans l'air) ;
 - $C_i(j)$: activité volumique moyenne de l'air le jour j au point i (Bq/m^3) ;
 - $P_i(j)$: hauteur de pluie le jour j au point i (en mm ou en l/m^2) ;
 - β : constante pour les dépôts secs (en m) ;
 - R_i : activité surfacique rémanente (au point i et au moment de l'accident de Tchernobyl) issue des retombées des essais atomiques atmosphériques (en Bq/m^2).

Cette relation constitue une simplification de nombreux phénomènes, mais présente l'avantage d'exprimer les principales composantes de l'activité des sols, accessibles soit par la mesure, soit par le calcul. Il s'agit en effet :

- de mieux prendre en compte les fluctuations dans l'espace et dans le temps de l'activité volumique du ^{137}Cs dans l'air, notamment grâce aux résultats du re-mesurage par spectrométrie gamma des filtres collectés jour par jour par le SCPRI durant le passage des masses d'air contaminées (filtres qui n'avaient jusqu'alors fait l'objet que d'une mesure de l'activité β globale ; voir rapport DEI n° 04-02) ;
- d'intégrer les connaissances acquises par l'IRSN sur la rémanence des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires dans les sols français ;
- de consolider la base méthodologique permettant d'évaluer, dans des délais courts, l'étendue et l'importance des retombées au sol de polluants radioactifs à la suite d'un accident nucléaire, à partir des deux principales données rapidement accessibles que sont les activités volumiques de l'air et les hauteurs des précipitations.

Pour réaliser ce travail, il a été nécessaire de rassembler, d'interpréter et de trier l'ensemble des données pertinentes, à savoir :

- les mesures d'activités surfaciques rémanentes du ^{137}Cs dans les sols, effectuées par différents organismes entre 1986 et 2004 ;
- les valeurs, calculées ou mesurées, des activités rémanentes des essais atmosphériques d'armes nucléaires, en tentant une estimation de la part de ces activités rémanentes dans la portion de sol prélevée pour la mesure des dépôts ;
- les activités volumiques dans l'air du ^{137}Cs , déterminées par interpolation et extrapolation des mesures disponibles en France et dans les pays frontaliers ;
- les hauteurs de pluie quotidiennes mesurées au moment des dépôts.

Sélection des données nécessaires à la quantification des paramètres

L'approche retenue dans cette étude, fondée sur une formulation analytique générale de l'activité surfacique mesurable dans les sols après l'accident de Tchernobyl, a nécessité un important travail de recueil, d'évaluation et d'interprétation des données nécessaires à la détermination des paramètres α et β , à savoir les dépôts de ^{137}Cs mesurés dans les sols (D_i), l'activité volumique moyenne quotidienne de ce radionucléide dans l'air, à proximité du sol ($C_i(j)$ entre le 1^{er} et le 5 mai 1986), les hauteurs des précipitations quotidiennes entre le 1^{er} et le 5 mai 1986 ($P_i(j)$) et l'activité surfacique résiduelle provenant des retombées des essais d'armes nucléaires (R_i).

Concernant les mesures d'activité surfacique du ^{137}Cs dans les sols (D_i) : seules les mesures acquises en laboratoire sur des échantillons prélevés dans des conditions maîtrisées ont été considérées. Ainsi, 237 valeurs ont été collectées pour l'étude, obtenues à des périodes variables entre 1986 et 2004. Compte tenu des phénomènes de redistribution du ^{137}Cs contemporains ou postérieurs au dépôt, une étude détaillée de la représentativité de ces données au regard du phénomène de dépôt a été effectuée ; en effet, la relation analytique retenue n'est valable que pour les dépôts peu affectés par ces phénomènes de redistribution. Cette étude a ainsi conduit à ne retenir finalement que 139 valeurs de D_i réparties sur 58 sites distincts. Pour les sites où plusieurs valeurs de D_i sont disponibles, c'est la valeur moyenne qui a été attribuée, afin de faire abstraction de la variabilité locale du dépôt, non accessible par la relation analytique et les données retenues pour cette étude. Bien qu'en apparence limité, ce nombre de données est suffisant pour la détermination des paramètres α et β et porte sur une gamme de variation du dépôt représentative à l'échelle de la France, comprise entre 1125 et 35117 Bq/m² (valeurs rapportées à mai 1986). Cette gamme est analogue à celle observée en basse vallée du Rhône, zone retenue pour établir la relation empirique pluie-dépôt ayant conduit à la carte publiée en 2003 par l'IRSN. On notera toutefois une représentation insuffisante de la moitié ouest du territoire, avec seulement une quinzaine de sites.

Concernant l'activité volumique moyenne quotidienne du ^{137}Cs dans l'air ($C_i(j)$) : sur l'ensemble du territoire français, des valeurs mesurées ne sont disponibles que sur 39 sites, correspondant principalement aux sites nucléaires ; outre leur faible nombre, ces sites sont mal répartis sur le territoire, laissant de vastes zones (sud-ouest notamment) non couvertes par des mesures. Par conséquent, la détermination des valeurs de $C_i(j)$ n'a été possible que par interpolation des valeurs mesurées, selon une méthode de krigeage donnant une estimation des incertitudes. Afin de consolider l'estimation sur l'ensemble du territoire, cette méthode a nécessité la prise en compte de mesures de contamination de l'air disponibles dans les pays frontaliers. Au final, même s'il est possible

de déterminer une valeur d'activité volumique du ^{137}Cs dans l'air en chacun des 58 sites où D_i est connu, cette estimation est très imprécise, particulièrement aux faibles valeurs (en dessous de $0,1 \text{ Bq/m}^3$, c'est-à-dire principalement à l'ouest de la France, l'estimation doit être considérée comme non significative).

Concernant les hauteurs quotidiennes de pluie tombée entre le 1^{er} et le 5 mai 1986 ($P_i(j)$) : les hauteurs de précipitation quotidienne entre le 1^{er} et le 5 mai 1986 sont connues à l'échelle de la France entière sur près de 3700 stations de mesures météorologiques, ce qui représente une densité d'information très satisfaisante. Dans un tel cas, l'interpolation des valeurs mesurées par une méthode déterministe est suffisante. Il convient toutefois de souligner qu'à l'échelle locale, il a pu exister une forte hétérogénéité des précipitations en l'espace de quelques kilomètres. L'approche utilisée ne permet pas de décrire les conséquences de cette hétérogénéité ; l'estimation du dépôt de ^{137}Cs n'est donc au mieux représentative qu'à l'échelle du canton. C'est une des raisons qui a conduit à utiliser la moyenne des valeurs de D_i disponibles en un même site.

Concernant l'activité résiduelle héritée des essais d'armes atomiques en atmosphère ($R_i(j)$) : rares sont les sites où l'activité résiduelle du ^{137}Cs dans les sols était mesurée juste avant l'accident de Tchernobyl (stations de référence du SCPRI). Par conséquent, seules des méthodes indirectes ont permis d'accéder aux valeurs de R_i , basées sur les travaux récents menés par l'IRSN. La méthode la plus robuste repose sur la corrélation entre l'activité déposée et l'importance des précipitations moyennes annuelles ; sauf cas particulier, il s'agit de la méthode privilégiée pour estimer R_i . Le plus souvent, cette valeur se situe en dessous de 3000 Bq/m^2 et dépasse rarement 5000 Bq/m^2 (zones montagneuses). La principale source d'incertitude sur ce terme concerne la part de ce dépôt effectivement présente dans les échantillons de sol prélevés à des profondeurs plus ou moins importantes. Cette incertitude peut peser sensiblement dans les parties du territoire où les retombées de l'accident de Tchernobyl ont été faibles (de l'ordre de quelques milliers de Bq/m^2), mais elle est d'une moindre importance dans les zones où ces retombées ont été plus importantes.

Détermination des paramètres du modèle

L'exploitation des différentes données disponibles à l'aide de la relation analytique ci-dessus, ainsi que plusieurs de ses variantes, permet de tirer des enseignements sur les paramètres de dépôt intervenant dans cette relation.

Sur le paramètre α (lessivage du ^{137}Cs de l'air par les pluies) : des valeurs statistiquement significatives de ce paramètre sont obtenues avec pratiquement toutes les variantes de ce modèle. Cela confirme le caractère prépondérant du phénomène de dépôt humide à la suite de l'accident de Tchernobyl, dans l'explication des activités surfaciques du ^{137}Cs observées sur l'ensemble du territoire. La valeur de α sur la durée totale des retombées de l'accident de Tchernobyl (du 1^{er} au 5 mai 1986) est estimée à $1190 \pm 76 \text{ m}^3/\text{l}$ (Bq/l d'eau de pluie par Bq/m^3 d'air). Une analyse plus détaillée suggère une fluctuation de ce paramètre d'un jour à l'autre : aucune valeur significative n'est obtenue pour les 1^{er} et 5 mai 1986, jours où les pluies ont été faibles sur les 58 sites étudiés, rarement supérieures à 10 mm (4 sites le 1^{er} mai, 6 sites le 5 mai) ; des valeurs significatives sont déterminées pour le 2 mai ($1488 \pm 157 \text{ m}^3/\text{l}$), le 3 mai ($930 \pm 117 \text{ m}^3/\text{l}$) et le 4 mai ($2035 \pm 332 \text{ m}^3/\text{l}$). Ces variations sont significatives et traduisent probablement des conditions différentes de collecte des aérosols de ^{137}Cs de l'air par les gouttes de pluie. De même, une application régionalisée du modèle conduit à des valeurs différentes de α entre le nord-est ($951 \pm 85 \text{ m}^3/\text{l}$) et le sud-est ($1573 \pm 139 \text{ m}^3/\text{l}$) ; aucune valeur significative de ce paramètre n'a pu être obtenue pour la moitié ouest de la France, mais l'estimation suggère une valeur plutôt

faible. Ces variations pourraient traduire une évolution spatiale de l'efficacité de l'interaction entre les pluies et les aérosols, mais elles peuvent aussi être expliquées par l'évolution des zones de pluie dans le temps, en rapport avec le changement de valeur de α d'un jour sur l'autre (cf. plus haut) ; en effet, le nord-est est surtout influencé par les pluies du 3 mai, alors que le sud-est a principalement reçu les pluies du 2 et du 4 mai.

Ces valeurs du paramètre α sont dans la gamme des valeurs proposées dans la littérature pour les coefficients de lessivage humide, utilisées dans les modèles de dispersion des aérosols, mais aussi observées à partir des mesures mensuelles de la radioactivité de l'air réalisées en France depuis 1971 par le SCPRI, l'OPRI et l'IPSN.

Ainsi, malgré les imprécisions inhérentes aux données utilisées (en particulier $C_i(j)$) et la variabilité inévitable des activités de ^{137}Cs rémanentes dans les sols, induite par des phénomènes sans rapport avec le lessivage humide de l'atmosphère, l'approche employée dans cette étude permet d'accéder à une estimation du coefficient de lessivage humide α qui est à la fois statistiquement significative et cohérente avec les valeurs connues par ailleurs.

Sur le paramètre β (coefficient de dépôt sec) : quelles que soient les variantes du modèle, aucune valeur statistiquement significative de β n'a pu être obtenue, ces valeurs étant par ailleurs fortement variables et, dans certains cas, sans signification physique (valeurs négatives) ; on notera cependant que dans le modèle initial proposé, la valeur obtenue (240 m) est dans la gamme usuelle des valeurs observées pour les aérosols de taille micrométrique ou sub-micrométrique (entre 86 et 432 m). Une contribution le plus souvent très faible des dépôts secs au regard des dépôts pluvieux, souvent en dessous de la valeur de l'activité rémanente des essais nucléaires, elle-même connue avec imprécision, explique cette impossibilité de caractériser le coefficient de dépôt sec propre aux retombés de l'accident de Tchernobyl avec une précision acceptable. Cette limite semble irrémédiable, car le coefficient β dépend fortement des caractéristiques des aérosols (diamètre des particules), de l'état des surfaces où se forme le dépôt (effet de peigne des forêts par exemple) et des conditions de vents. Il convient cependant de relativiser cette difficulté dans la mesure où, lorsque des dépôts humides importants se sont formés, la part provenant du dépôt sec et l'incertitude associée deviennent marginales au regard de l'estimation du dépôt total.

Parmi les variantes du modèle, celle faisant intervenir l'activité volumique de l'air mesurée la veille du jour du dépôt humide ne met pas en évidence d'influence significative de cette variable dans l'explication du dépôt total ; cette hypothèse est donc à rejeter. De même, la prise en compte d'une fraction du dépôt résiduel résultant des tirs atmosphériques d'armes nucléaires (R_i) n'apporte aucune amélioration dans l'estimation des paramètres α et β .

Enseignements retirés de l'étude

Au-delà des enseignements sur la physique des dépôts, deux ensembles de résultats ont été tirés de cette étude : le premier porte sur la reconstitution des dépôts de ^{137}Cs induits par l'accident de Tchernobyl ; le second porte sur l'amélioration des méthodes d'évaluation des conséquences post-accidentelles résultant de retombées atmosphériques de polluants radioactifs.

En ce qui concerne la reconstitution des dépôts de mai 1986 : après analyse des écarts entre les valeurs de dépôt estimées par le modèle original ou ses variantes et les valeurs mesurées de D , sur les 58 sites, il apparaît que l'écart type résiduel des ajustements varie de 3630 à 4218 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$. Si on tient également compte de l'écart type des coefficients estimés, introduisant une erreur dans la composante déterministe des modèles, il en résulte que

l'application du modèle ou de ses variantes pour évaluer les activités rémanentes dans les sols après mai 1986 conduit à une incertitude de l'ordre de $\pm 5000 \text{ Bq.m}^{-2}$ au niveau de confiance de 80% et $\pm 10000 \text{ Bq.m}^{-2}$ au niveau de confiance de 95%. Compte tenu des niveaux de dépôts estimés sur la France, compris entre quelques centaines et 40000 Bq.m^{-2} , il n'est pas envisageable d'obtenir une cartographie des dépôts fiable à ce niveau de 95%. Le degré de confiance que l'on pourra accorder à une carte suffisamment informative des dépôts en France sera donc au maximum de 80%.

Ainsi, bien que l'approche appliquée dans cette étude permette d'accéder aux paramètres du dépôt humide induit par l'accident de Tchernobyl, de façon statistiquement et physiquement significative, et de démontrer la part prépondérante de ce phénomène dans l'explication des dépôts de ^{137}Cs mesurés dans les sols après mai 1986, les modèles de dépôt utilisés dans cette étude sont trop simplificateurs pour une reconstitution précise des dépôts rémanents dans les sols, très variables sur le territoire. Il est notamment impossible d'obtenir une estimation fiable du dépôt dans les zones où les retombées de l'accident de Tchernobyl ont été de faible importance, c'est-à-dire dans les zones où les dépôts humides ont été modérés ou absents. Sur les territoires où les activités surfaciques sont plus élevées (au-dessus de 10000 Bq/m^2), l'estimation peut être considérée comme significative même si elle est entachée d'une imprécision relativement importante. **Toutefois, au regard de la variabilité locale des activités surfaciques du ^{137}Cs liée à l'hétérogénéité des pluies et à la redistribution du césium postérieurement au dépôt, l'incertitude associée à l'estimation est tout à fait acceptable, du même ordre de grandeur que ce qui était considéré dans les travaux antérieurs de l'IRSN (cf. rapport DEI n° 04-02).**

L'analyse du résidu entre valeurs estimées par le modèle et valeurs mesurées met en évidence un biais dans l'estimation des paramètres, corrélée à certaines variables explicatives (principalement $\Sigma C_i(j)$). Il est impossible de quantifier ce biais ni de réduire son effet, car aucune donnée nouvelle ne permettrait de le faire ; en particulier, il est impossible d'améliorer la connaissance sur les $C_i(j)$, ces données n'ayant pu être acquises que par des prélèvements réalisés le jour considéré. Cette conclusion confirme également celle évoquée plus haut sur l'impossibilité de déterminer une valeur significative de β .

Enfin, même si des valeurs numériques différentes sont obtenues entre ce modèle analytique (et ses variantes) et la relation empirique pluie-dépôt utilisée pour la carte de 2003, l'écart entre ces valeurs n'est pas statistiquement significatif : l'application des deux modèles aux 3657 stations de Météo-France ayant mesuré les hauteurs de pluie en mai 1986 donne des écarts de résultats qui, pour 94% des stations, sont inférieurs (en valeur absolue) à 5000 Bq/m^2 . De même, la comparaison aux valeurs mesurées ne permet pas de discriminer les différents modèles.

Ainsi, l'approche analytique adoptée dans cette étude ne permet pas d'améliorer la reconstitution des retombées de l'accident de Tchernobyl en France au regard de ce qui avait été obtenu en 2003. Elle confirme cependant, par une meilleure quantification des incertitudes associées aux données et à leur spatialisation, les limitations de représentativité et de lecture de la cartographie des dépôts de césium 137 obtenue en 2003. En l'occurrence, cette cartographie, à lire à l'échelle minimale du $1/1000000^{\text{ème}}$ avec un degré de confiance de 80%, présente les grandes tendances des dépôts de mai 1986 : des dépôts beaucoup plus importants à l'est qu'à l'ouest, assez homogènes sur les 2/3 ouest du pays ($< 4000 \text{ Bq/m}^2$), avec une hétérogénéité à l'est liée à l'importance des pluies ; des dépôts qui ont atteint 10000 Bq/m^2 là où les pluies cumulées ont été supérieures à 20 mm et qui ont dépassé 20000 Bq/m^2 sur les zones les plus arrosées (plus de 35 mm). Que ce soit par la relation empirique de 2003 ou la relation analytique de la présente étude, en aucune façon il n'est possible de décrire des gradients plus fins

des dépôts, ni de se prononcer à plus petite échelle, d'un canton ou d'une commune par exemple. La démarche rétrospective se heurte à la faible représentativité des données mesurées, notamment celles relatives à l'activité volumique quotidienne du ^{137}Cs dans l'air. Aucune mesure nouvelle ne permet de compenser cette carence. Par conséquent, aucune amélioration significative de la cartographie générale des retombées de l'accident de Tchernobyl en France n'est plus à attendre sur la base des mesures faites à l'époque ou acquises depuis.

En ce qui concerne l'amélioration des méthodes d'évaluation des conséquences post-accidentelles résultant de retombées atmosphériques de polluants radioactifs : le premier enseignement prospectif retiré de ce travail est la nécessité de disposer d'un réseau de stations de prélèvement des aérosols radioactifs suffisamment dense et bien réparti sur le territoire. Malheureusement, de telles qualités n'étaient pas réunies en 1986. Aujourd'hui, le réseau de surveillance des aérosols exploité par l'IRSN assure, avec ses 70 stations, une meilleure couverture du territoire.

Il convient cependant d'évaluer si les caractéristiques de ce réseau sont suffisantes au regard des besoins de détermination de l'état de contamination de l'air sur l'ensemble du territoire, en cas d'accident de même ampleur que celui de Tchernobyl. L'objectif est d'améliorer le résultat de l'interpolation entre stations de mesure, et de disposer d'une connaissance du niveau de contamination de l'air suffisamment précise en tout lieu. Cette interpolation peut être obtenue soit par des méthodes mathématiques (déterministes ou par krigeage) telles que celles utilisées dans la présente étude, soit par ajustement des résultats de mesure à l'aide des modèles de dispersion atmosphérique de nouvelle génération, en cours de développement au sein de l'IRSN (DEI/SESUC) pour les besoins de la gestion des situations de crise nucléaire et radiologique. Ainsi, l'IRSN poursuivra un travail visant à évaluer le dimensionnement optimal de son réseau de surveillance des aérosols radioactifs dans un tel contexte.

Le second enseignement, lié à l'importance que revêt le phénomène de dépôt humide dans le flux total déposé au sol, touche à la forte fluctuation du coefficient de lessivage α , avec deux conséquences : l'hypothèse d'uniformité spatiale et temporelle de l'interaction entre les gouttelettes de pluie et les aérosols de l'air n'est pas vérifiée et la mesure de l'activité volumique du ^{137}Cs dans l'air au niveau du sol ne peut pas, à elle seule, décrire la situation en altitude, où se chargent les gouttes d'eau responsables du dépôt. Deux voies d'amélioration en découlent et sont en développement au sein de l'IRSN :

- au-delà des observations retirées de cette étude liée à l'accident de Tchernobyl, l'IRSN va poursuivre l'étude événementiel du lessivage de l'atmosphère, par l'exploitation dans la durée des données recueillies par certaines des stations de son réseau d'observation OPERA. L'objectif est de mieux connaître l'amplitude de variation du coefficient de lessivage et d'en déterminer les facteurs explicatifs : effet du type de précipitation (averses ou continue), de l'origine de la masse d'air, de l'intensité des pluies, de la taille des gouttes, etc.. Cette connaissance permettra de guider le travail d'expertise des situations post-accidentelles en tenant compte des circonstances propres à ces situations ;
- en situation de contamination accidentelle de l'atmosphère, à défaut de pouvoir accéder à des mesures en altitude, l'IRSN poursuit le développement d'un modèle de dispersion atmosphérique à longue distance permettant notamment de mieux décrire l'état de contamination à différentes altitudes. L'emploi de ce modèle, calé sur les données météorologiques réelles et se recoupant avec les mesures de contamination

de l'air faites au niveau du sol grâce au réseau de surveillance des aérosols (cf. ci-dessus), devrait permettre une évaluation plus précise du flux déposé par les précipitations. Par ailleurs, ce modèle ayant une base physique associée notamment aux phénomènes météorologiques, il devrait permettre une interpolation des mesures de la contamination de l'air au niveau du sol plus satisfaisante que celle obtenue par des techniques purement mathématiques. En termes de perspectives, compte tenu des données recueillies dans la présente étude, ce modèle pourra être mis à l'épreuve sur le cas particulier et historique de l'accident de Tchernobyl.

Ainsi, des perspectives claires et positives se dégagent en faveur d'une méthode suffisamment robuste permettant d'évaluer, dans un délai court après un accident radiologique majeur, l'importance du flux de contaminants radioactifs déposé au sol. Les actions permettant de consolider cette méthode sont engagées au sein de l'IRSN. Elles sont couplées également à l'étude de la sensibilité radioécologique à l'aval du processus de dépôt, dont la connaissance est indispensable pour expliquer et prévoir la variabilité observée dans les différents compartiments des milieux terrestres, le sol et les végétaux en particulier.

1. INTRODUCTION

Les travaux présentés dans ce rapport portent sur la quantification des différentes composantes des retombées atmosphériques de ^{137}Cs en France, consécutives à l'accident de Tchernobyl, à partir des mesures de l'activité surfacique du ^{137}Cs dans les sols acquises après cet accident. Une telle quantification, fondée sur une relation empirique pluie-dépôt établie par l'interprétation de mesures dans la basse vallée du Rhône, avait permis à l'IRSN de publier en 2003 une carte reconstituant les dépôts atmosphériques résultant de cet accident à l'échelle de la France entière (Renaud et al, 2003 ; Renaud et al., 2004 ; rapport IRSN/DEI 04-02, 2004). Dans la présente étude, il est proposé une reconstitution selon une démarche différente, basée sur une formulation analytique qui prend davantage en compte les phénomènes élémentaires à l'origine de l'activité du ^{137}Cs présent dans les sols après l'accident. Par rapport aux travaux antérieurs, les objectifs sont :

- de tenir compte des fluctuations dans l'espace et dans le temps de l'activité volumique du ^{137}Cs dans l'air du 1^{er} au 5 mai 1986, notamment en s'appuyant sur les résultats du re-mesurage par spectrométrie gamma des filtres collectés quotidiennement par le SCPRI durant le passage des masses d'air contaminées (filtres qui n'avaient jusqu'alors fait l'objet que d'une mesure de l'activité β globale ; voir rapport DEI n° 04-02) ;
- d'intégrer les connaissances acquises par l'IRSN sur la rémanence des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires dans les sols français ;
- de consolider la base méthodologique permettant d'évaluer, dans des délais courts, l'étendue et l'importance des retombées au sol de polluants radioactifs à la suite d'un accident nucléaire à partir des deux principales données rapidement accessibles que sont les activités volumiques de l'air et les hauteurs des précipitations.

Ces travaux se situent dans le prolongement de la contribution apportée par l'IRSN à la mission confiée en août 2002 au Pr. A. Aurengo par les ministres chargés de la santé et de l'environnement, au travers du rapport référencé DEI n° 04-02, traitant des éléments de réponse sur les représentations cartographiques des retombées de l'accident de Tchernobyl en France.

Pour réaliser cette étude, il a été nécessaire de rassembler, d'interpréter et de trier l'ensemble des données pertinentes, à savoir :

- les mesures d'activités surfaciques rémanentes du ^{137}Cs dans les sols, effectuées par différents organismes entre 1986 et 2004 ;
- les valeurs, calculées ou mesurées, des activités rémanentes des essais atmosphériques d'armes nucléaires, en estimant la part de ces activités qui était présente dans la portion de sol prélevée pour la mesure des dépôts ;
- les activités volumiques dans l'air du ^{137}Cs du 1^{er} au 5 mai 1986, déterminées par interpolation et extrapolation des mesures disponibles en France et dans les pays frontaliers ;
- les hauteurs de pluie quotidiennes mesurées au moment des dépôts.

Afin de conserver la trace de ces données et consolider la base du présent travail, celles-ci sont intégralement restituées en annexe du rapport.

Il convient de bien noter que toutes les valeurs d'activité du ^{137}Cs données dans le présent rapport sont rapportées à début mai 1986, sauf mention contraire explicite.

2. PHÉNOMÉNOLOGIE DE FORMATION DES DÉPÔTS DE ^{137}Cs ET MÉTHODES DE RECONSTITUTION

2.1. ORIGINES DES ACTIVITÉS SURFACIQUES RÉMANENTES DU ^{137}Cs DANS LES SOLS APRÈS L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL

Quelques jours après l'accident de Tchernobyl, principalement entre le 1^{er} et le 5 mai 1986, la France était traversée par des masses d'air contenant notamment du ^{137}Cs sous forme d'aérosols, à des concentrations variables dans le temps et diminuant, en tendance générale, d'est en ouest. Deux mécanismes complémentaires ont entraîné le dépôt du ^{137}Cs au sol (incluant les surfaces végétales et le sol proprement dit) :

- le dépôt dit « sec », formé lorsque le radionucléide était présent dans l'air au contact de la surface et dont l'importance dépendait de sa concentration dans l'air à proximité du sol, mais aussi de l'état de surface (interception plus forte des polluants par le couvert forestier, effets du relief et du vent) ;
- le dépôt dit « humide », formé lors des précipitations pluvieuses par chargement des gouttes de pluie en césium présent sur leur trajet dans l'atmosphère. À concentration atmosphérique égale, ce mécanisme a provoqué des dépôts beaucoup plus intenses que les dépôts secs, ainsi qu'une distribution différente de la contamination entre la surface des végétaux et le sol.

L'activité du ^{137}Cs dans le sol immédiatement après l'accident de Tchernobyl a été le résultat cumulé de ces deux mécanismes, ainsi que de la contamination rémanente venant des essais atmosphériques d'armes nucléaires menés jusqu'en 1980, elle-même variable selon le lieu.

La figure 1 illustre le schéma conceptuel de base rassemblant les principaux phénomènes impliqués dans la formation du dépôt, pour une surface agricole ou un terrain ayant un couvert végétal naturel (prairie, forêt).

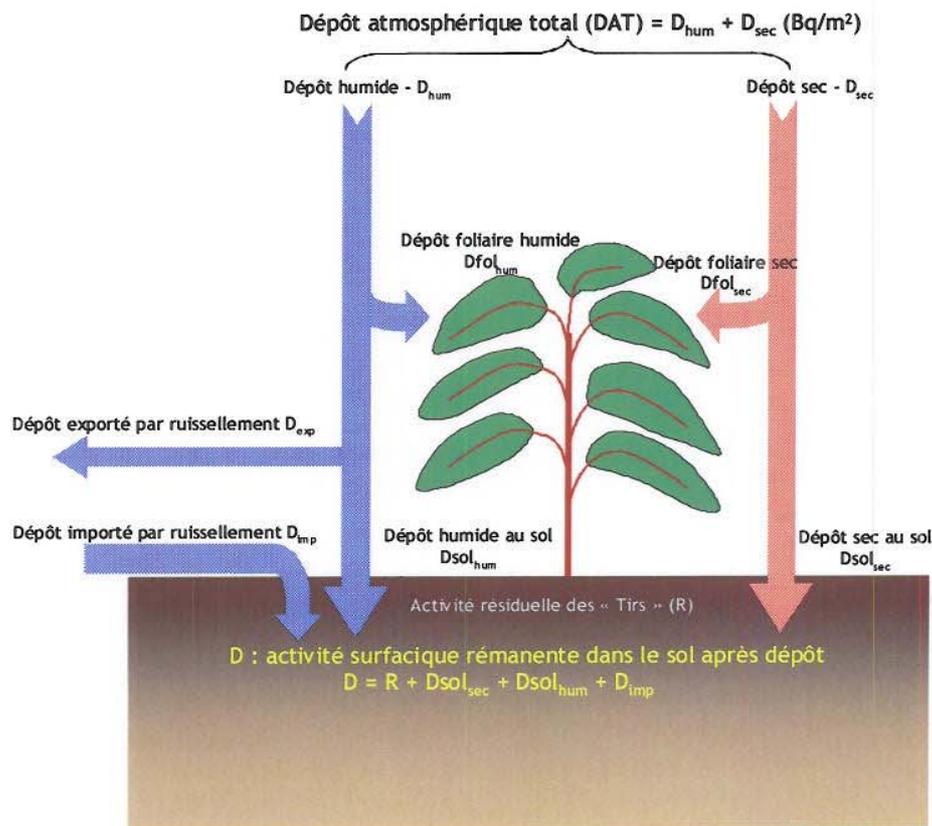


Figure 1 - Schéma conceptuel de base illustrant le phénomène de dépôt atmosphérique sec et humide de ¹³⁷Cs et la répartition de ce dépôt entre le végétal et le sol. Dans le cas du dépôt humide, le phénomène d'exportation ou d'importation par l'eau de pluie contenant le ¹³⁷Cs est représenté. Les phénomènes postérieurs à la formation du dépôt, tels que l'érosion des sols, le lessivage du césium dans les sols, etc. ne sont pas pris en compte dans ce schéma (cf. § 3.1.2). Avant la formation du dépôt d'origine atmosphérique, le sol contenait une activité résiduelle héritée des retombées des tirs d'armes nucléaires en atmosphère (R).

Le dépôt sec (D_{sec}) se répartit entre le végétal (D_{fol_sec}) et le sol (D_{sol_sec}), l'interception par les feuilles étant particulièrement efficace pour ce type de dépôt, jusqu'à plus de 80% du dépôt sec total ($D_{sec} = D_{fol_sec} + D_{sol_sec}$). La part de ¹³⁷Cs qui arrive au sol y reste et se fixe sur les matières du sol (humus et minéraux argileux).

De même, le dépôt humide (D_{hum}) se répartit entre le végétal (D_{fol_hum}) et le sol, mais, contrairement au dépôt sec, l'interception du dépôt humide par les feuilles est d'autant moins efficace que la quantité d'eau de pluie tombée est plus importante (ruissellement de l'eau sur les feuilles), jusqu'à atteindre moins de 20% du dépôt total en cas de forte pluie. De plus, la part du dépôt humide qui arrive au sol à un devenir immédiat plus diversifié que le dépôt sec : une partie de l'eau de pluie contenant le ¹³⁷Cs s'infiltrer dans la terre (D_{sol_hum}) et le césium se fixe sur les matières traversées (humus, minéraux argileux) ; une autre partie (D_{exp}), plus ou moins importante selon la pente du terrain, sa rugosité et la perméabilité de la terre, est exportée par ruissellement de l'eau de pluie en surface, soit pour s'accumuler sur une autre partie du terrain (impluvium), soit pour être évacuée définitivement par les cours d'eau. A l'inverse, la zone considérée peut recevoir une part de l'activité déposée sur des terrains adjacents (D_{imp}), venant s'accumuler puis s'infiltrer dans le sol. D'autres facteurs particuliers non représentés dans ce schéma (égouttement des arbres, formation puis fonte de névés) peuvent entraîner des distributions hétérogènes très localisées (taches de contamination de quelques dm² à quelques m²).

Ainsi, l'activité surfacique rémanente dans le sol (D) est le résultat de l'accumulation, sur une profondeur plus ou moins importante, de l'activité résiduelle des tirs (R), du dépôt sec ($D_{sol_{sec}}$) et humide ($D_{sol_{hum}}$) retenu par le sol et, éventuellement, de l'activité venant des parcelles adjacentes par ruissellement puis infiltration (D_{imp}).

Compte tenu de la variabilité des phénomènes en cause, notamment l'importance inégale des pluies tombées début mai 1986 et les phénomènes de redistribution des dépôts humides au niveau du sol, il est certain que l'activité surfacique du ^{137}Cs mesurable dans les sols immédiatement après l'accident a été très hétérogène sur le territoire, même dans une région donnée. Décrire l'état initial de cette contamination avec précision et dans le détail aurait nécessité une forte densité de mesures d'activité du césium dans les sols immédiatement après l'accident. Malheureusement, un tel nombre de mesures n'existe pas en France et ne permet pas la réalisation d'une cartographie directe sur cette base. Seules des approches indirectes, fondées sur l'interprétation des mesures disponibles d'activité du ^{137}Cs dans l'air et dans les sols, permettent une estimation du dépôt atmosphérique du césium sur l'ensemble du territoire et d'expliquer les activités rémanentes constatées dans les sols après le dépôt. De 1999 à 2003, l'IPSN puis l'IRSN ont développé une première approche fondée sur une relation empirique pluie-dépôt, résumée dans le paragraphe 2.2 ci-après. Pour la présente étude, une approche différente, fondée sur une formulation analytique simple des principaux phénomènes à l'origine du dépôt, a été appliquée (cf. paragraphe 2.3).

2.2. LA MÉTHODE DE RECONSTITUTION DES DÉPÔTS ATMOSPHÉRIQUES PAR LA RELATION EMPIRIQUE PLUIE-DÉPÔT (IRSN 2003)

En 2003, l'IRSN a présenté une carte reconstituant les dépôts de ^{137}Cs sur les sols en France consécutifs à l'accident de Tchernobyl en 1986.

Cette représentation cartographique était fondée sur le constat d'une relation empirique entre l'activité surfacique mesurée dans les sols (zone atelier de la basse vallée du Rhône) et la hauteur des précipitations pluvieuses entre le 1^{er} mai et le 5 mai 1986. Cette relation établie dans la zone atelier est la suivante :

$$\text{Dépôt rémanent de } ^{137}\text{Cs} \text{ dans le sol en mai 1986 (Bq.m}^{-2}\text{)} = 560 \times [\text{hauteur de pluie en mm}^*] + 1984 \quad (1)$$

* cumul des précipitations qui ont eu lieu entre le 1^{er} et le 5 mai 1986

Le terme constant (1984 Bq.m⁻²) représente la part des dépôts secs dus à l'accident de Tchernobyl (estimés à 1000 Bq.m⁻² sur l'ensemble de la zone) et les dépôts résiduels provenant des retombées des tirs d'armes atomiques en atmosphère. Ainsi, pour la part relative aux retombées atmosphériques de l'accident de Tchernobyl, on peut déduire la relation (1') suivante :

$$\text{Dépôt atmosphérique de } ^{137}\text{Cs} \text{ en mai 1986 (Bq.m}^{-2}\text{)} = 560 \times [\text{hauteur de pluie en mm}^*] + 1000 \quad (1')$$

* cumul des précipitations qui ont eu lieu entre le 1^{er} et le 5 mai 1986

L'extrapolation de la relation empirique (1) sur l'ensemble de l'est de la France a été confrontée aux résultats de mesure d'activité surfacique dans les sols obtenues par l'IPSN en 1986. Il a ainsi pu être vérifié une concordance satisfaisante (au plus un facteur 2 d'écart en-dessous ou au-dessus de la valeur estimée par la relation empirique) ; elle traduit une relative homogénéité de la contamination atmosphérique en ^{137}Cs pendant la période de dépôt sur cette partie du territoire.

L'extension de la relation (1') au reste du territoire a nécessité la prise en compte de la diminution de la contamination atmosphérique d'est en ouest. Les données disponibles à ce sujet étant assez peu nombreuses, l'IRSN a retenu une loi empirique de décroissance ne dépendant que de la longitude (L) et calée sur les mesures d'activité volumique des aérosols produites par le SCPRI en 1986. La relation empirique appliquée à l'ouest du 4° de longitude prend alors la forme suivante (en excluant les dépôts rémanents des tirs) (Renaud et al, 2004⁽¹⁾) :

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

pour $L < 4^\circ \text{ Est}$

* cumul des précipitations qui ont eu lieu entre le 1^{er} et le 5 mai 1986

Les relations (1') et (2) permettent donc une quantification des retombées atmosphériques de l'accident de Tchernobyl respectivement à l'est et à l'ouest du 4° de longitude est, à partir de la seule connaissance du cumul des pluies tombées entre le 1^{er} et 5 mai 1986. C'est ainsi que l'IRSN a pu appliquer ces relations au niveau des 3657 communes où des stations météorologiques ont permis de relever quotidiennement les hauteurs de pluie entre le 1^{er} et le 5 mai 1986. Il en a résulté autant de valeurs estimées de l'activité surfacique du ¹³⁷Cs déposé à la suite de l'accident, base de l'élaboration de la carte des retombées atmosphériques à l'échelle de la France présentée par l'IRSN en 2003.

Le détail de cette démarche est récapitulé dans le rapport IRSN/DEI-2004-02 de mars 2004. Ce rapport fournit de nombreux éléments de confrontation des résultats obtenus par les relations empiriques, permettant d'éprouver la fiabilité de cette approche ; ils ne seront pas re-développés ici. Cette confrontation a donné des résultats globalement satisfaisants mais, en liaison avec le Pr. A. AURENGO à qui était destiné ce premier rapport, deux axes d'investigation ont été identifiés par l'IRSN, visant à traiter deux limites de l'approche empirique :

- les relations empiriques reposent sur des hypothèses simplifiées, souvent implicites, dont la validité générale n'est pas avérée : uniformité de l'activité rémanente des tirs sur tout l'est de la France (en réalité, cette contribution varie selon le lieu) ; uniformité de l'activité volumique de l'air entre le 1^{er} et le 5 mai 1986, sur tout l'est de la France (en pratique, la contamination de l'air a connu des fluctuations, avec un déphasage possible par rapport aux épisodes pluvieux) ; décroissance de la contamination de l'air à l'ouest de la longitude 4° ne dépendant que de la longitude (globalement vrai pour l'ensemble des 5 jours, mais avec des variations d'un jour à l'autre) ;
- ces relations sont calées sur l'événement particulier de l'accident de Tchernobyl et ne peuvent pas être appliquées à d'éventuels autres accidents de même nature qui pourraient survenir à l'avenir. Il est donc pertinent de rechercher une formulation généralisable, en précisant son domaine d'application.

Ces deux raisons ont conduit à rechercher une formulation analytique de la constitution du dépôt de ¹³⁷Cs, tenant compte des phénomènes de dépôts « humide » et « sec » des aérosols présents dans l'atmosphère à la suite de l'accident, ainsi que de l'activité rémanente des tirs atmosphériques.

¹ Dans l'article de Renaud et al. publié en 2004 dans la revue Radioprotection (Vol. 39, n°1), la formule (3) présentant la relation décroissante à l'ouest du 4° de longitude Est comporte une erreur dans le terme exponentiel, en contradiction avec les explications fournies dans le texte de l'article ; ainsi, il convient de lire (0,43 x (Long i - 4)) au lieu de (0,43 x (Long i - 4,5)).

2.3. FORMULATION ANALYTIQUE DE L'ACTIVITÉ RÉMANENTE DU ^{137}Cs DANS LES SOLS APRÈS L'ACCIDENT

Comme expliqué au paragraphe 2.1, la présence d'une contamination en ^{137}Cs dans l'atmosphère pendant la période du 1^{er} mai au 5 mai 1986, a conduit à la formation d'un dépôt au sol qui s'est ajouté à l'activité rémanente des tirs. Lorsque ce dépôt atmosphérique a pu être majoritairement conservé dans le sol (importation ou exportation par ruissellement de l'activité déposée considérée comme faible au regard du dépôt total et fixation durable du ^{137}Cs sur les composants du sol), il est possible de décrire le dépôt total rémanent dans le sol au point i considéré à l'aide de la relation analytique suivante :

$$D_i = \alpha \times \sum_j (C_i(j) \times P_i(j)) + \beta \times \sum_j C_i(j) + R_i \quad (3)$$

Avec :

D_i : activité surfacique théoriquement mesurable dans les sols à l'issue des dépôts au point i (Bq/m^2) (valeur 1986) ;

α : constante pour les dépôts humides, assimilable à un « washout ratio », en m^3/l (équivalent à $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}/\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) ;

$C_i(j)$: activité volumique de l'air le jour j au point i (Bq/m^3) ;

$P_i(j)$: hauteur de pluie le jour j au point i (en mm ou en l/m^2) ;

β : constante pour les dépôts secs (en m) ;

R_i : activité surfacique rémanente (au moment de l'accident de Tchernobyl) issue des retombées des essais atomiques atmosphériques au point i ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$).

Cette relation constitue une simplification de nombreux phénomènes, mais présente l'avantage d'exprimer les principales composantes de l'activité des sols, accessibles soit par la mesure, soit par le calcul : la rémanence des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires (R_i), les dépôts pluvieux ($\alpha \cdot \sum(C_i(j) \cdot P_i(j))$) et les dépôts secs ($\beta \cdot \sum(C_i(j))$) consécutifs à l'accident de Tchernobyl.

Le paramètre α traduit le phénomène de collecte du ^{137}Cs de l'air par les gouttes d'eau se formant dans les nuages puis tombant en pluie au sol. Dans le détail, il dépend de nombreux phénomènes physiques élémentaires, eux mêmes très variables (concentration des particules de ^{137}Cs dans l'air, tailles des aérosols, nombre et taille des gouttes d'eau, volume d'air balayé, etc.) ; en pratique, il n'est pas possible de quantifier tous ces phénomènes dans le cas étudié. C'est pourquoi il n'est pris en compte que deux types de données pour quantifier le dépôt humide : la concentration moyenne quotidienne du ^{137}Cs dans l'air, telle qu'observée au niveau du sol, supposée uniforme dans l'ensemble du volume traversé par les gouttes de pluie ; la quantité quotidienne de pluie tombée au sol, supposée proportionnelle au nombre de gouttes de pluie ayant traversé l'air contaminé.

Le paramètre β est lié à la vitesse de dépôt sec des aérosols (en m/s) appliquée à la concentration moyenne de l'air $C_i(j)$ intégrée sur une journée (86400 s). La vitesse de dépôt sec dépend fortement de la taille des aérosols mais aussi des caractéristiques des surfaces au sols (voir aussi § 2.1).

La suite de l'étude consiste à déterminer les valeurs des paramètres α et β de l'équation (3), propres à l'épisode de retombées atmosphériques de l'accident de Tchernobyl. Pour cela, il est nécessaire de rassembler les jeux de

données (D_i , $C_i(j)$, $P_i(j)$, R_i) disponibles par la mesure ou, à défaut, estimées par le calcul, en sélectionnant celles qui sont les plus représentatives des conditions de validité de la relation (3).

3. DÉTERMINATION DES DONNÉES DISPONIBLES ET ANALYSE DE LEUR REPRÉSENTATIVITÉ

3.1. L'ACTIVITÉ SURFACIQUE D_i

Dans l'équation 3, le paramètre D_i représente l'activité en césium 137 d'un sol immédiatement après les dépôts consécutifs à l'accident de Tchernobyl. Les mesures effectuées en 1986 sont rares à l'échelle de la France entière. Aussi, pour mener cette étude, il a fallu recourir à des mesures effectuées depuis cette date et jusqu'à aujourd'hui. Évaluer l'activité initialement déposée en 1986 sur une surface à partir d'une mesure réalisée plusieurs années après est une opération très délicate en raison de problèmes de représentativité de la mesure réalisée. Ce questionnement sur la représentativité de la mesure de l'activité d'un sol comporte trois aspects distincts :

- la représentativité de l'échantillon prélevé pour rendre compte de l'activité présente dans la portion de sol échantillonnée. Ce problème résulte principalement de biais liés aux protocoles de prélèvement et de traitement des échantillons et notamment de prélèvements effectués sur une profondeur insuffisante au regard de la pénétration du césium 137 ;
- la représentativité de cette portion de sol (quelques décimètres carrés) pour rendre compte de l'activité « moyenne » des sols environnants, à l'échelle de quelques mètres d'une part et de quelques centaines de mètres d'autre part. Ce problème résulte de phénomènes de redistribution des dépôts pluvieux à cette échelle concomitants des dépôts (ruissellement) ou postérieurs à ces dépôts (colluvionnement, érosion) ;
- la représentativité de l'activité « moyenne » des sols d'un site lorsqu'elle est reliée pour cette étude à une donnée connue à l'échelle cantonale (150 km^2) : la hauteur de pluie mesurée par Météo-France. Cette question rejoint celle de la représentativité des hauteurs de pluies mesurées au regard de l'hétérogénéité de ce phénomène à cette échelle, ainsi que de leur interpolation.

3.1.1 ORIGINE DU CÉSIUM 137 PRÉSENT DANS LES SOLS FRANÇAIS

Les activités en césium 137 mesurées dans les sols français depuis 1986 ont deux origines possibles (localement, les apports d'une installation nucléaire sont généralement négligeables) : les retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires de 1945 à 1980, et celles de l'accident de Tchernobyl début mai 1986. Il est généralement impossible de discriminer directement les contributions respectives de ces deux sources dans le césium 137 mesuré. Le moyen le plus sûr est de disposer des activités d'un même sol avant et après les dépôts de mai 1986. Ce n'est le cas que pour les sols des 6 stations de référence du SCPRI. L'autre méthode consiste à utiliser le rapport entre les activités des deux césiums, 137 et 134, dont la valeur initiale, voisine de 2 en mai 1986, signe les dépôts consécutifs à l'accident de Tchernobyl. Malheureusement, les mesures du césium 134 dans les sols sont rares car les échantillons ont souvent été prélevés trop tardivement, compte tenu de la courte période radioactive de ce radionucléide (2 ans). Par ailleurs, lorsque ces mesures sont disponibles, elles sont entachées d'une

incertitude métrologique importante bien que peu souvent mentionnée, mais pouvant dépasser 30% de la valeur mesurée, ce qui diminue la fiabilité de leur utilisation à cette fin. C'est pourquoi, la contribution des retombées des essais atmosphériques (R_i) dans les activités de césium 137 mesurées dans les sols français (D_i) sera principalement approchée par la connaissance des dépôts en France consécutifs à ces essais et par la modélisation.

3.1.2 REPRÉSENTATIVITÉ D'UNE MESURE AU REGARD DE L'ACTIVITÉ PRÉSENTE DANS LA PORTION DE SOL PRÉLEVÉE

3.1.2.1 Calcul et représentativité de l'activité surfacique pour rendre compte de l'activité d'un sol

D_i est une activité surfacique exprimée en $Bq.m^{-2}$. Idéalement, il s'agit de l'activité totale contenue dans l'intégralité d'une colonne de sol d'un mètre carré de section. L'activité surfacique est directement calculée à partir de l'activité massique mesurée en laboratoire (A_{mi} en $Bq.kg^{-1}$ de sol), de la profondeur du prélèvement (h_i) et d'une évaluation de la masse volumique du sol en place (ρ_i), de la manière suivante :

$$D_i = A_{mi} \times \rho_i \times h_i$$

La masse volumique du sol en place est établie par le rapport de la masse par le volume prélevé (section multipliée par la profondeur).

Au fil des années, le césium migre vers la profondeur comme l'attestent les profils de répartition verticale (voir figure 4). Lorsque plusieurs mesures de l'activité massique sont effectuées à différentes profondeurs pour rendre compte de ce profil, il est nécessaire d'évaluer les densités respectives des différentes couches de sol dont les activités massiques mesurées sont représentatives. L'activité surfacique totale est alors obtenue par sommation des activités surfaciques des différentes couches (figure 2).

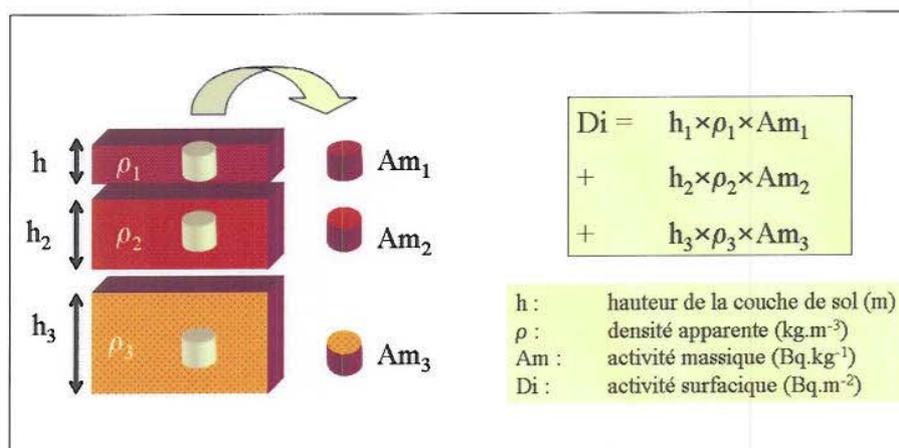


Figure 2 - Calcul de D_i : prise en compte de l'hétérogénéité due à la migration verticale et aux successions de couches de sols de propriétés différentes

Ainsi calculée, l'activité surfacique ($Bq.m^{-2}$) est une expression qui permet effectivement de rendre compte de l'activité présente dans une portion de sol à des fins d'intercomparaison, ce qui n'est pas le cas de l'activité massique. En effet, à activité massique égale, un sol plus dense renfermera une plus grande activité. Autrement

dit, une activité massique de 200 Bq.kg^{-1} mesurée dans un sol forestier d'une masse volumique de 600 kg.m^{-3} , léger car riche en matière organique, équivaut à une activité massique de 60 Bq.kg^{-1} dans un sol argileux et cohésif d'une masse volumique de 1700 kg.m^{-3} . Par ailleurs, l'activité surfacique permet de tenir compte des profondeurs relatives auxquelles les échantillons ont été prélevés.

3.1.2.2 Représentativité au regard de la profondeur échantillonnée

Les mesures effectuées sur des échantillons prélevés jusqu'à 50 cm de profondeur montrent que l'on trouve souvent du césium 137 en quantité mesurable à cette profondeur. Le fait que la plupart des mesures disponibles correspondent à des prélèvements effectués sur 20 cm, voire 10 cm de profondeur, pose le problème de la part de l'activité contenue en deçà et qui n'est pas prise en compte. Suivant le type de sol, notamment sa teneur en certaines argiles, et le délai écoulé depuis les dépôts, l'activité présente dans les vingt premiers centimètres peut représenter de moins de 20% à plus de 80% de l'activité totale initialement déposée sur ces sols par les deux sources identifiées précédemment. Une rétention de moins de 20% de l'apport initial est une valeur probablement extrême pour un sol français, constatée cependant pour des sols de Corse présentant moins de 10% d'argile. Les mesures de D_i effectuées sur de tels sols après 1986 sont à écarter car nous ne savons rien des cinétiques de migration, potentiellement très rapides, du césium. Des proportions de césium dans les 20 premiers centimètres avoisinant 80% du césium total déposé, sont en revanche courantes dans les sols contenant beaucoup d'argiles propices au piégeage de ce radionucléide, notamment ceux de la basse vallée du Rhône dont la teneur en illite peut dépasser 40%.

Les chroniques de mesures acquises par l'IRSN autour des sites nucléaires français et dans le cadre du réseau OPERA (Observatoire permanent de la radioactivité, exploité par l'IRSN) permettent de juger de la représentativité d'une mesure faite sur un prélèvement réalisé sur 20 cm de profondeur et de l'erreur que l'on peut faire sur l'évaluation de D_i correspondant.

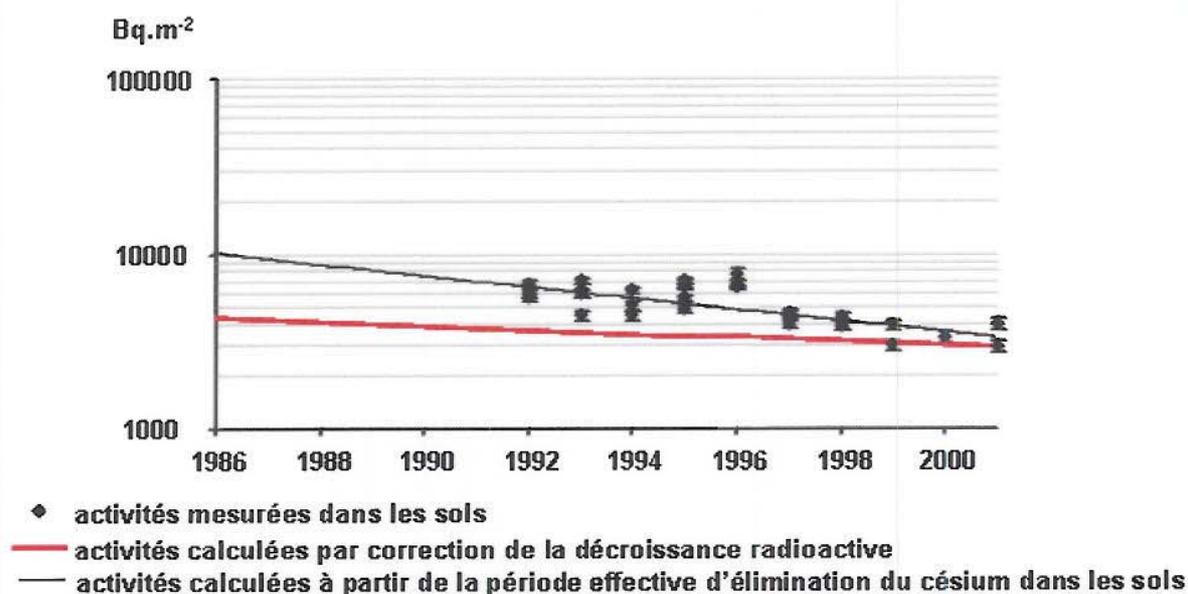


Figure 3 - Évolution de l'activité contenue dans les 20 premiers centimètres d'un sol de Saint-Alban, à partir d'une chronique de mesures entre 1992 et 2001

Ainsi, la figure 3 présente l'évolution des activités mesurées dans des échantillons prélevés autour du CNPE-EDF de Saint-Alban sur une profondeur de 20 cm entre 1992 et 2001. Cette activité décroît régulièrement avec une période effective de 9 ans. L'extrapolation des valeurs mesurées au moyen de cette période de décroissance empirique nous permet d'évaluer à 10000 Bq.m⁻², l'activité théoriquement présente dans cette couche de sol après les dépôts de mai 1986. Si nous n'avions disposé que d'une mesure sur un prélèvement effectué en 2001 sur ce site, ce qui est le cas pour la plupart des valeurs de D_i disponibles, la reconstitution de l'activité de 1986 à partir de la seule décroissance radioactive (période physique de 30 ans) aurait conduit à une sous-estimation d'un facteur 2. Malheureusement, une telle correction n'est possible que sur les quinze sites où les valeurs de D_i sont obtenues à partir de séries de mesures significatives. Il faut cependant noter que sur certains sites comme celui de Tricastin, représentatif des sols argileux de la basse vallée du Rhône, la forte fixation du césium conduit à une période d'élimination effective très proche de la décroissance radioactive (29 ans).

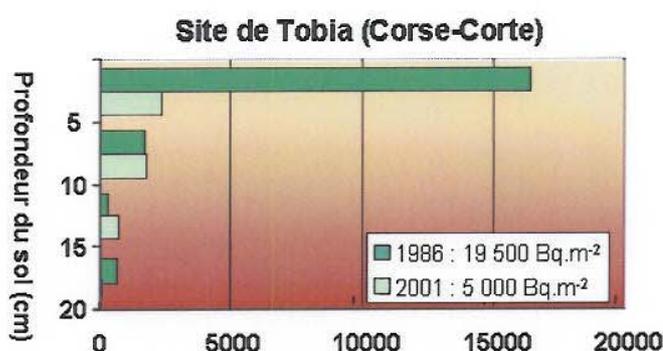


Figure 4 - Comparaison diachronique de l'activité en césium sur la commune de Tobia en Corse

Tobia, à l'est de Corte (Haute Corse), est un des rares sites pour lesquels on dispose d'une mesure effectuée en 1986 et d'une autre plusieurs années plus tard. La figure 4 présente l'activité surfacique des 20 premiers centimètres de ce sol en juin 1986 et en mai 2001, ainsi que la répartition de cette activité en fonction de la profondeur. Cette comparaison montre qu'il ne restait en 2001 que 25% du césium présent en 1986. Notamment la couche la plus superficielle a perdu en 16 ans près de 90% de son activité en césium. Le césium transféré n'a pas enrichi les couches sous-jacentes et, dans l'impossibilité de se fixer à des particules d'argile ou de matière organique, a dû se diluer en profondeur. Par ailleurs, l'activité présente entre 15 et 20 cm de profondeur et potentiellement en deçà, dès le mois de juin 1986, montre que l'infiltration a été très rapide, voire concomitante des dépôts. Ainsi, même dans le cas le plus favorable d'un prélèvement effectué dans un délai très bref après l'accident de Tchernobyl, on ne peut exclure une mauvaise représentativité de cette mesure effectuée sur 20 cm de profondeur. Cette évolution rapide permet de supposer que le césium des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires, déposé avant 1963, a probablement disparu depuis longtemps.

3.1.3 REPRÉSENTATIVITÉ DE L'ACTIVITÉ D'UNE PORTION DE SOL AU REGARD DE LA « MOYENNE » DES SOLS ENVIRONNANTS

Lorsque les aérosols radioactifs ou les gouttes d'eau qui les contiennent entrent en contact avec le sol, ils font l'objet d'une redistribution immédiate à sa surface par ruissellement, liée au couvert végétal, à la topographie locale ou à la rugosité de la surface du sol (cf. § 2.1). Le régime intense d'une pluie peut encore accentuer ce

phénomène. Au cours des années suivantes, le colluvionnement (érosion, transport de sol et accumulation, à l'échelle d'un talus ou d'une parcelle pentue) est également à l'origine d'une redistribution des radionucléides déposés en surface. Les principaux phénomènes en cause sont présentés, qualifiés et quelquefois quantifiés ci-après. Le plus souvent, leurs effets conjugués résultants sont à l'origine de la variabilité constatée sur les activités mesurées.

3.1.3.1 Interception et redistribution par le couvert végétal

Une partie des dépôts radioactifs est interceptée par la végétation se trouvant sur le sol, avec une efficacité plus ou moins importante selon la nature du dépôt (sec ou humide, cf. § 2.1). Il en résulte qu'une mesure de D_i effectuée dans les semaines qui suivent des dépôts conduit à une sous-estimation de l'activité effectivement déposée par non prise en compte de l'activité fixée sur le végétal, sauf si le prélèvement intègre le végétal (sol + herbe). Si l'on prend l'exemple d'un dépôt total moyen de 10000 Bq.m^{-2} qui se serait réalisé à 80% par temps de pluie (20% par temps sec), la fraction retenue par un végétal herbacé serait de l'ordre de 30% du dépôt total.

À l'exception des données provenant de la zone atelier des environs de Vaison-la-Romaine, pour lesquels les prélèvements ont été effectués sur un sol nu, non labouré entre des ceps existant déjà en mai 1986, la quasi-totalité des données D_i ont été mesurées sur des surfaces ayant très probablement supporté une végétation au moment des dépôts. Il peut s'agir de cultures comme pour les mesures autour des sites électronucléaires, d'herbe (sites électronucléaires, stations de référence du SCPRI, sols du Jura, du Haut Var) ou d'une végétation arborescente, bois ou vergers. Il est possible que cette occupation du sol ait par ailleurs changé depuis lors. Il est difficile d'envisager une correction à apporter aux activités mesurées pour prendre en compte cette perte, qui devrait être inférieure à 30%.

Par ailleurs, le phénomène d'égouttage des végétaux entraîne une hétérogénéité localisée des dépôts. Ce phénomène est particulièrement significatif pour les arbres et il a été mis en évidence et étudié par l'IRSN et la CRII-RAD. Dans le Mercantour, des activités du sol jusqu'à 50 fois supérieures ont été mesurées sur de petites surfaces (quelques décimètres carrés) au pied de conifères (ruissellement le long du tronc) et en corolle à l'extrémité des branches. De telles mesures ont évidemment été écartées pour cette étude.

3.1.3.2 Effet impluvium et reconcentration des dépôts neigeux

L'effet « impluvium », collecteur puis concentrateur d'eau de pluie sur des surfaces restreintes, a également été mis en évidence, en particulier en Corse au pied de grands plans inclinés granitiques de plusieurs dizaines de mètres carrés. Il s'agit de cas extrêmes pour lesquels les données obtenues ont été écartées de cette étude. Des impluviums de taille plus modeste, simples rochers, peuvent également donner lieu à des concentrations radioactives. Normalement, l'expert réalisant un prélèvement connaît bien ces phénomènes et il est extrêmement peu probable que, parmi les D_i retenus, certains soient dans ce cas. De plus, l'effet concentrateur (facteur 3 à 10) est tel que la valeur mesurée attire rapidement l'attention.

Les dépôts neigeux, très hétérogènes à l'échelle de quelques mètres (effet de congères), et le phénomène de fonte au printemps (névé), concentrant les polluants atmosphériques sur de petites surfaces (quelques décimètres carrés), sont à l'origine des « taches de re-concentration » d'activités élevées, supérieures à $100\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$ caractérisées par l'IRSN (facteur de concentration compris entre 10 et 100). Les valeurs de D_i retenues pour la

présente étude ont été prélevées à moins de 1000 mètres d'altitude et ne peuvent donc pas avoir été concernées par ce phénomène.

3.1.3.3 Redistribution postérieure aux dépôts : colluvionnement

L'étude de l'activité rémanente du ^{137}Cs dans les sols menée par l'IPSN en 1999-2000 dans la région de Vaison-la-Romaine a montré que, 15 ans après les dépôts consécutifs à l'accident de Tchernobyl, lorsque plusieurs échantillons sont prélevés dans un rayon de quelques dizaines de mètres, les sols présentant les activités les plus élevées sont les plus plats, c'est-à-dire ceux qui n'ont pas été propices à un ruissellement important concomitant des dépôts pluvieux, et qui n'ont pas été érodés depuis. Ceci a été mis en évidence sur des sols nus de vignobles pentus, sur lesquels il existe une croûte de battance favorisant le ruissellement et qui sont par ailleurs très sensibles à l'érosion comme en témoignent les photos de la figure 5.



Figure 5 - Déchaussement (à gauche) d'un cep de vigne sur la partie haute d'un vignoble et enterrement (à droite) d'un cep sur la partie basse, résultant de moins de quatre ans d'érosion du sol (tous les trois à quatre ans le viticulteur remonte la terre avec un tractopelle), pour une pente de moins de 10%

Ce phénomène, extrêmement complexe car dépendant de nombreux facteurs, (pente, couverture végétale et utilisation du sol, état de surface, granulométrie) sont en cours d'étude à l'IRSN. Il est cependant peu probable que ces résultats puissent être facilement généralisables pour apporter un facteur correctif à des données déjà acquises.

De manière générale, le colluvionnement, transfert local de matière par érosion, ne peut pas conduire à une augmentation de l'activité massique sur les zones d'accumulation. En revanche, il peut conduire à une diminution de cette activité sur les zones érodées par enlèvement de la couche superficielle présentant les activités massiques les plus élevées (figure 6).

Les pertes par migration horizontale constituent une des deux principales sources de variabilité de l'activité des sols à l'échelle locale (quelques dizaines à quelques centaines de mètres). Pour cette étude, si une mesure se démarque significativement d'autres réalisées dans son voisinage, il convient de la retirer du jeu de données.

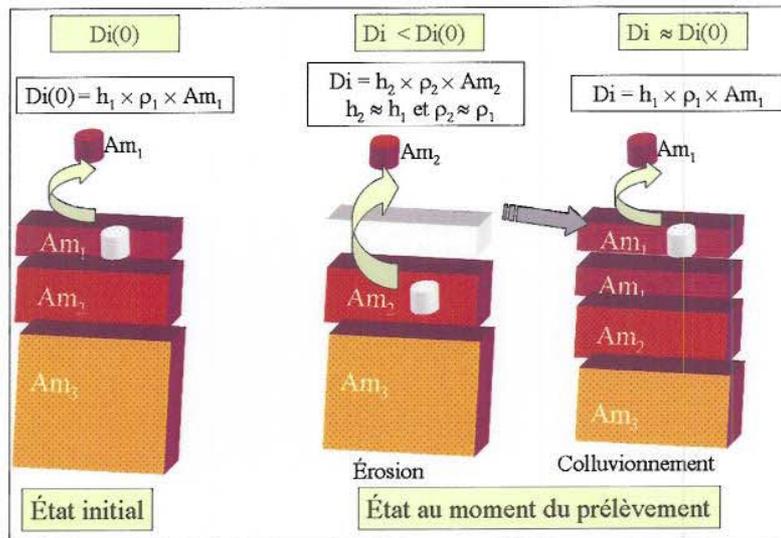


Figure 6 - Hétérogénéité due au phénomène d'érosion-colluvionnement

3.1.3.4 Variabilité de l'activité des sols à l'échelle métrique et d'un site

Des expériences ont été faites sur certains sites pour tester la représentativité d'une mesure unique vis-à-vis de cette variabilité. L'approche globale *in-situ* utilisée conduit en fait à rendre compte de deux notions différentes :

- l'incertitude liée à l'obtention de la mesure elle-même, au travers du prélèvement, du traitement de l'échantillon puis du mesurage de l'activité (l'incertitude sur le mesurage est toujours quantifiable et est de l'ordre de quelques pour-cents) ;
- la variabilité effective de l'activité des sols résultant des phénomènes décrits dans les paragraphes précédents. Cette variabilité peut s'observer à l'échelle métrique. Ainsi, dans la région de Vaison-la-Romaine, 10 prélèvements sur 20 cm de profondeur ont été faits sur une surface de 10 mètres carrés incluant deux rangs de vignes. Les activités mesurées étaient normalement distribuées avec un écart de 60% entre la valeur la plus élevée (44 000 Bq.m⁻²) et la plus faible (27 800 Bq.m⁻²). La moyenne des dix activités mesurées correspondait bien à la l'activité d'un échantillon composite réalisé par quartage à partir des dix prélèvements. Les conditions dans lesquelles se sont effectués les dépôts en mai 1986 sont probablement à l'origine de cette variabilité, les dépôts pluvio-orageux ayant entraîné un ruissellement local lié à la rugosité de la surface des sols de vigne et à la présence des ceps.

Pour diminuer les conséquences de cette variabilité sur la représentativité d'une mesure, les échantillons mesurés par l'IRSN se composent de 3 à 10 prélèvements distants de quelques décimètres à quelques mètres suivant la configuration du lieu.

À plus grande échelle, de l'ordre de la centaine de mètres, cette variabilité peut encore être plus forte. Ainsi, sur une prairie pentue (de l'ordre de 5% de pente) du Jura, 14 prélèvements ont été effectués sur deux rangs d'une centaine de mètres de longueur et distants de 6 mètres. Les résultats montrent une variabilité extrêmement importante : la valeur maximale mesurée est trois fois plus élevée que la plus faible. Les mesures de densité des échantillons prélevés ainsi que les activités des radionucléides naturels présents dans ces échantillons fluctuant peu, cette variabilité particulière aux activités massiques de

césium 137 ne peut être expliquée par les conditions de prélèvement, de traitement ou de métrologie. De plus, ces variations ne peuvent pas être corrélées à la position du prélèvement sur la pente et restent actuellement inexpliquée.

Enfin, à l'échelle supérieure, quatre mesures ont été effectuées en 2001 sur des échantillons prélevés sur des terrains parfaitement plats dans un rayon de 500 m, de natures différentes, mais non remaniés depuis l'accident de Tchernobyl : une friche, une parcelle de vigne, un bosquet et un ancien verger dont les arbres à l'abandon sont encore en place (figure 7).

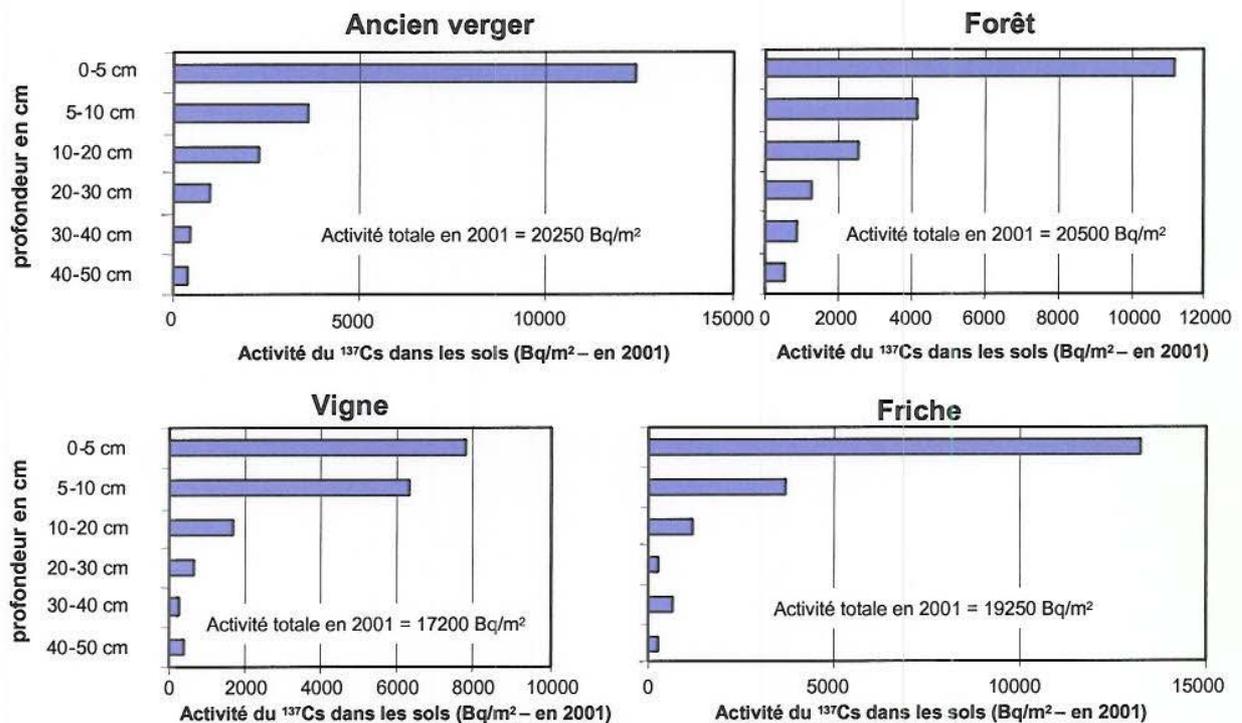


Figure 7 - Variabilité des activités surfaciques du ^{137}Cs dans les sols (valeurs en 2001), en fonction de leur utilisation. En tenant compte uniquement de la décroissance radioactive du ^{137}Cs , les activités totales correspondant à 1986 (D_0 de la relation 3) sont respectivement de 28590 Bq/m² pour le sol de l'ancien verger, 28980 Bq/m² pour le sol de forêt, 24250 Bq/m² pour le sol de vigne et 27210 Bq/m² pour le sol de la friche.

Les résultats sont relativement proches au regard de la variabilité métrique ou décimétrique constatée précédemment. Les profils de contamination confirment le caractère non remanié des sols de la friche, de la forêt et de l'ancien verger. On constate également une homogénéisation des deux horizons superficiels du sol de vigne, témoignant d'un grattage régulier du sol destiné à casser la croûte de battance.

3.1.4 REPRÉSENTATIVITÉ DE L'ACTIVITÉ « MOYENNE » DES SOLS D'UN SITE AU REGARD DES DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES

Les données acquises dans la basse vallée du Rhône montrent que la variabilité à l'échelle communale des activités surfaciques observées est plus importante pour les activités les plus élevées correspondant aux dépôts pluvieux post-Tchernobyl les plus forts. Ainsi, en Camargue où les précipitations cumulées ont été souvent inférieures à 2 mm, les rapports entre les valeurs les plus élevées et les plus faibles mesurées sur une commune ne dépassent pas 30%. Cette homogénéité globale s'explique d'une part par l'homogénéité de la rémanence des

retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires qui peuvent représenter sur cette zone la moitié des activités mesurées, et d'autre part par l'importante contribution des dépôts secs de mai 1986, beaucoup plus homogènes que les dépôts pluvieux. Les rapports entre les activités les plus élevées et les plus faibles mesurées sur une commune atteignent 60% pour des niveaux de précipitations de l'ordre de 10 mm. Pour des hauteurs de pluies cumulées supérieures à 20 mm, ils dépassent couramment 80%. Les échantillons sur ces communes étant constitués de plusieurs prélèvements, réduisant ainsi la variabilité métrique constatée à ces niveaux de pluie, trois causes principales peuvent être avancées pour expliquer cette variabilité à l'échelle communale : l'hétérogénéité des précipitations, le ruissellement lors des dépôts en mai 1986, et la migration horizontale de l'activité liée à des remaniements de sol, naturels ou anthropiques, depuis 1986. Notamment, le cas, heureusement unique, des quatre mesures obtenues sur la commune de Mollans-sur-Ouvèze (26 mm de précipitations), où les activités vont de 5000 à 25000 Bq.m², ne peut s'expliquer que par de telles perturbations.

La figure 8 permet de localiser les stations de Météo-France de Vaison-la-Romaine (51 mm de pluies cumulées), Mirabel (52 mm), Vinsobres (55 mm) et Nyons (31 mm). Les stations de Mirabel-aux-Baronnies et de Vaison-la-Romaine sont éloignées de plus de 7 kilomètres. Malgré cette distance, les échantillons prélevés sur ces deux communes ayant reçu des précipitations très proches (51 et 52 mm) présentent des gammes d'activités et des moyennes voisines. En revanche, bien que les stations de Mirabel et Vinsobres soient à moins de 3 km l'une de l'autre, la gamme d'activités et la moyenne à Vinsobres qui a reçu 55 mm sont supérieures à celles de Mirabel. Enfin, les activités prélevées au voisinage de la station de Nyons, à une distance comprise entre 2 et 4 km de la stations de Mirabel, témoignent bien des pluies significativement plus faibles enregistrées à la station 31 mm. Au-delà de l'approche mathématique de la corrélation « pluie-dépôt », il apparaît que même pour de très hauts niveaux de précipitation ayant entraîné une forte variabilité des activités mesurées, celles-ci rendent bien compte de la répartition spatiale des pluies qui les ont générées.

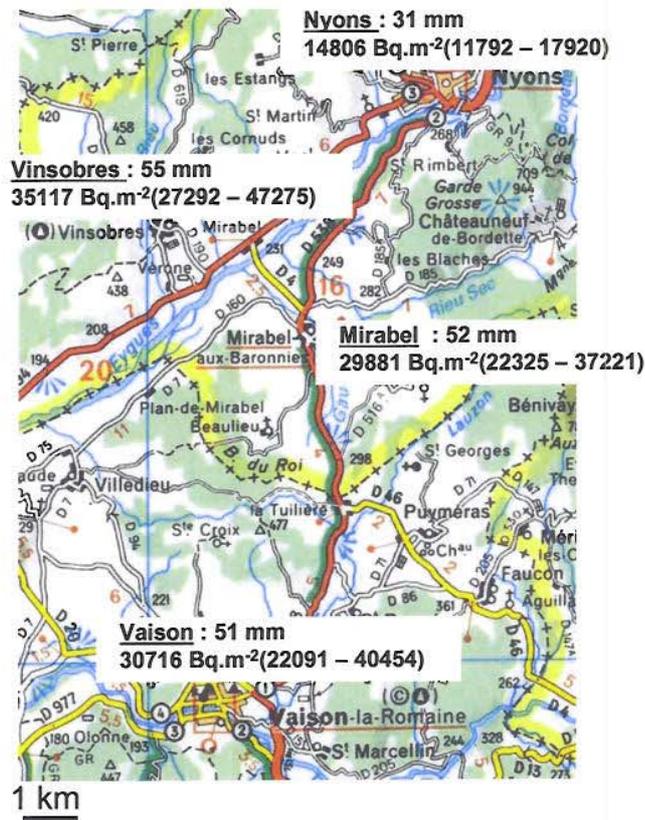


Figure 8 - Localisation des stations de Vaison-la-Romaine, Mirabel-aux baronnies, Vinsobres et Nyons, hauteurs de précipitations cumulées (1^{er}-5 mai 1986), moyenne et gamme des activités mesurées (valeurs rapportées à mai 1986)

3.1.5 ORIGINE ET QUALITÉS DES DONNÉES DISPONIBLES

Les données de D_i collationnées pour cette étude ont pour origine l'IPSN, le SCPRI, la CRII-RAD et l'IRSN. Elles ont été acquises dans différents cadres avec souvent des objectifs tout autres que l'étude des retombées de l'accident de Tchernobyl. Elles ont en commun d'être basées sur des mesurages en laboratoire, par spectrométrie gamma, des activités présentes dans des échantillons prélevés dans l'environnement, traités et conditionnés suivant des protocoles connus. En particulier, toutes les mesures effectuées au moyen d'appareils de terrain portables ont été écartées en raison de leur faible fiabilité. Il n'existe pas de jeu de données idéal. Chacun présente des avantages et des défauts au regard de l'objectif de la présente étude ; ils sont signalés ci-après. Les adaptations qui en ont été faites dans le cadre de cette étude sont également précisées. Ces jeux de données sont présentés depuis les plus anciennement acquis, dès 1986, jusqu'aux plus récentes études de 2004.

3.1.5.1 Les données provenant des stations de référence du SCPRI

Le SCPRI puis l'OPRI ont effectué depuis 1961 des mesures de césium 137 et strontium 90 dans des échantillons de sols prélevés avec une fréquence de 2 à 4 par an sur plusieurs stations réparties sur le territoire ; cette chronique est poursuivie aujourd'hui par l'IRSN. Neuf d'entre elles existaient en 1986. L'inconvénient de ces mesures est que le prélèvement, et notamment la profondeur de prélèvement, n'est pas maîtrisé. La consigne donnée aux personnes extérieures au SCPRI était de prélever sur une profondeur de 10 cm, mais il n'est pas possible de garantir l'application stricte de cette consigne. De plus, les informations permettant de reconstituer les activités

surfaiques à partir des activités massiques mesurées, notamment les volumes prélevés, ne sont pas connues. Les évaluations des activités surfaiques n'ont donc qu'une fiabilité relative. Dans l'absolu, une imprécision supérieure à un facteur 2 n'est pas à exclure. L'avantage de ces données est que l'on dispose des activités présentes juste avant les dépôts de 1986 (en 1984, 1985 et jusqu'au début de 1986) et juste après (1986 et 1987), sur une profondeur de sol que l'on peut espérer cohérente. Cette particularité (il s'agit du seul jeu de données présentant cette qualité) permet de distinguer l'apport des retombées de l'accident de Tchernobyl en s'affranchissant d'une partie des problèmes de représentativité énoncés précédemment aussi bien sur le paramètre D_i que sur le paramètre R_i .

3.1.5.2 Les données sur le bassin versant du Haut-Var

Dans les semaines suivant l'accident de Tchernobyl, des études ont été menées par l'IPSN dans trois bassins versants ayant reçu des précipitations relativement élevées en mai 1986 : Maubert *et al* (1988) dans le bassin du Haut-Var, Caput *et al* (1988) dans le bassin de la Moselle, Otavi *et al* (1988) dans le bassin du Tavignano en Corse. L'étude sur le Haut-Var est la plus complète et la plus aboutie, avec la recherche de corrélation entre les dépôts et l'altitude, le suivi de ces dépôts dans l'année suivante, des mesures dans différents compartiments de l'environnement et notamment de la chaîne alimentaire et une modélisation empirique des transferts entre ces différents compartiments. L'étude menée en Corse n'a fourni que deux mesures d'activités des sols mais qui ont été précieuses pour juger des pertes importantes en césium 137 des sols de l'île (cf. chapitre 3.1.2.2) et donc du manque de représentativité des mesures effectuées en 2001.

14 mesures d'activités surfaiques acquises en 1986 dans le haut bassin du Var constituent un jeu de données potentiellement utilisables dans le cadre de cette étude. Bien que les conditions de leur obtention aient été parfaitement maîtrisées, du prélèvement à la métrologie, ces données présentent de nombreux inconvénients, liés au fait que les études n'avaient pas pour objectifs de reconstituer les dépôts, mais de relier des dépôts mesurés localement aux activités présentes dans d'autres compartiments de l'environnement : herbe, laits, légumes.

Il s'agit de prélèvements isolés, effectués dans une zone montagneuse, sur des sites quelquefois très éloignés et à des altitudes très différentes des stations de Météo-France. Il en résulte une très faible représentativité des activités mesurées au regard des dépôts moyens sur ces sites, ainsi que des hauteurs de précipitations qui les ont engendrés (cf. chapitre 3.4.2). Enfin ces mesures ont été acquises sur des échantillons prélevés sur 5 à 10 cm de profondeur sur laquelle la rémanence des retombées des essais atmosphériques, probablement très faible, est difficile à estimer. Ces mesures fournissent une indication des niveaux d'activités déposés mais ne peuvent être utilisées dans cette étude, sauf à des fins de comparaison.

3.1.5.3 Les données acquises par l'IPSN autour des sites électronucléaires français

Depuis 1991, l'IPSN a effectué à la demande d'EDF, un suivi radioécologique de l'environnement des Centres Nucléaires de Production Électrique (C.N.P.E) que l'IRSN poursuit aujourd'hui. Dans le cadre de ce suivi, une à quatre mesures d'activité d'échantillons de sols sont effectuées sur chaque site chaque année. Il s'agit le plus souvent de sols cultivés, prélevés sur une profondeur de 15 à 20 cm dans un rayon de 10 km autour des C.N.P.E., et pour lesquels on peut montrer que les apports de césium 137 liés à l'industrie sont négligeables. Toutes les opérations nécessaires à l'acquisition de ces données sont maîtrisées et font l'objet de procédures assurant leur qualité, jusqu'à la métrologie accréditée COFRAC. Les activités massiques et les évaluations d'activités

surfaciennes qui en sont déduites ont donc un degré de fiabilité très élevé. Ces données sont également très satisfaisantes du point de vue de la représentativité de l'échantillon par rapport à l'activité effectivement présente dans la portion de sol, et surtout du point de vue de la représentativité de l'activité présente au moment du prélèvement par rapport à celle présente en 1986. Les chroniques faites sur plusieurs années permettent en effet de prendre en compte la diminution effective de cette activité au fil des années, dans la couche de sol considérée (cf. paragraphe 3.1.2.2 et rapport DEI 04-02).

Pour ces valeurs de D_i , il reste la question de la contribution de la rémanence des essais nucléaires aux activités mesurées. La connaissance des périodes effectives de disparition du césium dans les 20 premiers centimètres fournit également une approximation assez satisfaisante pour répondre à cette question. En effet, il n'y a pas de raison pour que le césium 137 des retombées des essais atmosphériques, déposé essentiellement entre 1954 et 1963, ait eu un devenir dans les sols très différent de celui déposé en mai 1986. Par ailleurs, ces périodes effectives rendent compte de la disparition globale du césium des deux origines. En supposant que toutes les retombées des essais aient eu lieu en 1963 et en appliquant sur chaque site la période effective déduite des chroniques, il est possible d'en déduire leur rémanence en 1986 dans les 20 centimètres échantillonnés. Dans le cas des périodes effectives les plus courtes, de 6 à 8 ans (sites de Chinon, Creys, Cruas, Saint-Laurent), il ne serait resté que 10 à 15 % des activités déposées. Pour les périodes les plus longues, de 10 à 20 ans, la rémanence dans cette portion de sol serait de 30 à 50%.

3.1.5.4 Les données acquises par l'IPSN dans la basse vallée du Rhône

Entre 1993 et 1995, l'IPSN a effectué des bilans radioécologiques autour de l'installation de Marcoule à la demande de la COGEMA (Lumia et Descamps, 1995 ; Descamps et Lumia, 1996 ; Descamps, 1997). Il s'agissait d'identifier un éventuel marquage de l'environnement du site par les rejets de ses installations. Cette demande de la COGEMA faisait suite à une étude réalisée en 1991 par la CRII-RAD et commandée par la municipalité d'Avignon. Dans ce cadre, 47 mesurages de ^{137}Cs ont été réalisés sur une trentaine d'échantillons de sols, principalement cultivés, prélevés sur 15 à 20 cm de profondeur en 24 stations situées entre Pont-St-Esprit (Drôme) et Albaron (Gard). L'IPSN comme la CRII-RAD avaient conclu que les retombées de l'accident de Tchernobyl masquaient complètement, pour le césium 137, un éventuel marquage de l'environnement, dans tous les cas très faible, par les rejets atmosphériques de l'installation. Pour ces données, comme pour celles réalisées en Camargue dans d'autres cadres par l'IPSN, nous disposons de la profondeur mais pas des volumes prélevés. Il en résulte une méconnaissance de la densité des sols qui permet d'estimer les activités surfaciennes à partir des activités massiques mesurées. Cette lacune est compensée par le fait que sur des sols similaires, voire sur les mêmes sites de prélèvement, la CRII-RAD a évalué les densités apparentes des sols par tranches de 5 cm. Par ailleurs, lors de prélèvements effectués en 1998-2000 par l'IPSN pour des mesurages de plutonium, les densités ont été calculées pour ces mêmes sites. Sur ces bases, c'est une masse volumique moyenne de 1400 kg m^{-3} qui a été affectée pour l'évaluation des D_i correspondants. Cette valeur est très représentative des sols cultivés de cette région ; elle est peut être faible pour des sols de vergers susceptibles d'atteindre 1700 kg m^{-3} , entraînant ainsi une possible sous-estimation des activités surfaciennes n'excédant pas 25 %.

Les données CRII-RAD permettent également de connaître grossièrement la proportion de l'activité de césium 137 située en deçà des 20 cm prélevés : entre 5 % et 20 % et en moyenne de 10%. Cette fraction a été ajoutée à l'activité mesurée de manière à mieux rendre compte de l'activité surfacique totale de la portion de sol.

Ces données sont à la base d'une première relation « pluie-dépôt » établie en 1998 pour des niveaux de précipitations cumulées du 1^{er} au 5 mai 1986 allant sur cette zone de 0,3 à 24 mm.

Afin de prolonger cette étude et de vérifier la pertinence de la relation obtenue pour des niveaux de précipitations supérieurs, une étude spécifique a été menée par l'IPSN dans les environs de Vaison-la-Romaine en 1999 et 2000, sur une zone située au nord-est de la précédente et ayant reçu des précipitations allant de 21 à 55 mm. 55 mm étant la valeur la plus élevée enregistrée en France si l'on excepte la Corse, cette étude permettait de couvrir, sur une aire allant de la Camargue à Vaison et donc suffisamment petite pour que les concentrations en césium de l'air aient été homogènes, toute la gamme des précipitations cumulées en France continentale durant les 5 premiers jours de mai 1986.

Pour cette étude, les échantillons de sols ont été prélevés dans un rayon de quelques dizaines à quelques centaines de mètres autour des stations de Météo-France, afin de réduire les incertitudes inhérentes à l'interpolation des hauteurs de pluies, très hétérogènes pour ces niveaux de précipitations. Les prélèvements ont été faits à une profondeur de 20 cm, principalement sur des vignobles de plus de 20 ans d'âge garantissant l'absence de remaniements du sol depuis l'accident de Tchernobyl. Des prélèvements supplémentaires ont été réalisés sur 50 cm de profondeur afin de connaître le profil de contamination et de déterminer la représentativité de la couche échantillonnée. Les résultats ont confirmé que sur ces sols très argileux, en moyenne 90% du césium se trouve dans les 20 premiers centimètres échantillonnés. Comme pour le jeu de données précédent, 10% des activités surfaciques mesurées ont été ajoutés de manière à rendre compte de l'activité totale contenue dans la portion de sol.

Malgré le soin apporté à la recherche de surfaces planes, certaines activités mesurées témoignent d'un appauvrissement en césium à mettre en relation avec le ruissellement lors des dépôts pluvieux et du colluvionnement du sol (cf. chapitre 3.1.3.3). Comme toutes celles acquises plusieurs années après les dépôts, les activités mesurées dans la basse vallée du Rhône posent le problème de leur représentativité par rapport aux dépôts de mai 1986 et de la rémanence des essais nucléaires, eu égard aux pertes en césium 137. Compte tenu de la nature du sol et de la prise en compte des profils de contamination, il est probable que la sous-estimation des activités surfaciques de mai 1986, reconstituée par simple correction de la décroissance radioactive soient inférieure au facteur 2 correspondant au cas de Saint-Alban, fourni comme exemple au chapitre 3.1.2.2.

3.1.5.5 Les données acquises par l'IPSN en Corse

En 2001, trois campagnes de prélèvements de sols ont été effectuées en Corse à la demande de la Direction Régionale de la Santé. L'un des objectifs pour l'IPSN était d'étudier les dépôts consécutifs aux hauteurs de pluies les plus importantes enregistrées durant la première semaine de mai 1986. En effet, dans les environs de Solenzara des valeurs dépassant 40 mm et atteignant 160 mm ont été mesurées par Météo-France sur une dizaine de stations. Il s'agissait de vérifier si la relation « pluie-dépôt » obtenue sur la gamme de précipitations observées dans l'est de la France continentale, soit entre 0,2 et 55 mm, était valide pour des précipitations supérieures. La figure 9 montre que dans cette zone les activités de ¹³⁷Cs dans les sols sont encore aujourd'hui élevées, mais ne correspondent pas aux activités attendues à ces niveaux de précipitations.

En effet, au nord de Solenzara, les activités mesurées dans les sols en 2001 vont de 5000 à plus de 25000 Bq.m⁻² (cf. figure 9), soit de 7000 à plus de 35000 Bq.m⁻² en 1986 après correction de la décroissance radioactive. Ces

activités, bien que parmi les plus élevées de France, ne sont pas cohérentes avec les activités théoriques résultant de l'application stricte de la relation « pluie-dépôt » pour des hauteurs de pluies dépassant 100 mm et atteignant 160 mm : 50 000 à 90 000 Bq.m⁻², soit trois fois plus que les activités des sols 15 ans après l'accident. Trois explications peuvent être avancées. D'une part, nous avons pu montrer que sur les deux sols qui ont fait l'objet de prélèvements en 1986, les pertes de ¹³⁷Cs atteignaient 75% en 2001 en relation avec le faible taux d'argile (cf. chapitre 3.1.2.2.). D'autre part, il est possible que pour des hauteurs de précipitations aussi élevées, la relation « pluie-dépôt » s'infléchisse en relation avec un lessivage et donc un appauvrissement des masses d'air en césium 137. Enfin, pour de très fortes précipitations, la part du flux déposé exportée immédiatement par ruissellement et drainage vers les cours d'eau peut devenir importante, et réduire d'autant l'activité surfacique rémanente des sols. Ces 3 phénomènes sont complémentaires les uns des autres et jouent dans le même sens. Face à l'impossibilité d'apporter un quelconque facteur correctif, les activités massiques mesurées en 2001 ne peuvent être utilisées dans le cadre de la présente étude.

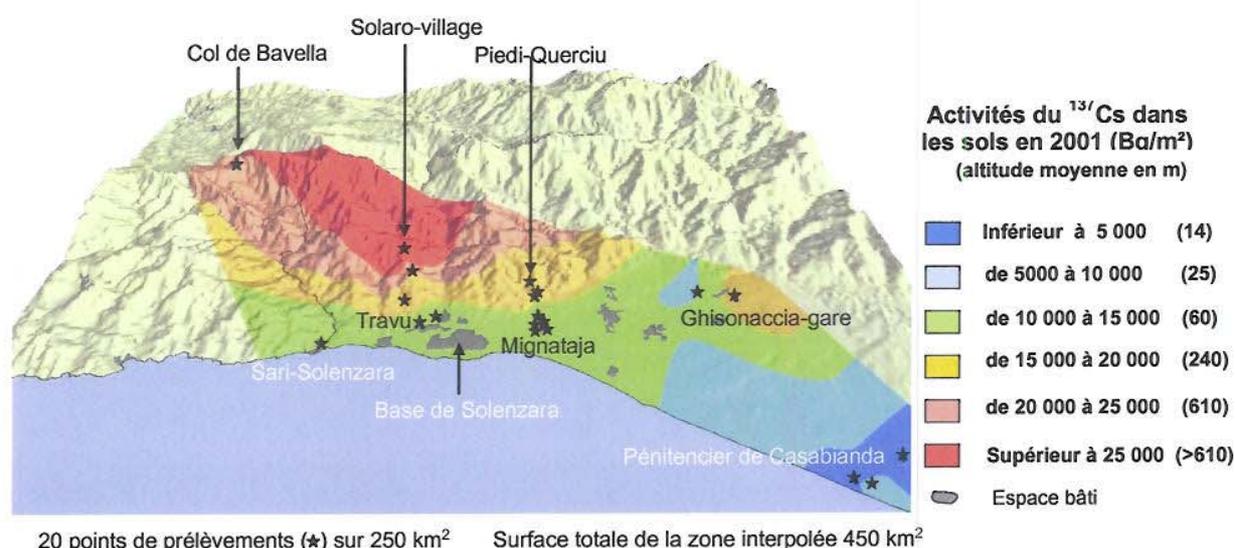


Figure 9 - Cartographie de l'activité surfacique du ¹³⁷Cs dans les sols des environs de Solenzara sur la côte orientale corse (mesures 2001)

3.1.5.6 Les données acquises par l'IRSN dans le Puy de Dôme, le Jura, le sud-ouest de la France et sur la Montagne Noire

Les données de ce paragraphe proviennent d'études en cours de réalisation dans le cadre de zones ateliers mises en place par l'IRSN pour étudier les retombées radioactives et leur devenir dans le Jura, dans la zone OPERA Centre (Puy de Dôme), dans le sud-ouest de la France et sur la Montagne Noire. La stratégie d'échantillonnage des sols s'appuie sur les précipitations cumulées lors de la première semaine de mai 1986 (étude des retombées de Tchernobyl) ou sur les précipitations moyennes annuelles (études des retombées des tirs). Sur ces différentes zones, les précipitations début mai 1986 varient entre 51 mm dans le Jura et des précipitations nulles en certains points de la Montagne Noire. Ainsi, le césium 137 présent dans les sols de la Montagne Noire est presque exclusivement lié à la rémanence des retombées des tirs R_i (cf. chap. 3.2). Dans le sud-ouest de la France et le Puy de Dôme, les précipitations maximales mesurées pendant la même période sont de 26 et 7 mm, respectivement. L'acquisition des activités surfaciques sur ces zones, bien que très tardive (2002-2004), représente un aboutissement méthodologique dans la stratégie de prélèvement des sols (choix du site, nombre

d'échantillons/site, profondeur de prélèvement), dans le traitement et la mesure des échantillons, ainsi que dans le calcul de l'activité surfacique. Ainsi, les échantillonnages sont toujours réalisés à proximité des stations de Météo-France, pour des profondeurs de sol qui dépassent 30 cm et jusqu'à 50 cm.

À l'heure actuelle, des études IRSN les plus abouties, dans le Jura et le Puy de Dôme, 30 valeurs de D_i sont exploitables. Ainsi, les sols de Clairvaux les Lacs (39) font partie des sols les plus marqués par les retombées de l'accident de Tchernobyl ($D_i > 30\,000 \text{ Bq m}^{-2}$). Sur cette zone, si la contribution des retombées de l'accident est évidente au regard de ces fortes activités et des fortes précipitations de mai 1986, l'importante contribution des retombées des tirs (R_i) au regard des fortes précipitations moyennes annuelles sur le Massif du Jura ($> 1500 \text{ mm/an}$) n'est pas accessible par la mesure.

3.1.5.7 Les données acquises par l'IPSN dans le cadre d'expertises ponctuelles

Des données de D_i ont été acquises par l'IPSN dans d'autres cadres. En 2000 et 2002, deux expertises des retombées de l'accident de Tchernobyl ont été demandées à l'IPSN par les municipalités des communes de Sisteron et de La Roche de Glun, en réaction à des communiqués de presse de la CRII-RAD stigmatisant les activités de ^{137}Cs présentes dans leurs sols. Le site du Castellard, à quelques kilomètres à l'Est de Sisteron, qui a reçu les précipitations les plus importantes de la région (51 mm) a également fait l'objet de 2 échantillons. Les valeurs de D_i ainsi acquises ont bénéficié des améliorations méthodologiques évoquées dans le paragraphe précédent. Elles sont tout à fait adaptées à l'objectif de la présente étude.

3.1.5.8 Les données acquises par la CRII-RAD

En 1991, la CRII-RAD a réalisé, à la demande de la municipalité d'Avignon, une étude sur la radioactivité artificielle dans les sols au voisinage du site de Marcoule. Il s'agissait de mettre en évidence un éventuel marquage des sols par les installations de ce site. Dix prélèvements de sols ont été effectués dans ce cadre, chacun sur des communes différentes, sur une profondeur de 40 à 50 cm. Les activités massiques en césium 137 et 134 ont été mesurées par couches de 5 à 10 cm d'épaisseur dans des conditions tout à fait satisfaisantes pour évaluer les densités apparentes et donc les activités surfaciques. Ces mesures apportent des informations précieuses sur la répartition du césium avec la profondeur, utilisées après recoupement avec d'autres données, pour améliorer la représentativité des autres mesures effectuées sur ces mêmes sols sur seulement 20 cm (cf. données acquises par l'IPSN sur la basse vallée du Rhône). Une des conclusions tirées par la CRII-RAD de cette étude est que les retombées de l'accident de Tchernobyl masquaient complètement pour le césium 137 un éventuel marquage des sols par les rejets atmosphériques de Marcoule. En revanche, la tentative de la CRII-RAD de mettre en relation les activités surfaciques mesurées avec les pluies enregistrées sur les stations avoisinantes n'a pas été conclusive pour deux raisons : la forte hétérogénéité des pluies (passant de moins de 10 à 24 mm en quelques kilomètres) et la faible représentativité d'une mesure isolée par rapport à un site. Ainsi, l'échantillon prélevé par la CRII-RAD sur la commune de Codolet témoignait d'un dépôt de $12\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$ en 1986. Les six mesures effectuées par l'IPSN sur cette même commune allaient de 16000 à 21000 pour une moyenne de $17\,600 \text{ Bq.m}^{-2}$. La mesure unique de la CRII-RAD n'était donc pas représentative des activités moyennes présentes dans les sols du site. Pour ces raisons et malgré leur qualité, ces données ne peuvent être utilisées, sauf en complément de mesures acquises par l'IPSN sur les mêmes sites.

Les 53 données de D_i acquises par la CRII-RAD en Alsace en 1990 ont été obtenues avec des protocoles de prélèvement, traitement et mesurage des échantillons similaires à ceux utilisés par cette association pour les données de la basse vallée du Rhône. La stratégie d'échantillonnage de la CRII-RAD s'est appuyée sur les précipitations lors de la première semaine de mai 1986. Le choix du site de prélèvement obéit à des critères importants comme la topographie, le couvert végétal et l'absence de remaniements des sols. Trois carottages de sols sont réalisés sur chaque site, à quarante centimètres de profondeur. La CRII-RAD a utilisé la densité des sols pour calculer des activités surfaciques représentatives du dépôt.

Les données de la CRII-RAD ayant été acquises 5 ans seulement après l'accident, les mesures de ^{134}Cs permettent d'estimer sur chaque site la valeur de R_i (cf. chapitre 3.2.2.2).

3.1.6 CONCLUSION SUR LES JEUX DE DONNÉES UTILISABLES POUR CETTE ÉTUDE

237 valeurs de l'activité surfaciques des sols après les dépôts de 1986 (D_i), acquises pour des raisons et dans des conditions très variables, ont ainsi été collectées pour cette étude. Ce nombre n'inclut pas la centaine de données acquises en Corse par l'IPSN en 2001. La figure 10 présente la répartition des sites correspondant à cet ensemble de données.

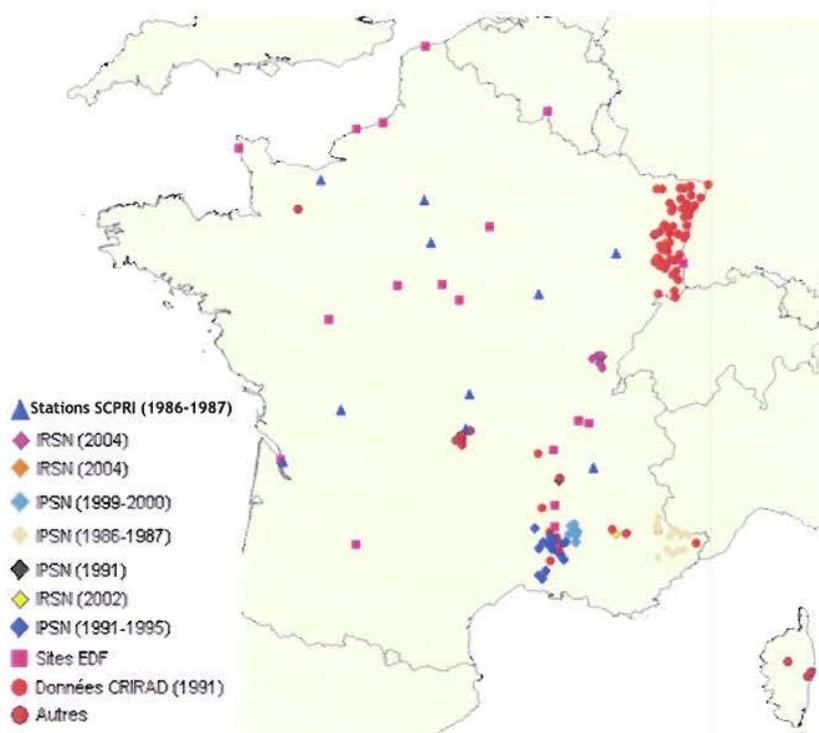


Figure 10 - Répartition par origine des données D_i inventoriées pour cette étude. Une centaine de données acquises en Corse par l'IPSN en 2001 n'ont pas été reprises en raison de leur manque de représentativité dans le cadre de cette étude.

Au terme de l'analyse précédente, il apparaît clairement que les incertitudes sur la représentativité des activités mesurées et la variabilité observée de l'activité des sols, quelle que soit l'échelle, sont très largement, voire principalement liées à des phénomènes autres que la variabilité de la relation « pluie-dépôt » elle-même. De même, une grande partie de cette variabilité se situe à une échelle qui n'a pas d'intérêt dans le cadre de cette étude. L'échelle d'intérêt est au moins celle de la commune ; comme nous le verrons par la suite, les hauteurs de pluie, qui constituent la principale des trois variables explicatives des dépôts, ne nous sont connues qu'à l'échelle

cantonale. La meilleure estimation que l'on puisse avoir des activités déposées après l'accident de Tchernobyl au voisinage d'une station de Météo-France, est la moyenne des activités mesurées lorsque plusieurs mesures ont été réalisées.

En raison de leur faible représentativité, les mesures isolées sur un site ne peuvent être utilisées pour quantifier les paramètres de la relation pluie-dépôt. Elles pourront cependant être confrontées aux évaluations faites par application de la relation obtenue sur les jeux de données les plus fiables.

De même, lorsque une valeur de D_i apparaît clairement et principalement expliquée par des phénomènes de redistribution contemporains ou postérieurs aux retombées atmosphériques consécutives à l'accident de Tchernobyl, la donnée correspondante n'a pas été retenue pour la quantification des paramètres de la relation « pluie-dépôt ».

Finalement, les sites permettant de calculer une moyenne des activités mesurées se limitent à ceux de la basse vallée du Rhône, aux sites électronucléaires (extrapolation d'une chronique pluriannuelle), aux stations de référence du SCPRI et à quelques sites investigués récemment par l'IRSN, soit au total 139 valeurs de D_i qui fournissent des activités moyennes dans les sols de 58 sites dont la répartition sur le territoire est présentée sur la figure 11.

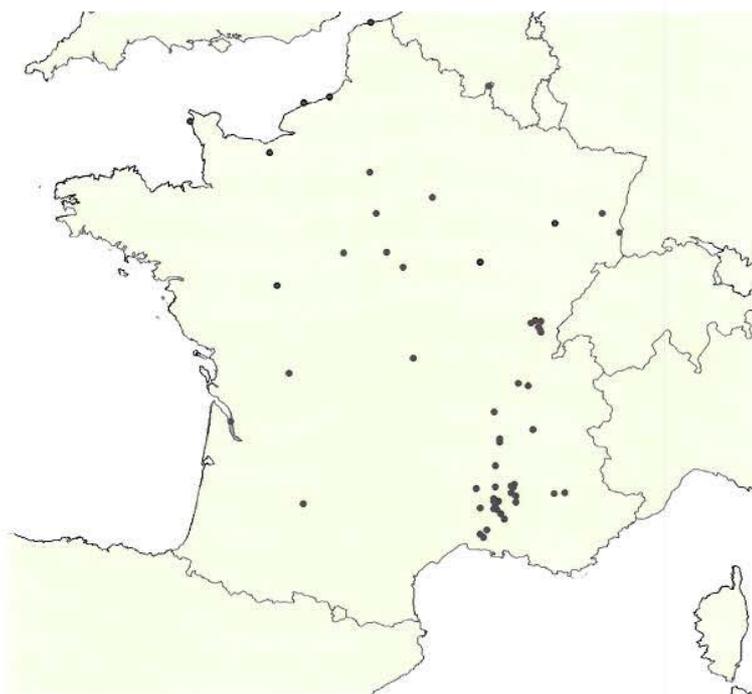


Figure 11 - Répartition des 58 sites sur lesquels une moyenne d'au moins deux valeurs de D_i a pu être calculée, et sur lesquels portera la quantification des paramètres de la relation pluie-dépôt

Enfin, il faut noter que les 139 valeurs de D_i retenues, et donc les moyennes sur les 58 sites, constituent pour la plupart une estimation minorante de l'activité surfacique totale déposée à la suite de l'accident de Tchernobyl, à cause de la fraction interceptée par le couvert végétal et, pour les mesures postérieures à 1986, à cause d'une décroissance effective de l'activité du ^{137}Cs dans les sols généralement plus forte que la seule décroissance radioactive (cf. § 3.1.2 et 3.1.3 et rapport IRSN/DEI 2004-02). Cette minoration, acceptable au regard des incertitudes et de la variabilité des activités des sols, ne peut être corrigée par manque de connaissances.

3.2. ACTIVITÉ SURFACIQUE RÉMANENTE DES RETOMBÉES DES ESSAIS ATMOSPHÉRIQUES D'ARMES NUCLÉAIRES R_i

3.2.1 LES DÉPÔTS EN FRANCE CONSÉCUTIFS AUX ESSAIS ATMOSPHÉRIQUES D'ARMES NUCLÉAIRES

De 1945 et jusqu'au début des années 80, la France métropolitaine a reçu les retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires. L'essentiel de ces dépôts qui ont concerné principalement une quinzaine de radionucléides dont le césium 137, s'est effectué avant 1963, année de l'arrêt des essais américains et soviétiques. Jusqu'en 2001, seule une valeur moyenne unique du dépôt de chacun de ces radionucléides était connue, via les estimations de l'UNSCEAR.

Une étude menée en 2001-2002 par l'IPSN à partir de plusieurs centaines de mesures effectuées par le SCPRI et l'OPRI depuis 1961, dans l'air et les eaux de pluies, a permis de reconstituer plus précisément ces dépôts. La figure 12 présente les dépôts mensuels de ⁹⁰Sr, ⁹⁵Zr, ¹⁰⁶Ru, ¹³⁷Cs et ¹⁴⁴Ce en région parisienne entre 1961 et 1978 ainsi reconstitués. Les évolutions sont similaires pour tous les radionucléides. Les dépôts de ⁹⁵Zr, ¹⁰⁶Ru et ¹⁴⁴Ce sont de même importance et d'un ordre de grandeur supérieurs à ceux de ¹³⁷Cs et ⁹⁰Sr. Les dépôts plus importants du début des années 60 sont dus aux essais américains et soviétiques. Les pics bien différenciés des années 66-78, sont consécutifs à chacun des essais chinois de forte puissance.

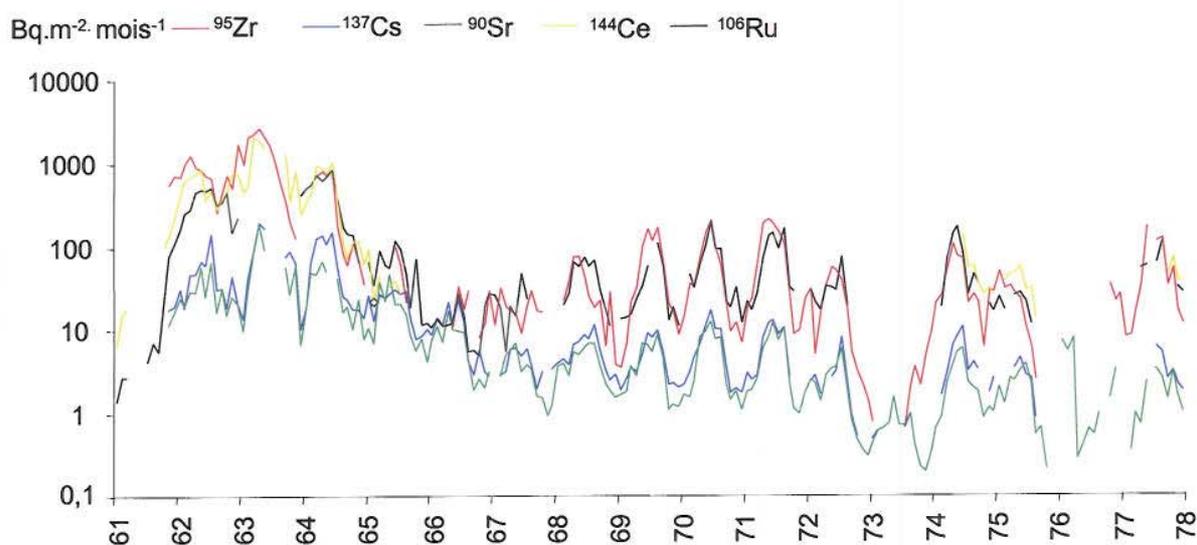


Figure 12 - Dépôts de ⁹⁰Sr, ⁹⁵Zr, ¹⁰⁶Ru, ¹³⁷Cs et ¹⁴⁴Ce en région parisienne entre 1961 et 1978 (Renaud et Louvat, 2003)

Lors de ces retombées, le même phénomène de rabattement des aérosols radioactifs par les pluies que celui constaté après l'accident de Tchernobyl, a conduit à une contribution prépondérante des dépôts pluvieux par rapport aux dépôts secs. Ainsi en région parisienne, pour une hauteur de précipitation annuelle de l'ordre de 650 à 700 mm.an⁻¹, les pluies ont constitué en moyenne les deux tiers des dépôts mensuels.

Compte tenu de l'importance de la contribution du dépôt humide au dépôt total, l'influence des précipitations moyennes annuelles sur l'intensité des dépôts a été étudiée à partir des dépôts reconstitués sur 4 stations du SCPRI, représentatives de la gamme des précipitations moyennes annuelles en France : Sauveterre, près d'Avignon (640 mm/an de précipitations annuelles), Cléville en Normandie (760 mm/an), Vioménil en Bourgogne (1200 mm/an) et Méaudre dans le Vercors (1430 mm/an). La figure 13 montre que les dépôts cumulés entre 1967 et 1972 augmentent avec les hauteurs de pluies. Ainsi, à Méaudre les dépôts ont été deux fois plus importants qu'à Sauveterre et ceci quel que soit le radionucléide. Le rabattement des aérosols radioactifs par la pluie, répété de manière chronique lors de chaque épisode pluvieux pendant plus de 40 ans, peut être décrit par une relation « pluie-dépôt » spécifique à ces retombées : la relation entre les pluies moyennes annuelles et les dépôts cumulés de 1945 à 1982. Cette corrélation est tout à fait conforme aux résultats d'études étrangères, dont certaines ont abouti à une quantification de cette relation, notamment, les travaux de Mitchell en Irlande (1990) et de Bunzl & Kracke en Allemagne (1988), Holgye et Filgas (1995) en Hongrie et Whright et al. (1999) en Norvège (Renaud et Louvat, 2003).

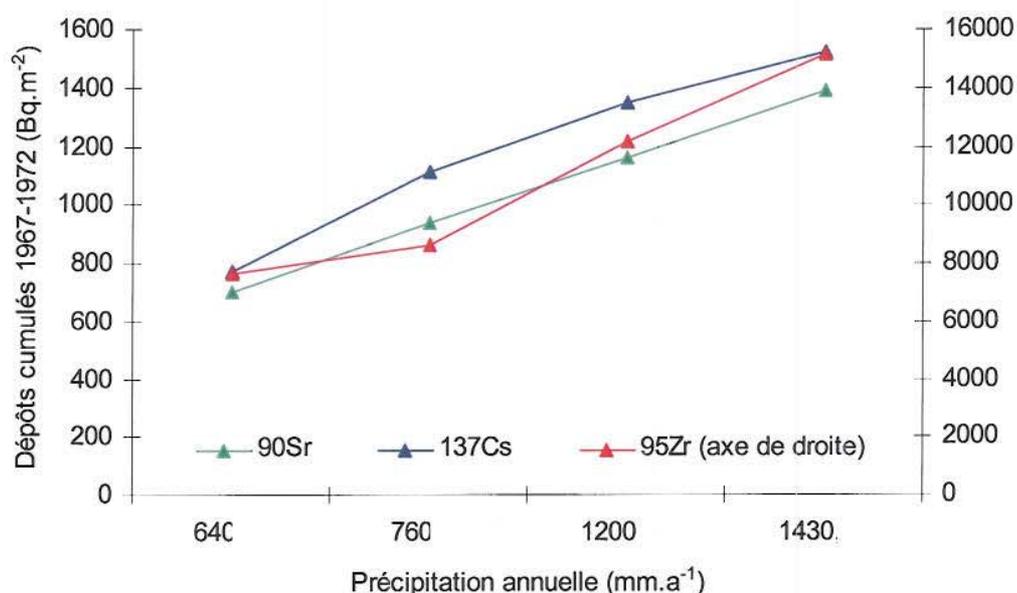


Figure 13 - Influence des hauteurs de précipitations moyennes annuelles sur l'importance des dépôts cumulés de différents radionucléides de 1967 à 1972 sur quatre sites français. L'axe vertical à droite du graphique est relatif au ⁹⁵Zr

3.2.2 RÉMANENCE DE CES DÉPÔTS DANS LES SOLS FRANÇAIS EN 1986

Le césium déposé lors de ces retombées a très probablement eu le même devenir que celui déposé à la suite de l'accident de Tchernobyl. Il a décru par décroissance radioactive, migré vers la profondeur, a été redistribué par l'érosion et lors de remaniements anthropiques des sols. Tout ce qui a été exposé précédemment concernant la rémanence du césium dans les sols et la représentativité des mesures, prévaut aussi pour les retombées des essais atmosphériques. Nous avons malheureusement encore moins de moyens, notamment de mesures, pour évaluer l'effet résultant de ces phénomènes en terme de rémanence dans les sols que nous n'en avons pour les dépôts consécutifs à l'accident de Tchernobyl. Seule une méthode indirecte, à l'aide d'une relation empirique établie entre les précipitations moyennes annuelles et le dépôt atmosphérique, permet d'estimer la contribution de la

rémanence des tirs (R_i) aux activités D_i mesurées dans les sols depuis 1986. Ponctuellement, d'autres méthodes de caractérisation, fondées sur les mesures des activités de ^{134}Cs , du plutonium ou du ^{90}Sr , peuvent être appliquées.

3.2.2.1 Estimation de R_i à partir d'une relation empirique avec les précipitations moyennes annuelles

La démarche retenue dans la présente étude consiste à estimer l'activité rémanente dans les sols originaire des tirs par l'utilisation de relations empiriques basées sur la connaissance des précipitations moyennes annuelles. La relation utilisée est celle obtenue par Mitchell en 1988, basée sur la confrontation entre les activités des sols irlandais et les précipitations moyennes annuelles (figure 14 avec équation).

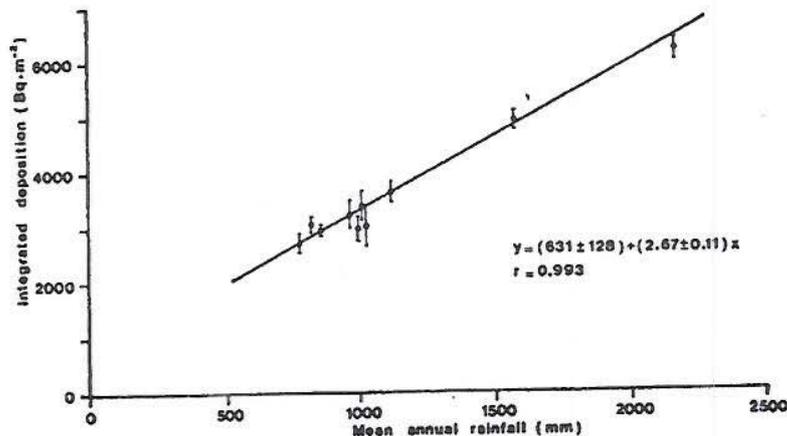


Figure 14 - Relation entre les activités rémanentes des essais nucléaires en 1988 et les précipitations moyennes annuelles en Irlande, étudiée par Mitchell et al. (1990)

Les limites de cette relation proviennent du faible nombre de points qui ont servi à son obtention et de leur mauvaise répartition sur l'axe des pluviométries. Par ailleurs, d'après l'UNSCEAR, les dépôts moyens sur la bande latitudinale de l'Irlande auraient été inférieurs à ceux de la bande latitudinale de la France. Néanmoins, l'IRSN a montré que cette relation établie pour l'Irlande est globalement cohérente avec les connaissances des dépôts en France basées sur les mesures effectuées par le SCPRI (cf. figure 13 du § 3.2.1). La figure 15 présente les activités surfaciques rémanentes en 1986 des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires obtenue par application de la relation de Mitchell à la carte des précipitations moyennes annuelles fournie par Météo-France, elle-même assez fortement reliée à celle du relief. Sur la majeure partie de la France, ces activités rémanentes en 1986 allaient de 2500 à 3500 Bq.m⁻², les régions les plus arrosées pouvant dépasser 5000 Bq.m⁻².

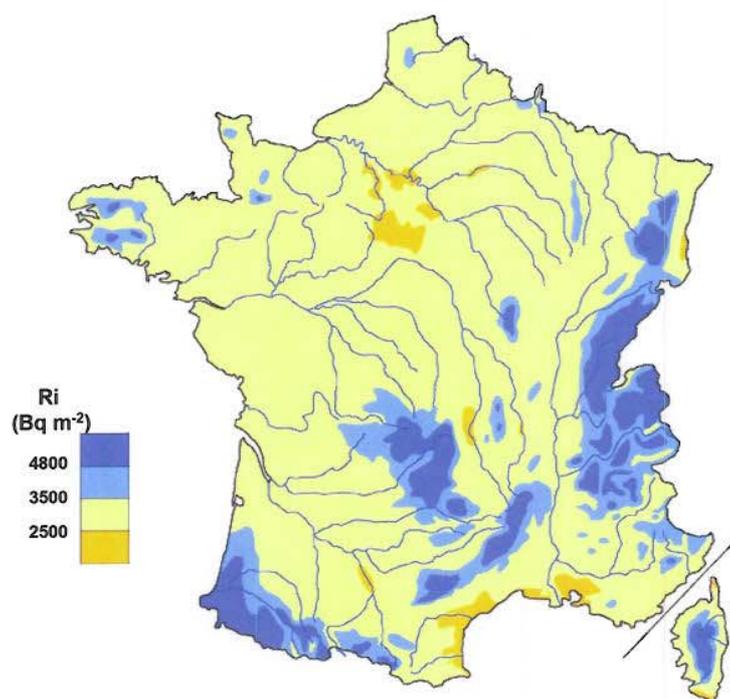


Figure 15 - Cartographie des dépôts rémanents des essais d'armes nucléaires R_i en 1986, estimés à l'aide de la relation empirique de Mitchell

Dans la basse vallée du Rhône, cette carte est en bon accord avec les estimations basées sur les mesures de ^{134}Cs et Pu dans les sols (tableau 1).

Méthodes	Nombre de données	R_i calculé Valeur Min.	R_i calculé Valeur Max.
Par les mesures ^{134}Cs	5	1360	2280
Par les mesures Pu	47	2100	2600
Par la relation de Mitchell	-	2200	2900

Tableau 1 - Confrontation des différentes méthodes d'évaluation des R_i dans la basse Vallée du Rhône

Afin d'obtenir une meilleure cartographie des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires et de leur rémanence sur le territoire français, l'IRSN a débuté en 2004 une étude de la relation entre les précipitations moyennes annuelles sur la Montagne Noire (Aude, Tarn). Cette zone qui constitue la pointe la plus méridionale du Massif Central, au nord-ouest de Montpellier, présente la particularité d'avoir été très peu touchée par les retombées de l'accident de Tchernobyl, en raison de précipitations nulles ou très faibles en mai 1986. Par ailleurs, en raison d'une pluviométrie moyenne annuelle élevée, les retombées des essais nucléaires y ont été parmi les plus fortes de France. Deux campagnes de prélèvements de sols y ont été effectuées. Les premiers résultats montrent une forte corrélation entre la pluviométrie et les activités des sols. Il semblerait cependant que pour les plus hauts niveaux de précipitation, entre 1200 et 1800 mm, ces activités soient supérieures à celles déduites par l'application de la relation de Mitchell, ce qui était en partie prévisible (cf. chapitre précédent).

Dans l'attente que ces résultats soient consolidés et publiés (fin 2006), l'application de la formule empirique de Mitchell constitue la meilleure approximation de la rémanence théorique en 1986 des dépôts consécutifs aux essais atmosphériques d'armes nucléaires. En outre, cette approche présente l'avantage de calculer R_i à partir de

données facilement accessibles (précipitations moyennes annuelles). Enfin, l'incertitude liée à son application pour la détermination du paramètre R_i est faible au regard des sources d'incertitudes des autres paramètres de cette étude.

3.2.2.2 Estimation de R_i à partir de mesures de plutonium et de strontium

Les mesures de plutonium ou de strontium ne sont disponibles que dans un nombre très limité de sites. De plus, ces deux radionucléides ont un devenir très différent de celui du césium dans les sols : le strontium est beaucoup plus mobile que le césium dans les sols, favorisant sa migration vers la profondeur, voire sa disparition ; le plutonium quant à lui est beaucoup moins mobile.

Le calcul de la contribution des tirs à partir de la mesure de l'activité du Pu repose sur l'utilisation directe du rapport d'activité des retombées des tirs ($\text{Activité}[\text{Pu}]/\text{Activité}[^{137}\text{Cs}] = 0.02$), soit :

$$R_i = \text{Activité}[\text{Pu}] \times 0.02 \quad (4)$$

À partir des 47 mesures de Pu dans les sols de la basse Vallée du Rhône, issues de la thèse de C. Duffa consacrée à la répartition du plutonium dans l'environnement terrestre, l'activité surfacique moyenne de $^{239+240}\text{Pu}$ ($47 \pm 15 \text{ Bq.m}^{-2}$) permet d'estimer R_i (2100 Bq m^{-2}) à partir de la relation 4. La comparaison de ce résultat avec la valeur estimée à l'aide de la relation de Mitchell est donnée dans le tableau 1 ci-dessus.

3.2.2.3 Estimation de R_i par à partir de mesures de ^{134}Cs

Le calcul de la contribution des tirs à partir de la mesure de ^{134}Cs (rapportée à mai 1986) est réalisé par l'équation de mélange suivante (en mai 1986, le rapport des activités $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$ était égal à 2) :

$$R_i = D_i - \text{Activité}[^{134}\text{Cs}] \times 2 \quad (5)$$

Les mesures réalisées par l'IPSN, dans le cadre du bilan radioécologique autour de l'installation de Marcoule, entre 1993 et 1995, ont permis de quantifier les activités de ^{134}Cs (Lumia et Descamps, 1995 ; Descamps et Lumia, 1996 ; Descamps, 1997). Malheureusement, ces mesures ont été effectuées sept à neuf ans après l'accident, trop tardivement pour quantifier avec précision l'activité de ^{134}Cs rapportée à 1986, en raison de sa période de 2 ans. Par voie de conséquence, la quantification de R_i , sur la base des activités en ^{134}Cs , est entachée d'une très forte incertitude. Parmi toutes les données représentées, cinq d'entre elles donnent néanmoins une estimation satisfaisante de R_i pour la Basse Vallée du Rhône.

La figure 16 ci-après met en évidence une médiocre corrélation entre les mesures de R_i effectuées par la CRII-RAD et les précipitations moyennes annuelles, ce qui confirme que l'estimation de R_i basée sur des mesures de ^{134}Cs n'est le plus souvent pas fiable. Deux raisons peuvent expliquer cette mauvaise représentativité de R_i mesurés. D'abord, les prélèvements et les mesures de sols sont intervenus 30 ans environ après le dépôt des retombées des tirs et, comme évoqué précédemment, une part du dépôt a pu migrer et n'est plus accessible. D'autre part, la détermination de la part des retombées des tirs peut être entachée d'une incertitude relativement importante, liée à l'incertitude de la mesure de ^{134}Cs (au moins 30 %), qui peut peser fortement sur la représentativité des R_i .

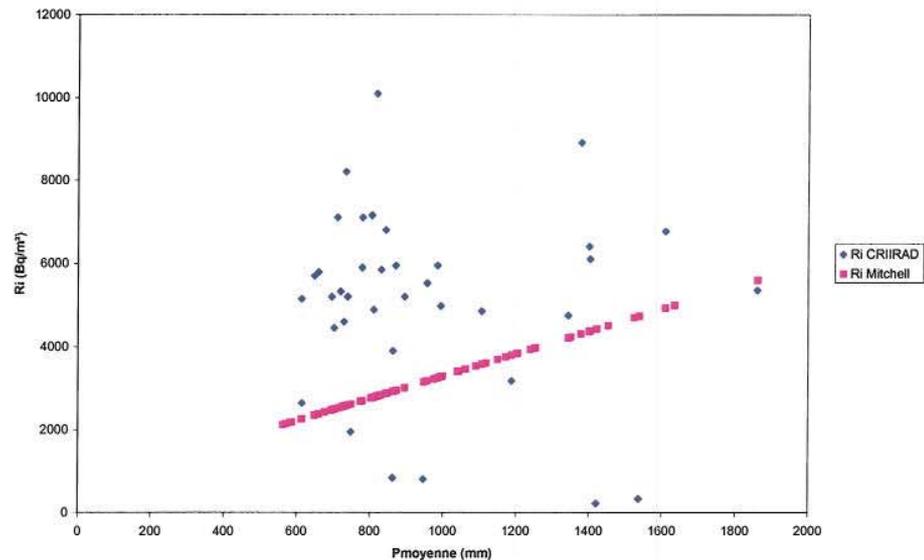


Figure 16 - Confrontation de R_i estimés par la relation empirique de Mitchell (1990) avec R_i estimés par la CRII-RAD à partir de mesures de ^{134}Cs (communes d'Alsace et des Vosges)

3.2.3 FRACTION DES R_i ESTIMÉS PRÉSENTE DANS L'ACTIVITÉ D_i MESURÉE

Comme pour le ^{137}Cs provenant des retombées de l'accident de Tchernobyl, et a fortiori en raison de l'ancienneté des essais nucléaires, les prélèvements de sols ayant permis l'obtention des valeurs de D_i , ne rendent compte que partiellement des activités de ^{137}Cs rémanentes des tirs. En toute rigueur, il convient donc d'estimer la fraction des activités rémanentes R_i qui n'est pas représentée dans les D_i issues des mesures d'échantillons de sols, même si cette composante pèse peu dans la relation étudiée. Aussi, cette fraction a été évaluée de manière simple, elle est fournie dans la colonne du tableau des données.

Pour les sites électronucléaires français, la fraction de R_i présente dans les D_i mesurés a été estimée en fonction de la constante apparente de diminution des activités présentent dans les 20 premiers centimètres au cours de la chronique d'acquisition de ces données. Pour ces sites, cette fraction est de 20% à 80%.

Pour les sites investigués par l'IRSN, elle est de 100%, soit parce que la profondeur de prélèvement a été supérieure à 30 voire 50 cm (cas du Jura), soit en raison du mode d'estimation des D_i qui a permis la prise en compte de l'activité contenue dans l'intégralité de la colonne de sol (cas des sites de la basse vallée du Rhône cf. § 3.1.5.4).

Pour les stations de référence du SCPRI, elle a été fixée à 100% car sans objet en raison du mode de calcul des D_i correspondant qui permet de déduire directement les dépôts de mai 1986.

3.3. ACTIVITÉS VOLUMIQUES QUOTIDIENNES DU ^{137}Cs DANS L'AIR : C_i (j)

3.3.1 LES DONNÉES DISPONIBLES

En mai 1986, les activités de ^{131}I et ^{137}Cs dans l'air ont été mesurées par le Service Central de Protection contre les Rayonnements Ionisants (SCPRI) sur 7 villes de France et sur chacun des Centres Nucléaires de Production Électrique (C.N.P.E.) français, dans le cadre de son programme de surveillance de l'environnement (SCPRI, 1986). Les activités moyennes de l'air pour deux périodes, du 1 au 3 mai et du 4 au 31 mai 1986, 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'Énergie Atomique ont également mesuré quotidiennement les activités de ces deux radionucléides dans l'air (Marcoule, Grenoble, Cadarache, etc.).

Les filtres des prélèvements journaliers réalisés en France n'avaient fait l'objet en 1986 que de mesures de l'activité β globale ; c'est pourquoi, en 2002, les filtres de 33 stations du SCPRI, relevés quotidiennement entre le 1^{er} et le 5 mai, ont été remesurés par l'OPRI (données fournies dans le rapport IRSN/DEI-2004-02).

Au total, nous disposons donc de l'activité en ^{137}Cs de l'air quotidienne au niveau du sol sur 39 sites français (en assimilant à un seul site les mesures faites autour de Marcoule et de Phénix, très proches l'un de l'autre). Ce nombre est très faible et surtout ces sites sont très mal répartis sur le territoire (cf. figure 17).

Les activités de ^{137}Cs dans l'air mesurées sur 23 sites de pays voisins (Grande-Bretagne, Pays-Bas, Belgique, Allemagne, Suisse, Autriche, Italie, Espagne (Raes et al., 1989)) viennent compléter ce jeu de données, afin de renforcer la représentativité dans l'est et le nord du pays ; la partie ouest et plus particulièrement le sud-ouest restent faiblement représentés.

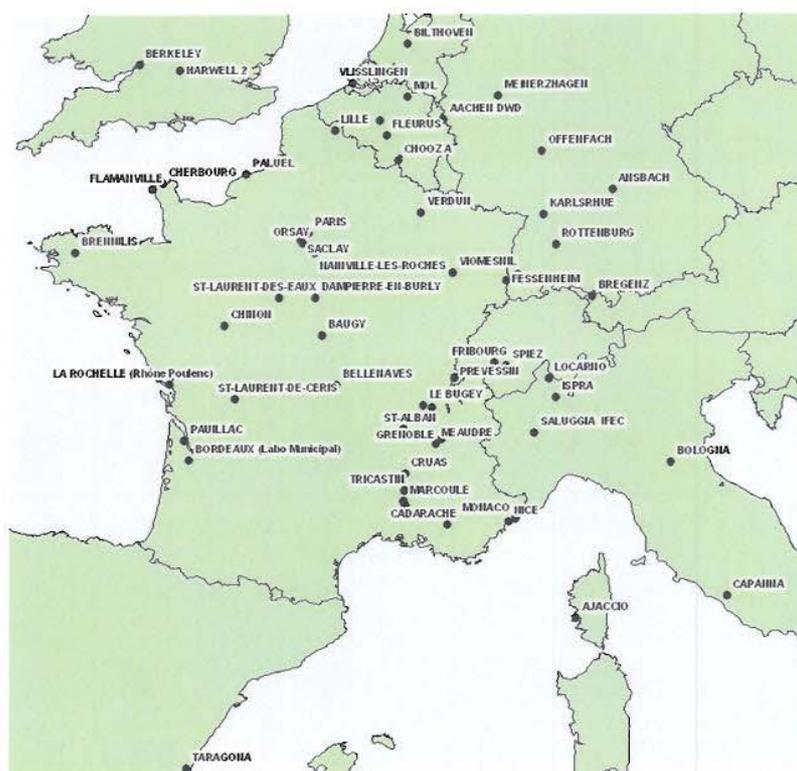


Figure 17 - Localisation des sites de mesures de l'activité de l'air, en France et dans les pays voisins

Dans certains cas, on dispose, pour une même journée, de plusieurs mesures de l'activité de l'air (figure 18). On accède à la valeur de l'activité moyenne quotidienne selon un algorithme qui intègre les activités mesurées pendant les durées de prélèvement.

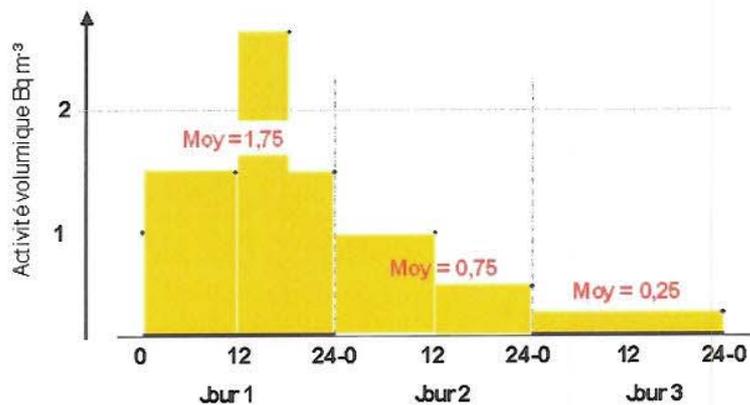


Figure 18 - Calcul de l'activité moyenne quotidienne de l'air à partir de plusieurs mesures quotidiennes

La figure 19 présente les 5 cartes des activités quotidiennes du ^{137}Cs de l'air entre le 1^{er} et le 5 mai 1986 disponibles. Le nombre de stations varie selon les jours entre 52 (39 stations françaises et 13 stations étrangères) et 60 (39 stations françaises et 23 stations étrangères). Les 5 graphiques de la figure 20 permettent de visualiser les tendances en fonction de la longitude et de la latitude.

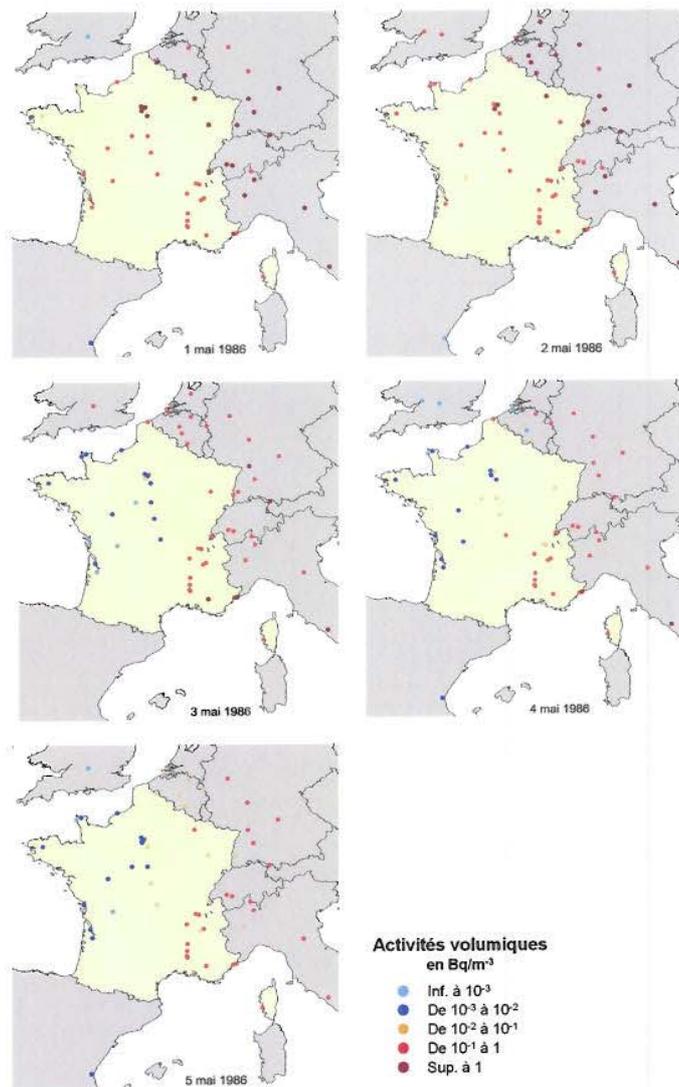


Figure 19 - Cartographie de la répartition des sites de mesures de l'activité volumique du ^{137}Cs dans l'air entre le 1^{er} et le 5 mai 1986

Les sites situés à l'est de la France (Verdun, Fessenheim, Chooz, vallée du Rhône, Ajaccio) sont caractérisés par la persistance d'activités relativement élevées ($> 0.1 \text{ Bq.m}^{-3}$) du 1^{er} au 4 mai (Renaud et al., 2003). Les activités les plus importantes ($> 1 \text{ Bq.m}^{-3}$) sont mesurées les 1^{er} et 2 mai, dans le quart nord-est de la France, ainsi qu'en région parisienne (Paris, Le Vésinet, Saclay). Les fortes activités mesurées dans le NE et le SE sont en accord avec les mesures réalisées à cette période dans les pays limitrophes, tant au nord-est (Belgique, Allemagne) qu'au sud-est (Italie). Sur le reste du territoire, au sud d'une ligne Paris-Nice, les activités sont plus faibles d'un à deux ordres de grandeur le 1^{er} et le 2 mai (cas de Brennilis et Cherbourg, par exemple). Ces activités sont plus fortes que celles mesurées, pendant la même période, dans des pays voisins et à des longitudes comparables (Tarragone et région londonienne). Pour les stations situées à l'ouest de 4° de longitude Est, on a mesuré des activités très faibles, le plus souvent inférieures à $10^{-3} \text{ Bq.m}^{-3}$, à partir du 3 mai.

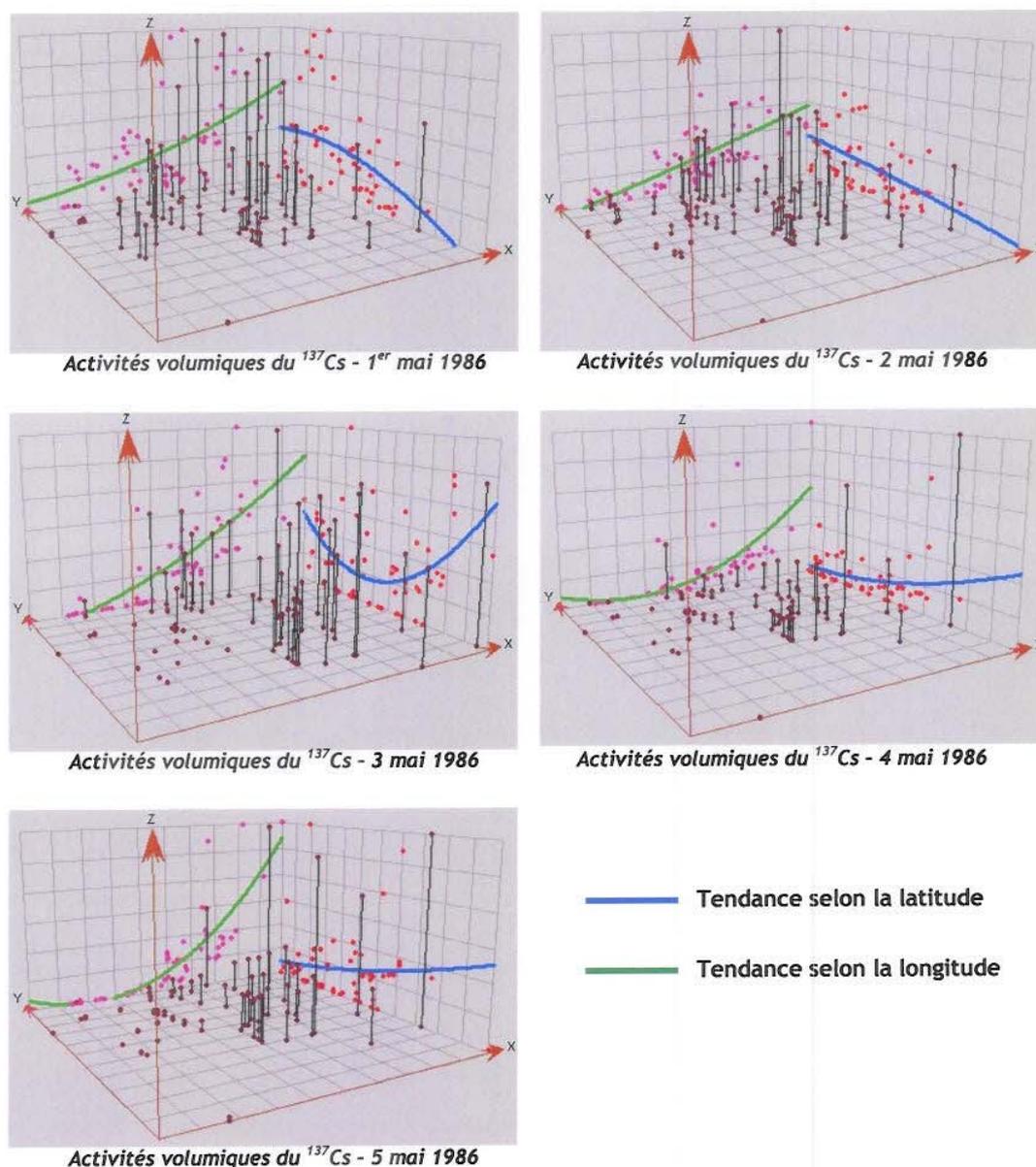


Figure 20 - Tendances des activités volumiques du ^{137}Cs dans l'air (z) en fonction de la latitude (y) et de longitude (x)

L'utilisation de ces données pour évaluer l'activité de l'air lors des pluies en chacun des sites où il existe une estimation de D_i pose le problème de leur représentativité pour cet objectif.

3.3.2 REPRÉSENTATIVITÉ DE L'ACTIVITÉ DE L'AIR MESURÉE LORS DES PLUIES

Lors d'une pluie, l'activité contenue dans l'air est répartie en deux fractions : la fraction sèche fixée sur des aérosols qui n'ont pas été absorbés par une goutte d'eau, et la fraction humide présente dans les gouttes d'eau (sur les aérosols d'origine ou en solution). Les mesures ne rendent compte que de la première fraction, et la répartition de l'activité entre les deux fractions n'est pas connue. Dans ces conditions, il est possible que l'activité du ^{137}Cs de la fraction humide soit influencée, au moins pour partie, par l'activité volumique de l'air du jour précédent. Cette hypothèse sera testée à l'aide d'une variante de la relation (3) (voir paragraphe 4.2).

3.3.3 REPRÉSENTATIVITÉ DE L'AIR MESURÉE AU NIVEAU DU SOL

L'activité contenue dans les gouttes d'eau formant le dépôt humide résulte de deux phénomènes : d'une part l'inclusion, lors de la formation des gouttes d'eau par condensation de la vapeur sur les aérosols atmosphériques portant les radionucléides, et d'autre part le rabattement des aérosols radioactifs par collecte lors de la chute de la goutte. Ces deux phénomènes mettent en jeu la radioactivité de l'air en altitude puis tout au long de sa chute. Dans tous les cas, l'activité contenue dans l'air au niveau du sol contribue extrêmement peu à l'activité totale des gouttes d'eau. Nous n'avons aucune mesure qui permette de connaître l'activité de l'air en altitude. La relation (3) repose donc sur l'hypothèse que l'activité de l'air au niveau du sol, et plus particulièrement sa variation spatiale, est représentative de celle plus en altitude, c'est-à-dire que l'activité a été relativement homogène dans la masse d'air en fonction de l'altitude. D'une part, la distance parcourue par cette masse d'air depuis la centrale ukrainienne permet effectivement de supposer un brassage au moins jusqu'à l'altitude des nuages (1500 à 2000 mètres), d'autre part les pluies ont obligatoirement résulté de la confrontation de deux masses d'air, l'une certainement beaucoup moins contaminée que l'autre, et qui est passée sous celle-ci en raison de leur différence de température.

3.3.4 REPRÉSENTATIVITÉ D'UNE MESURE SUR UN SITE AU REGARD DE L'ENSEMBLE DE SA ZONE D'INFLUENCE

La figure 21 présente les polygones d'influence, dits de Voronoï, des différents sites sur lesquels une mesure de l'activité de l'air est disponible.

En raison de la très faible densité de points de mesures et de leur mauvaise répartition, les polygones sont très grands : les plus petits, de la vallée du Rhône ou du bassin parisien, couvrent plusieurs départements, les plus grands couvrent plusieurs régions comme c'est le cas du polygone d'influence de la donnée correspondant au site de Bordeaux. Ainsi, l'activité de l'air au pied des Pyrénées Orientales repose sur deux mesures : une effectuée à Bordeaux à 300 km au nord-ouest, et une effectuée dans la vallée du Rhône à 300 km au nord-est. On constate également qu'aucune mesure n'est disponible pour la Corse, dont l'estimation de l'activité de l'air reposerait sur les deux mesures effectuées dans les Alpes Maritimes, sur celle de Cadarache dans les Bouches du Rhône, et celle effectuée en Italie.

Malgré cette faible représentativité spatiale des mesures, l'homogénéité des activités mesurées et la continuité dans l'évolution spatiale de la radioactivité de l'air permettent cependant d'envisager leur interpolation.

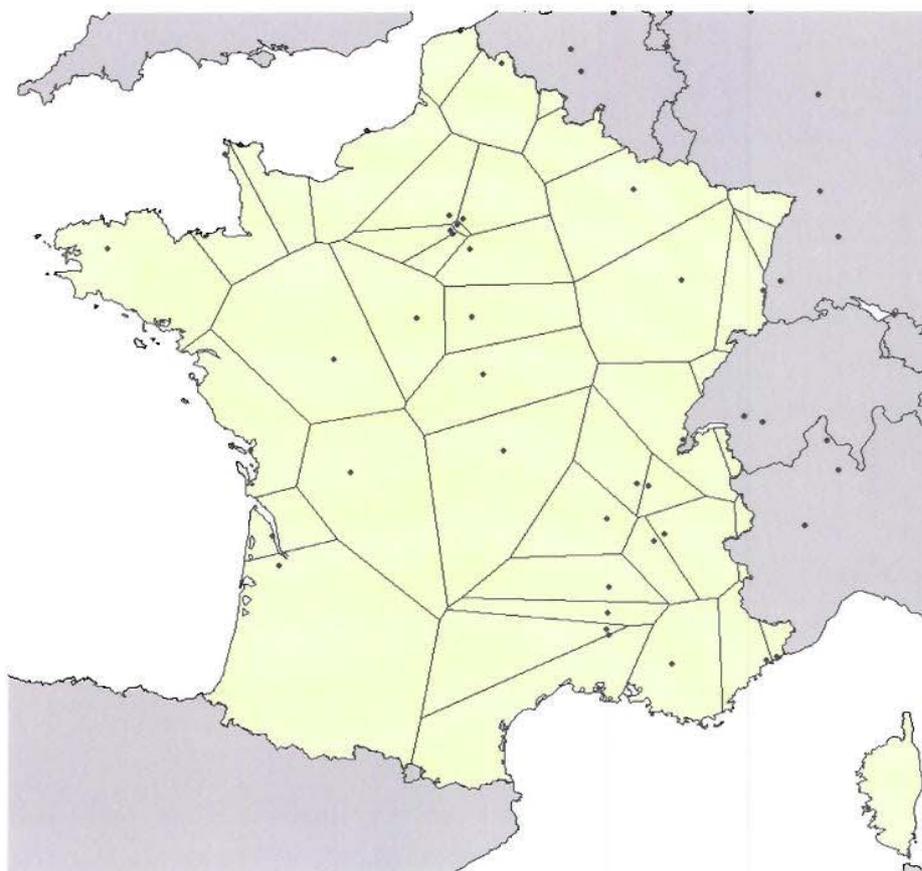


Figure 21 - Polygones d'influence des différents sites d'observations des activités volumiques de l'air

3.3.5 INTERPOLATION SPATIALE

Il existe plusieurs méthodes d'interpolation spatiale. On distingue notamment les méthodes déterministes comme l'interpolation linéaire lissée (méthode d'Akima) ou l'inverse du carré de la distance, et les méthodes géostatistiques comme le krigeage qui permettent d'estimer les incertitudes sur les valeurs interpolées. Compte tenu de la faible représentativité des données sur l'activité de l'air liée à leur nombre insuffisant, cette évaluation des incertitudes (écart type des valeurs interpolées) est fondamentale pour apprécier la qualité et les limites de l'interpolation. C'est le calage des paramètres du modèle d'interpolation par l'ajustement d'un variogramme empirique (cf. annexe 3) qui permet de disposer de cette information qualitative indispensable dans ce cas. L'adjonction des données étrangères aux données françaises permet un ajustement du variogramme, de qualité variable suivant les jours, et donc une interpolation par krigeage ordinaire (cf. annexe 3) qui n'était pas possible avec les seules données acquises en France.

Les activités de l'air ont donc été interpolées par krigeage ordinaire à partir de 52 à 60 points de mesure, selon les jours. Les activités interpolées sur la France métropolitaine sont représentées aux figures 22.1 à 22.5 avec quelques éléments d'interprétation (variogrammes et écart-type de l'estimation).

Pour chaque jour, le variogramme empirique (omnidirectionnel) révèle une variabilité des concentrations à courte distance (50 km). Au-delà, il semble augmenter progressivement avec la distance. Aucun palier n'est décelable dans la gamme des distances interprétables (distances inférieures à la demi-fenêtre d'observation, soit environ 750 km). Du 1^{er} au 5 mai 1986, le variogramme empirique diminue et perd sa structure : les dissimilarités,

initialement très différentes entre faibles et grandes distances (0.1-1 le 1^{er} mai), tendent à s'amortir et à s'uniformiser dans l'espace (0-0.04 le 5 mai). Ces tendances sont cohérentes avec les phénomènes observés, à savoir : le passage d'un panache radioactif affectant une partie du domaine étudié (1-2 mai) puis le retour progressif à des activités plus homogènes et beaucoup plus faibles (4-5 mai).

Pour chaque jour, le variogramme théorique $\gamma(h)$ a été construit par superposition d'un modèle à effet pépité et d'un modèle gaussien (cf. annexe 3). Cette formulation conduit à un variogramme partant d'un palier bas non nul à courte distance, et évoluant par une courbe sigmoïde vers un palier haut à grande distance (figure 22.1 par exemple). Elle s'écrit :

$$\gamma(h) = 0 \quad \text{si } |h|=0$$

$$\gamma(h) = \tau^2 + (\sigma^2 - \tau^2) \cdot [1 - \exp(-(|h|/\Phi)^2)] \quad \text{sinon}$$

avec τ^2 : constante de pépité ; σ^2 : palier ; Φ : portée.

A priori, ce modèle de variogramme paraît adapté et intéressant car :

- les variogrammes empiriques ont montré la persistance d'une variabilité des activités à courte distance. Le modèle à effet pépité est indiqué pour ces situations ;
- d'un point de vue physique, les activités atmosphériques sont probablement non corrélées au-delà d'une distance seuil car elles sont alors dispersées par des masses d'air différentes, d'origines et comportements différents. Après cette distance critique, les dissimilarités atteignent ainsi certainement un palier ;
- d'un point de vue numérique, un palier revient à considérer que les points les plus éloignés apportent tous une même quantité très faible d'information, dès que la distance seuil est dépassée : par exemple, des mesures à 1000 et 2000 km sont tout aussi inutiles pour estimer une activité dans l'air. Par suite, le krigeage privilégiera les points du voisinage pour construire l'estimation. Pour conclure, un modèle à palier est donc plausible, bien que non esquissé sur le variogramme empirique ;
- cette formulation fait du krigeage ordinaire une forme analogue améliorée de l'interpolation pondérée par l'inverse du carré de la distance (ICD), méthode initialement envisagée. En effet, ce modèle exprime que la dissimilarité entre points distants de $|h|$ est environ proportionnelle à $1/|h|^2$ quand $|h| < \Phi$, comme le fait la méthode ICD. En revanche, ce modèle autorise une dissimilarité même à très grande proximité (effet pépité), alors que la méthode ICD voit les points de mesure comme très influents dans leur voisinage. Ce choix limite le poids donné aux points de mesure quand on interpole dans leur voisinage, et s'affranchit ainsi du symptôme « œil de bœuf » caractéristique de la méthode ICD.

Ce modèle de variogramme est isotrope. L'hypothèse d'isotropie a été supposée acquise faute de données en nombre suffisant. Le nombre de points séparés d'une distance donnée et pour une direction donnée était trop faible pour pouvoir construire des variogrammes empiriques directionnels.

Les 3 paramètres (τ^2 , σ^2 , Φ) du variogramme théorique ont été déterminés par ajustement visuel. Leurs valeurs sont données au tableau 2. Les variogrammes ajustés apparaissent compatibles avec les variogrammes empiriques dans la gamme des distances interprétables (distances inférieures à 750 km) (figures 22.1 à 22.5). Cette cohérence

a posteriori conduit à retenir l'hypothèse de stationnarité intrinsèque et le modèle de variogramme proposé. Le krigeage ordinaire est donc applicable.

Tableau 2 - Les 3 paramètres (τ^2 , σ^2 , Φ) du variogramme théorique

Date	Φ (km)	σ^2 ((Bq/m ³) ²)	τ^2/σ^2 (%)
1 mai 1985	350	1,1	15
2 mai 1986	350	0,85	15
3 mai 1986	350	0,23	15
4 mai 1986	500	0,1	15
5 mai 1986	500	0,032	7,5

Les activités estimées et leur écart type sont donnés aux figures 22.1 à 22.5. Les valeurs estimées indiquent l'arrivée d'air contaminé dans le nord-est de la France (1^{er} et 2 mai), puis son extension au sud-est (2 et 3 mai), et enfin sa rapide disparition (4 et 5 mai) avec cependant une plus grande persistance sur la Corse (4 mai). Qualitativement, ces tendances sont en accord avec les phénomènes observés. Numériquement, ces interpolations sont très incertaines. En dehors des zones concernées par les grandes tendances décrites plus haut, l'écart type des estimations est équivalent voire supérieur aux valeurs estimées. Cela indique que d'autres mesures indépendantes faites aux mêmes points auraient pu conduire à des estimations très différentes. Les interpolations faites dans l'ouest et le sud-ouest apparaissent donc comme les plus fragiles.

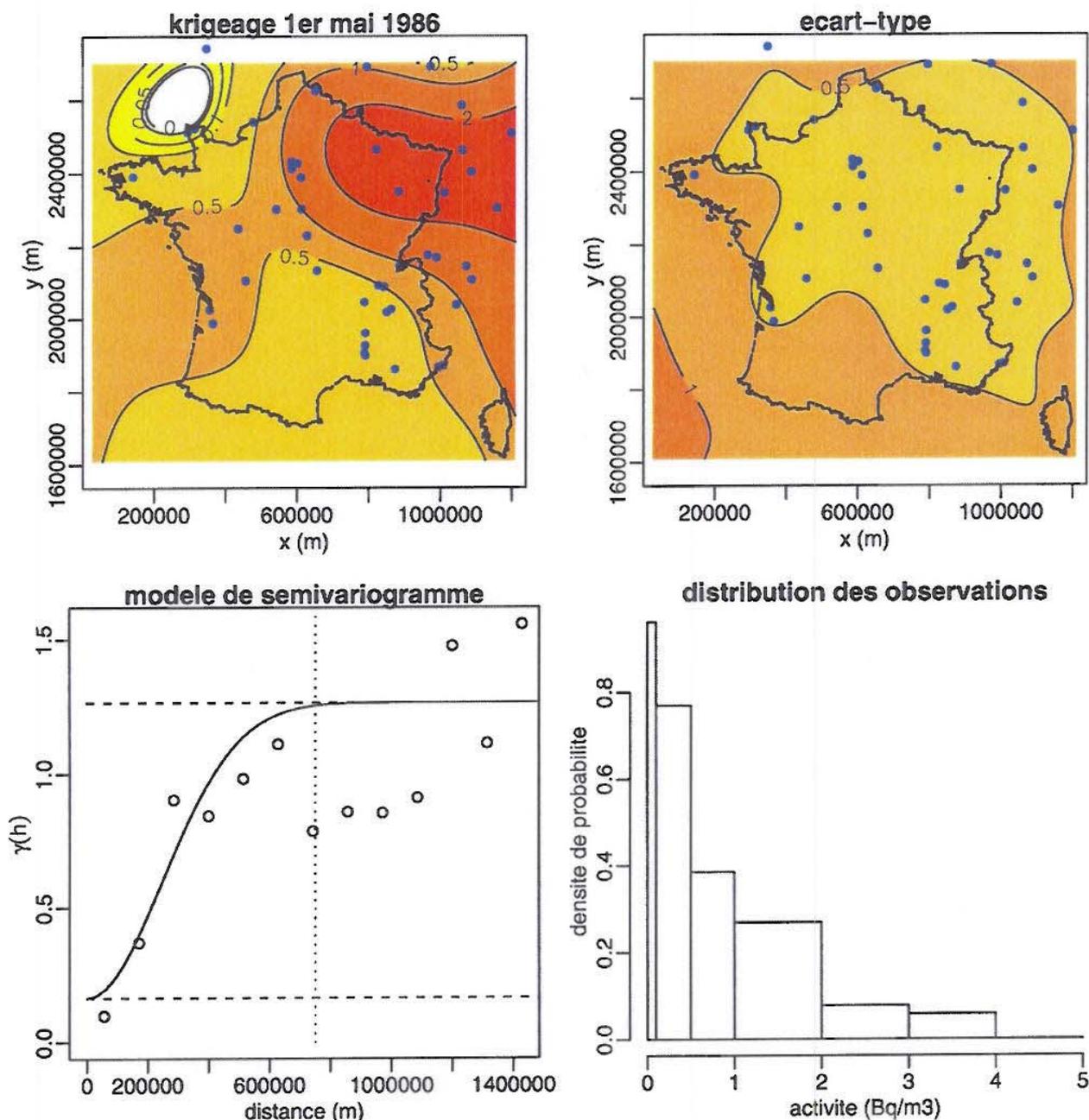


Figure 22.1 - Activités du ^{137}Cs de l'air ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) le 1^{er} mai 1986, interpolées par krigeage ordinaire. Le système de coordonnées x, y (m) est Lambert II étendu. L'écart type des interpolations ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) est représenté avec le même code de couleurs. Le semi-variogramme théorique adopté est représenté avec son équivalent empirique. La distribution des observations indique dans quelle gamme se situent les activités mesurées ce jour-là.

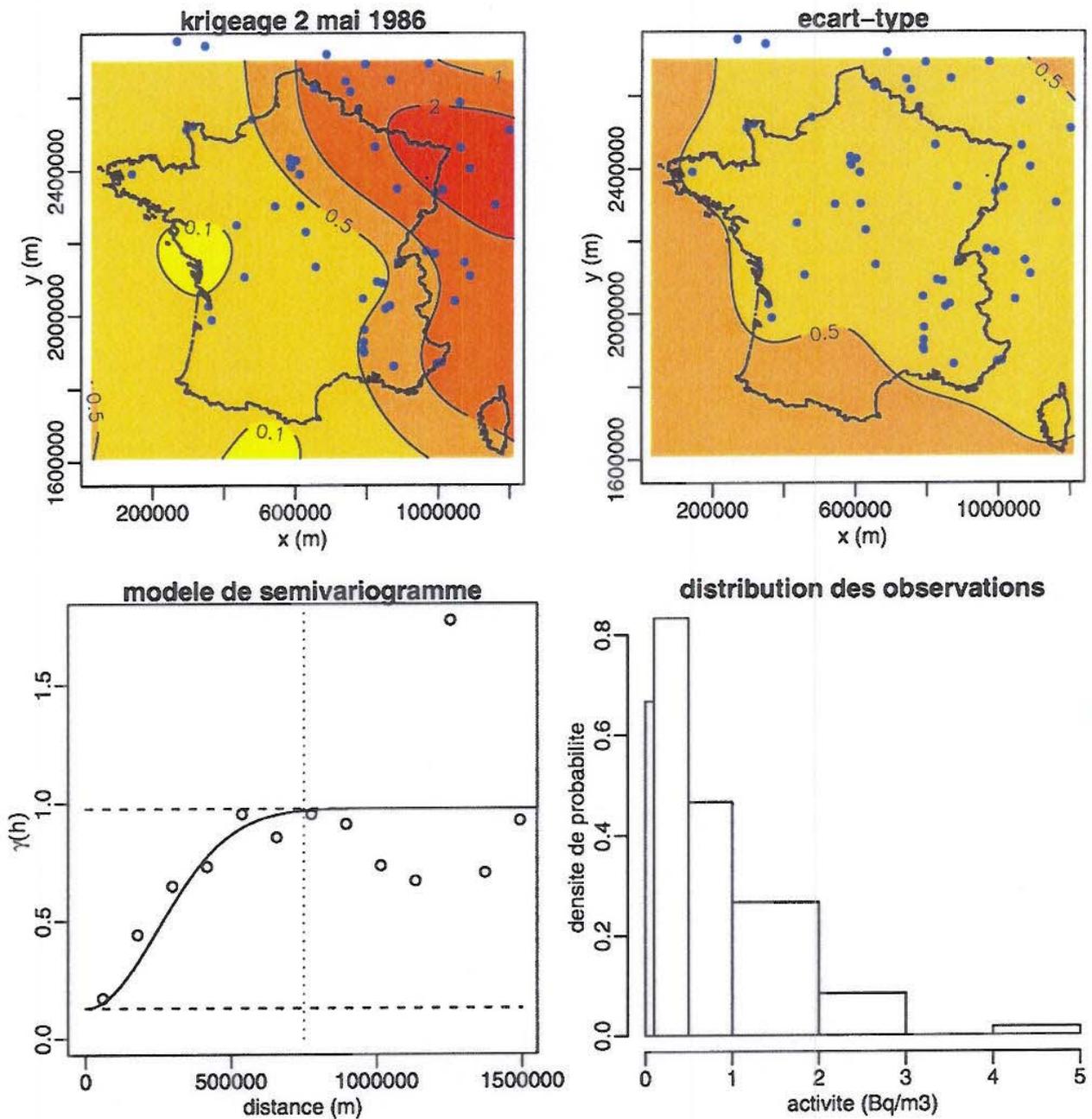


Figure 22.2 - Activités du ^{137}Cs de l'air ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) le 2 mai 1986, interpolées par krigeage ordinaire. Le système de coordonnées x, y (m) est Lambert II étendu. L'écart type des interpolations ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) est représenté avec le même code de couleurs. Le semi-variogramme théorique adopté est représenté avec son équivalent empirique. La distribution des observations indique dans quelle gamme se situent les activités mesurées ce jour-là.

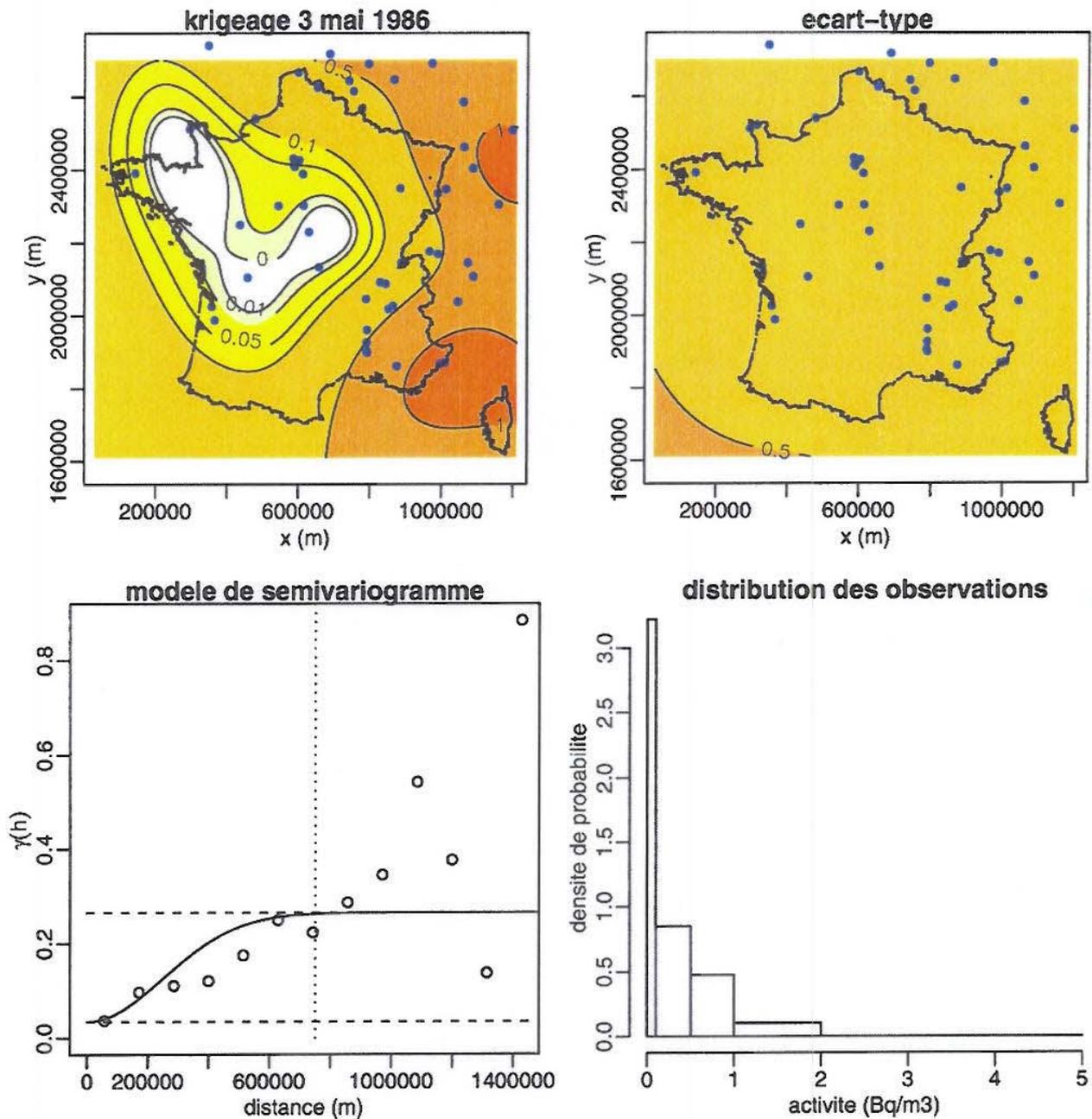


Figure 22.3 - Activités du ^{137}Cs de l'air ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) le 3 mai 1986, interpolées par krigeage ordinaire. Le système de coordonnées x, y (m) est Lambert II étendu. L'écart type des interpolations ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) est représenté avec le même code de couleurs. Le semi-variogramme théorique adopté est représenté avec son équivalent empirique. La distribution des observations indique dans quelle gamme se situent les activités mesurées ce jour-là.

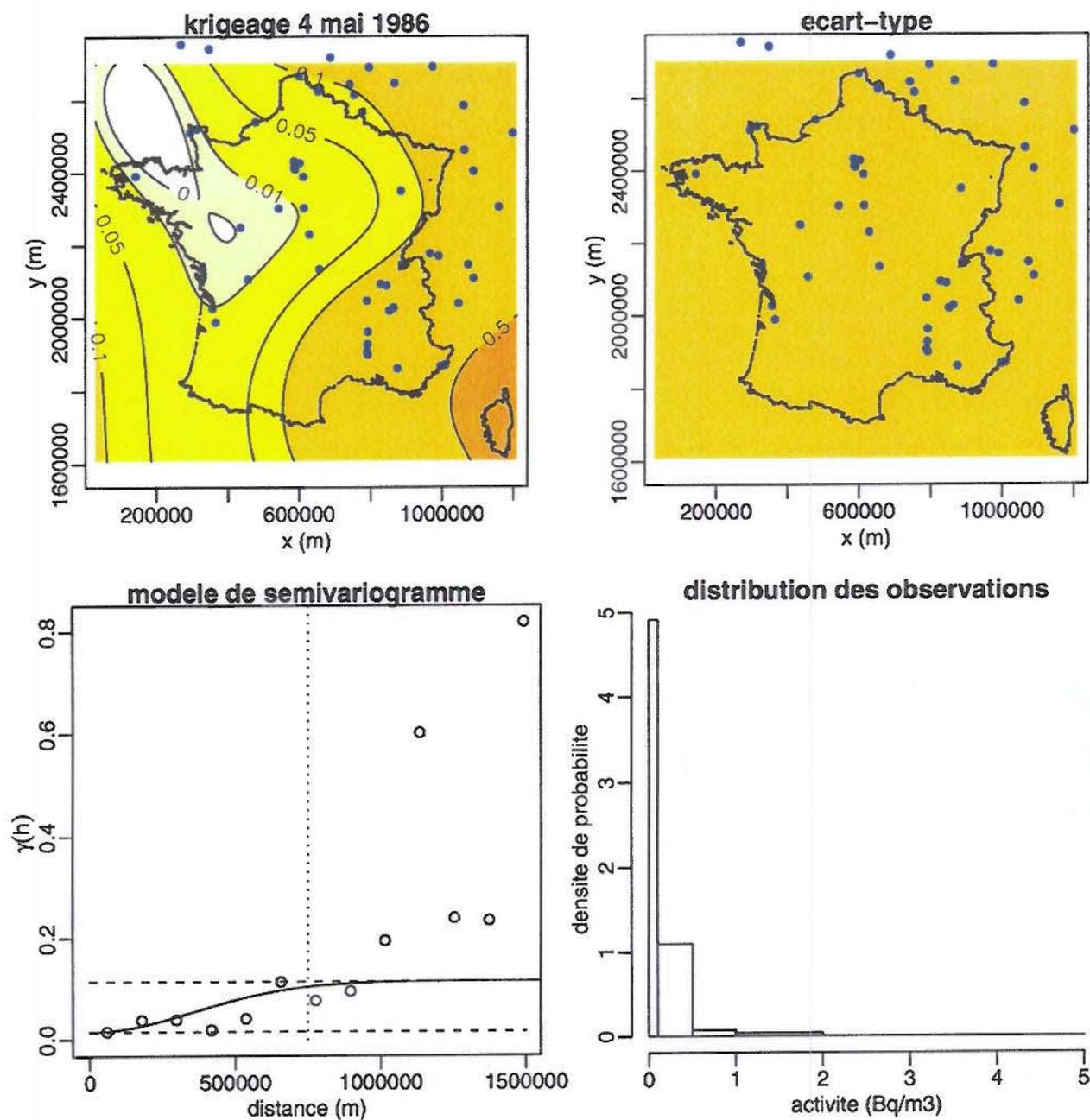


Figure 22.4 - Activités du ^{137}Cs de l'air ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) le 4 mai 1986, interpolées par krigeage ordinaire. Le système de coordonnées x, y (m) est Lambert II étendu. L'écart type des interpolations ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) est représenté avec le même code de couleurs. Le semi-variogramme théorique adopté est représenté avec son équivalent empirique. La distribution des observations indique dans quelle gamme se situent les activités mesurées ce jour-là.

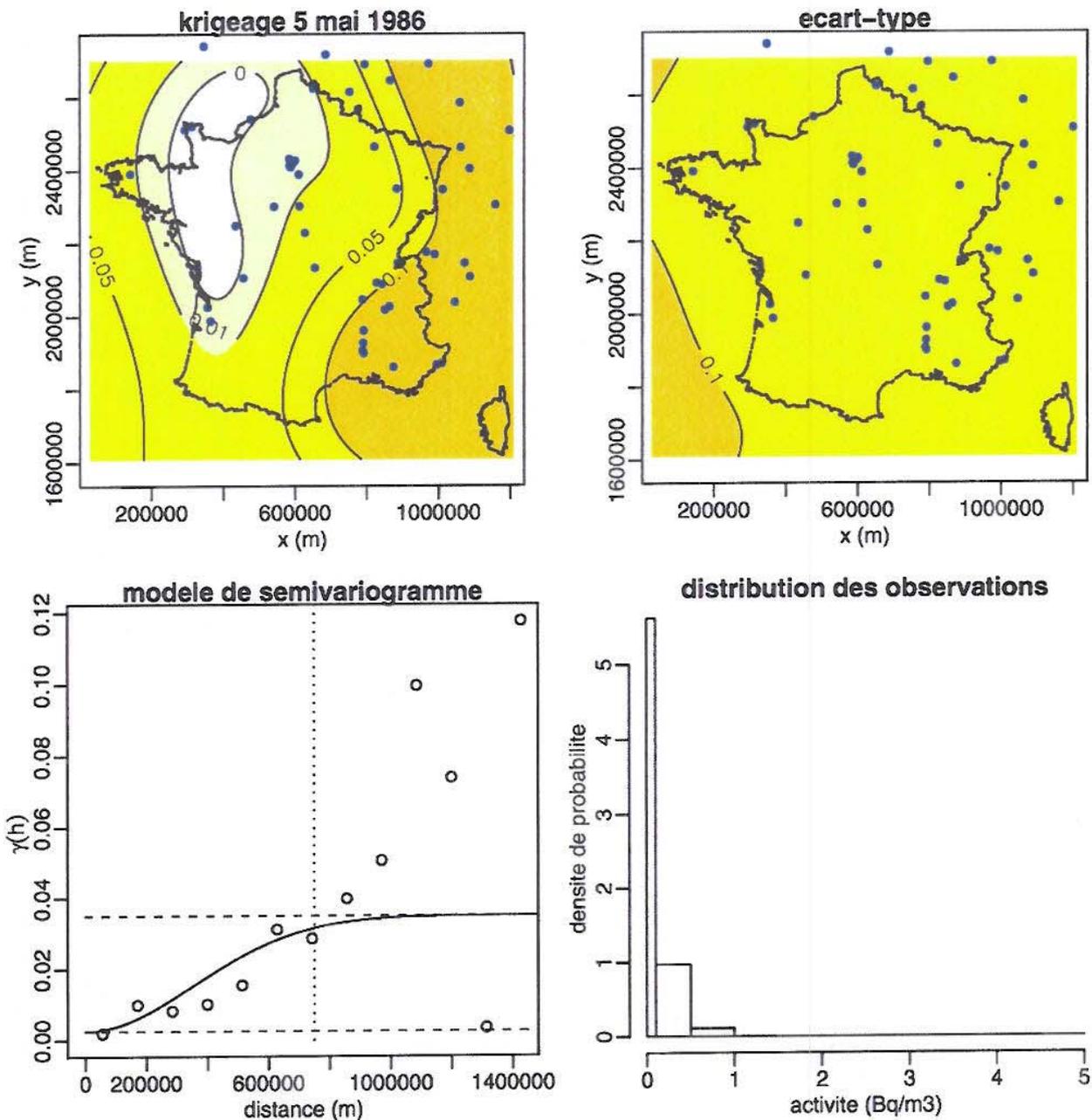


Figure 22.5. Activités du ^{137}Cs de l'air ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) le 5 mai 1986, interpolées par krigeage ordinaire. Le système de coordonnées x, y (m) est Lambert II étendu. L'écart type des interpolations ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) est représenté avec le même code de couleurs. Le semi-variogramme théorique adopté est représenté avec son équivalent empirique. La distribution des observations indique dans quelle gamme se situent les activités mesurées ce jour-là.

3.3.6 CONCLUSION SUR LA REPRÉSENTATIVITÉ DES ACTIVITÉS DE L'AIR INTERPOLÉES

Un des objectifs de cette étude est la normalisation de la relation pluie-dépôt par l'activité de l'air lors des pluies à l'aide de l'équation 3. L'analyse précédente montre que malheureusement, l'activité de l'air interpolée sur chaque site pour lequel on dispose d'une valeur de D_i , n'est probablement que très peu représentative de l'activité de l'air qui a engendré l'activité des gouttes de pluie et donc les dépôts. Les deux principales raisons en sont la mauvaise représentativité de l'activité de l'air mesurée au niveau du sol par rapport à celle de la colonne d'air parcourue par les gouttes, et d'autre part un nombre insuffisant de points de mesures de l'activité de l'air et leur très mauvaise répartition sur le territoire.

Néanmoins, dans l'esprit de ce travail qui est d'utiliser au maximum les données existantes afin de rendre compte de leur adéquation pour la caractérisation des retombées de l'accident de Tchernobyl, et plus largement d'un quelconque accident en France, nous avons utilisé les valeurs interpolées de l'activité de l'air dans la suite de cette étude, afin d'estimer les paramètres α et β de l'équation 3.

La méthode utilisée, le krigeage ordinaire, rend compte de cette faible représentativité au travers de variogrammes de faibles déterminations, notamment les 4 et 5 mai, qui conduisent à de fortes incertitudes rendant les valeurs interpolées non significatives sur l'ouest de la France les 1 et 2 mai, sur la majeure partie puis sur tout le territoire les 3 et 4 mai. Il faut noter par ailleurs que même lorsque le variogramme est peu satisfaisant, le krigeage reste équivalent à la méthode déterministe de l'inverse du carré de la distance ; méthode qui n'aurait pas permis de quantifier les incertitudes associées aux interpolations.

Ainsi, l'utilisation qui a été faite de ces données est probablement la meilleure envisageable.

La seule possibilité d'améliorer notre connaissance des activités dans l'air en altitude à l'origine des dépôts pluvieux de mai 1986 serait la reconstitution des mouvements des masses d'air par une modélisation basée sur les données météorologiques. Un modèle de ce type est actuellement en cours de développement à l'IRSN.

3.4. HAUTEURS DE PRÉCIPITATIONS QUOTIDIENNES : $P_i(j)$

3.4.1 MESURES DE HAUTEURS DE PRÉCIPITATIONS DISPONIBLES

Le réseau de Météo France était constitué en 1986 de 3675 stations de mesure sur 3656 communes, soit une station pour dix communes ou une par canton, uniformément réparties sur le territoire français métropolitain. Les hauteurs de précipitation cumulées sont mesurées chaque jour (le jour j à 06h00 le lendemain, en temps universel synchronisé). La figure 23 présente les hauteurs de pluies enregistrées les 5 premiers jours de mai 1986.

La figure 24 indique les tendances d'évolution des valeurs des hauteurs de pluies journalières en fonction de la latitude et de la longitude. Ainsi, les journées du 1^{er} et du 5 mai sont caractérisées par la faiblesse générale des précipitations, sur l'ensemble du territoire. Sur la majorité des stations, les précipitations ne dépassent pas 5 mm, même si dans quelques cas, elles peuvent atteindre 10 mm. Les jours de pluies sont donc essentiellement les 2, 3 et 4 mai. Le 2 mai des précipitations supérieures à 10 mm sont observées sur une bande longitudinale comprise entre 0 et -1.5° . Localement, au sein de cet ensemble, les précipitations peuvent atteindre 40 mm, dans le sud-ouest, entre Pau et Mont-de-Marsan.

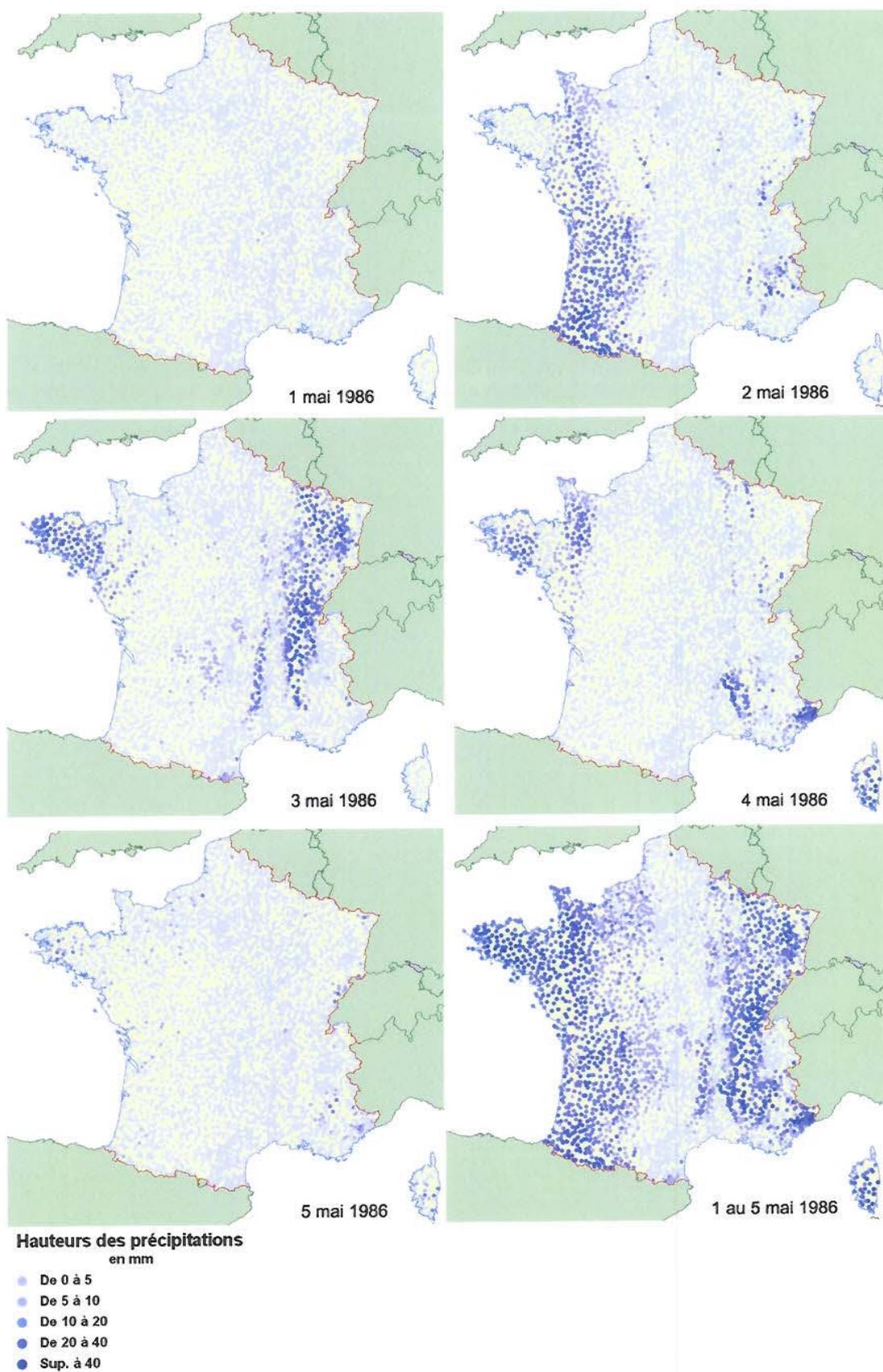


Figure 23 - Cartographie de la répartition des précipitations mesurées par le réseau de surveillance Météo France entre le 1^{er} et le 5 mai 1986

Les jours suivants (3-4 mai), des précipitations comprises entre 10 et 40 mm se manifestent en Bretagne. Le tiers est de la France est également touché pendant cette période. Ainsi, le 3 mai, sur la Lorraine, les Vosges, la Franche-Comté et la Vallée du Rhône, les précipitations atteignent 20 mm et dépassent localement 40 mm. De tels niveaux de précipitations perdurent le 4 mai sur la basse vallée du Rhône et apparaissent sur l'arrière pays niçois, le sud et l'est de la Corse.

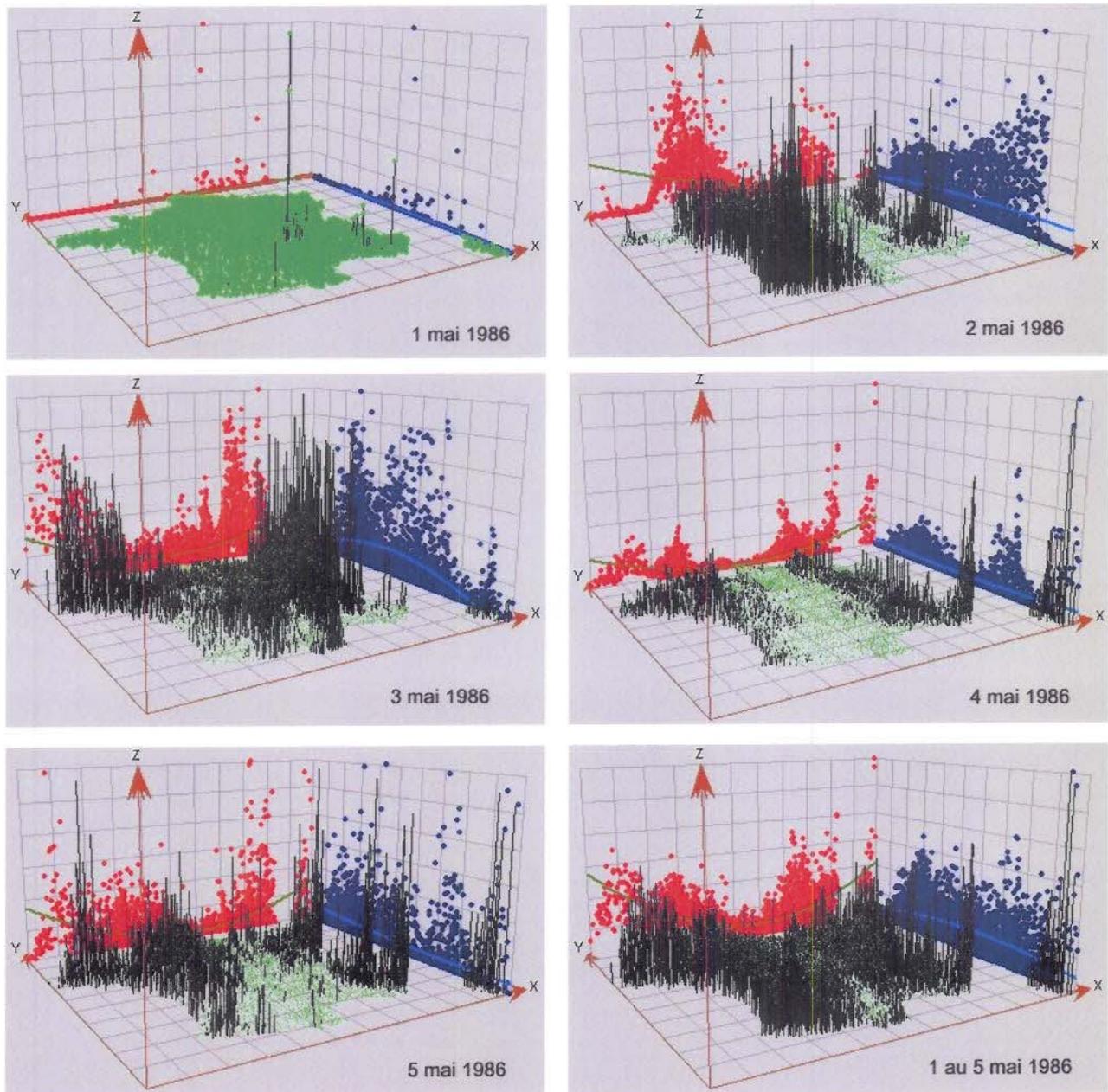


Figure 24 - Tendances des hauteurs de pluies journalières (z) en fonction de la latitude (y) et de la longitude(x)

3.4.2 REPRÉSENTATIVITÉ DES HAUTEURS DE PLUIE INTERPOLÉES

La figure 25 présente les polygones d'influence de chaque station de Météo-France. Leur taille est très satisfaisante à l'échelle qui nous intéresse. Paradoxalement, cette couverture complète et dense du territoire ne nous permet pas d'envisager l'utilisation d'une méthode géostatistique comme le krigeage. Le problème est

inverse du cas précédent des activités de l'air pour lesquels le nombre de point a été trop faible ; dans ce cas, le nombre de points est trop élevé. En effet, même avec de très puissants calculateurs, un krigeage ordinaire est difficilement réalisable pour plus de 300 sites d'observation ; le variogramme est en effet construit par $(n*(n-1))/2$ points, ce qui donnerait près de 7000000 de points pour 3656 sites. Pour pouvoir identifier les hauteurs de pluies journalières au droit des sites où ont été mesurés les dépôts, les hauteurs de pluies, affectées au centre des communes sur lesquelles la mesure a été faite, ont été interpolées en utilisant une méthode déterministe, la méthode linéaire lissée (méthode d'Akima) réalisée avec l'outil Vertical Mapper TM sous le logiciel de SIG MapInfo7.5. Compte tenu du nombre de points, les autres méthodes déterministes auraient conduit à des résultats très proches.

Il faut cependant noter que l'hétérogénéité des précipitations est extrêmement importante. Les 3 et 4 mai notamment, des stations situées à quelques kilomètres les unes des autres ont pu recevoir des hauteurs de pluies très différentes ; à titre d'exemple, les 7 stations météorologiques situées dans un rayon de 15 km autour d'Avignon indiquent des cumuls de pluie du 1^{er} au 5 mai 1986 variant de 1,6 mm à 17,2 mm, soit plus d'un facteur 10 d'écart . Par ailleurs, même s'il apparaît une bonne continuité spatiale des gradients de précipitations, il est possible qu'entre deux stations, l'intensité des pluies soit significativement plus faible ou plus forte que celle enregistrée. Un cas extrême pourrait être de très faibles, voire une absence de précipitations, très localement au voisinage de stations où les pluies ont dépassé 40 mm (régime de giboulée ou d'averses orageuses).

Compte tenu de l'importance de ce paramètre explicatif dans le modèle puis dans son application, cette incertitude à très petite échelle constitue un facteur limitant en vue d'une estimation des dépôts sur un territoire de petite taille (de l'ordre du canton). Cela était déjà le cas pour la cartographie des dépôts de ¹³⁷Cs établie en 2003 par l'IRSN, ce qui avait conduit à limiter l'échelle de lecture de cette carte au 1/1000000^{ième} ou 1/500000^{ième} (Renaud et al 2004), c'est-à-dire au niveau de la France entière.

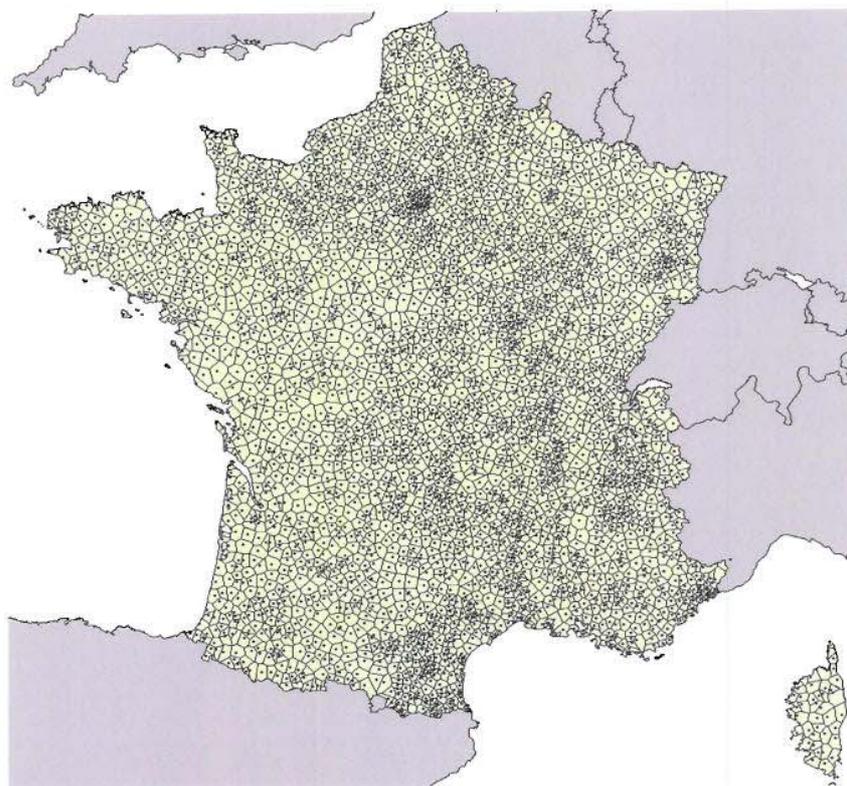


Figure 25 - Polygones d'influence des différents sites d'observations des hauteurs de pluies

4. DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES α ET β

4.1. MÉTHODES DE DÉTERMINATION

La relation (3) de formation du dépôt et plusieurs de ses variantes ont été étudiées à l'aide des données retenues dans le cadre du modèle linéaire (cf. annexe 4). Cette approche statistique est une généralisation de la régression linéaire simple à plusieurs variables explicatives quantitatives (ici les pluies et les activités volumiques) et/ou qualitatives (ici le jour, la région...). De façon pratique, les coefficients des modèles ont été estimés par la méthode des moindres carrés.

4.2. APPLICATION AUX DONNÉES SÉLECTIONNÉES

Cinq relations de dépôt déduites de la relation (3) ont été étudiées. Elles correspondent au modèle original (relation (3)) et à quelques formulations alternatives dérivées. Le modèle *original* comprend deux termes simplifiés de dépôt humide et de dépôt sec :

$$(1) D_i - R_i = \alpha [\sum C_i(j)P_i(j)] + \beta [\sum C_i(j)] + \varepsilon_i$$

Le modèle *avec déphasage* suppose que le dépôt humide est lié à la pluie du jour et à la contamination atmosphérique de la veille :

$$(2) D_i - R_i = \alpha_1 [\sum C_i(j)P_i(j)] + \alpha_2 [\sum C_i(j-1)P_i(j)] + \beta [\sum C_i(j)] + \varepsilon_i$$

Le modèle *avec effet temps* suppose qu'intervient un coefficient de lessivage humide différent chaque jour (du 1er au 5 mai 1986) :

$$(3) D_i - R_i = [\sum \alpha_j C_i(j)P_i(j)] + \beta [\sum C_i(j)] + \varepsilon_i$$

Le modèle *avec facteur correctif* suppose qu'il existe un biais systématique dans le terme R_i , et introduit donc un facteur correctif :

$$(4) D_i = \alpha [\sum C_i(j)P_i(j)] + \beta [\sum C_i(j)] + \delta R_i + \varepsilon_i$$

Le modèle *avec effet région* suppose que les coefficients de dépôt sec et humide dépendent d'un facteur qualitatif « région ». Les trois régions françaises considérées (Ouest, Nord-Est et Sud-Est) sont délimitées par la latitude 46° et la longitude 4° :

$$(5) D_i - R_i | (\text{région}=r) = \alpha_r [\sum C_i(j)P_i(j)] + \beta_r [\sum C_i(j)] + \varepsilon_i$$

Ces relations ont été ajustées en utilisant seulement les données retenues (58 sites), conformément à la démarche expliquée au paragraphe 3.1.

Pour chaque modèle, 4 graphiques ont été produits pour juger de l'ajustement et des hypothèses concernant les résidus. Les ajustements supposent que les résidus sont nuls en moyenne, indépendants et de même variance, et qu'ils ont une distribution normale (cf. annexe 4). Ces graphiques montrent que ces hypothèses sont satisfaites (figures 26.1 à 26.5). Quel que soit le modèle, les résidus sont centrés et ont à peu près la même dispersion dans toute la gamme d'observation (cf. graphes *Residuals vs Fitted*). Par ailleurs, les diagrammes de Henri sont proches d'une droite (cf. graphes *Normal QQ-plot*). Les résidus ont donc une distribution proche de la loi normale.

Les résultats quantitatifs de chaque modèle sont reproduits dans des tables et commentés dans les paragraphes suivants :

- la composante déterministe de chaque modèle est quantifiée par les coefficients estimés et leur écart type, permettant de juger si ces coefficients sont significatifs. Dans un cadre statistique, c'est le test t de Student qui permet de tester la nullité d'un coefficient. À chaque statistique t calculée correspond un niveau de signification Pr. Plus ce niveau Pr est faible, plus le coefficient est significatif (i.e. non nul). Classiquement, on dit qu'un paramètre est significatif dès que son niveau de signification Pr est inférieur à 5% ;
- la composante aléatoire de chaque modèle est quantifiée par l'écart type estimé (s), indiquant la part du dépôt (Bq.m⁻²) qui n'est pas expliquée ;
- les coefficients estimés par la méthode des moindres carrés sont biaisés s'il existe une corrélation significative entre les résidus et une des variables explicatives (cf. annexe 4). Toutes les corrélations ont donc été calculées, ainsi que leur niveau de signification Pr. Plus ce niveau Pr est faible, plus la corrélation sera significative (i.e. non nulle). Ici aussi, une valeur seuil de 5% est classiquement utilisée.

4.2.1 LE MODÈLE ORIGINAL (1)

Coefficient	Estimation	Écart type	t (Student)	Pr
α	1190 m ³ .l ⁻¹	76 m ³ .l ⁻¹	15.646	<2e-16
β	240 m	352 m	0.683	0.497

s = 4218 Bq.m⁻²

p = 2 paramètres

Corrélation	Estimation	Pr
($\Sigma C(j)P(j), \epsilon$)	-0.14	0.281
($\Sigma C(j), \epsilon$)	-0.32	0.014

L'inventaire au sol s'explique avant tout par le processus de dépôt humide. Le coefficient α est très significatif et, à l'inverse, β ne l'est pas du tout. La variable $\Sigma C_i(j)P_i(j)$ apparaît comme la plus pertinente pour décrire l'activité surfacique du ¹³⁷Cs mesuré dans le sol. Par ailleurs, la valeur du coefficient β est biaisée du fait d'une corrélation significative entre les résidus et la variable $\Sigma C(j)$.

4.2.2 LE MODÈLE AVEC DÉPHASAGE (2)

Coefficient	Estimation	Écart type	t (Student)	Pr
α_1	1039 m ³ .l ⁻¹	133 m ³ .l ⁻¹	7.788	1.93e-10
α_2	136 m ³ .l ⁻¹	98 m ³ .l ⁻¹	1.379	0.173
β	-44 m	40	-0.108	0.914

s = 4185 Bq.m⁻² p = 3 paramètres

Corrélation	Estimation	Pr
$(\Sigma C(j)P(j), \varepsilon)$	-0.15	0.255
$(\Sigma C(j-1)P(j), \varepsilon)$	-0.18	0.182
$(\Sigma C(j), \varepsilon)$	-0.34	0.009

Le déphasage n'améliore pas la description du dépôt humide. Le coefficient α_2 - associé à la variable $\Sigma C_i(j-1)P_i(j)$ - n'est pas significatif alors que α_1 l'est beaucoup. Par ailleurs, la valeur du coefficient β est biaisée du fait d'une corrélation significative entre les résidus et la variable $\Sigma C(j)$.

4.2.3 LE MODÈLE AVEC EFFET TEMPS (3)

Coefficient	Estimation	Écart type	t (Student)	Pr
$\alpha_{1\text{mai}}$	1065 m ³ .l ⁻¹	1617 m ³ .l ⁻¹	0.659	0.513
$\alpha_{2\text{mai}}$	1488 m ³ .l ⁻¹	157 m ³ .l ⁻¹	9.492	6.09e-13
$\alpha_{3\text{mai}}$	930 m ³ .l ⁻¹	117 m ³ .l ⁻¹	7.924	1.68e-10
$\alpha_{4\text{mai}}$	2035 m ³ .l ⁻¹	332 m ³ .l ⁻¹	6.126	1.22e-07
$\alpha_{5\text{mai}}$	-1484 m ³ .l ⁻¹	1394 m ³ .l ⁻¹	-1.064	0.292
β	-53 m	350 m	-0.151	0.880

$s = 3960 \text{ Bq.m}^{-2}$

$p = 6$ paramètres

Corrélation	Estimation	Pr
$(C(1\text{mai})P(1\text{mai}), \varepsilon)$	-0.06	0.643
$(C(2\text{mai})P(2\text{mai}), \varepsilon)$	-0.06	0.631
$(C(3\text{mai})P(3\text{mai}), \varepsilon)$	-0.20	0.123
$(C(4\text{mai})P(4\text{mai}), \varepsilon)$	-0.14	0.291
$(C(5\text{mai})P(5\text{mai}), \varepsilon)$	-0.10	0.467
$(\Sigma C(j), \varepsilon)$	-0.34	0.010

Cet ajustement suggère des variations temporelles du processus de dépôt humide. Le coefficient α a des valeurs significativement différentes d'un jour à l'autre. Il est non significatif les 1 et 5 mai. Cela correspond aux jours où il a peu plu sur le territoire. Logiquement, ces termes de dépôt humide contribuent à une part peu significative de l'activité au sol. Par ailleurs, la valeur du coefficient β est biaisée du fait d'une corrélation significative entre les résidus et la variable $\Sigma C(j)$.

4.2.4 LE MODÈLE AVEC FACTEUR CORRECTIF (4)

Coefficient	Estimation	Écart type	t (Student)	Pr
α	1084 m ³ .l ⁻¹	72 m ³ .l ⁻¹	14.973	< 2e-16
β	-1169 m	468 m	-2.496	0.0156
δ	2.36	0.34	6.986	3.98e-09

$s = 3740 \text{ Bq.m}^{-2}$

$p = 3$ paramètres

Corrélation	Estimation	Pr
$(\Sigma C(j)P(j), \varepsilon)$	0.02	0.904
$(\Sigma C(j), \varepsilon)$	0.04	0.790
(R, ε)	0.06	0.628

Un biais multiplicatif pour le terme R_i conduit à un ajustement non physique. D'une part, le paramètre δ est estimé à 2,4. Cette valeur supérieure à 1 est « optimiste » car elle réévalue à la hausse (+140%) la contribution des tirs, et donc corrige à la baisse les dépôts liés à l'accident de Tchernobyl. D'autre part, le paramètre β est significativement négatif. Le terme de dépôt sec perd alors tout sens physique.

4.2.5 LE MODÈLE AVEC EFFET RÉGION (5)

Coefficient	Estimation	Écart type	t (Student)	Pr
α_{SE}	1573 m ³ .l ⁻¹	139 m ³ .l ⁻¹	11.314	1.24e-15
α_{NE}	951 m ³ .l ⁻¹	85 m ³ .l ⁻¹	11.185	1.89 e-15
α_O	189 m ³ .l ⁻¹	825 m ³ .l ⁻¹	0.230	0.819331
β_{SE}	-1140 m	456 m	-2.500	0.015606
β_{NE}	2187 m	563 m	3.884	0.000292
β_O	597 m	813 m	0.734	0.466035

$s = 3630 \text{ Bq.m}^{-2}$

$p = 6$ paramètres

Corrélation	Estimation	Pr
$(\Sigma C(j)P(j), \varepsilon)_{SE}$	-0.24	0.469
$(\Sigma C(j)P(j), \varepsilon)_{NE}$	-0.07	0.724
$(\Sigma C(j)P(j), \varepsilon)_O$	-0.09	0.735
$(\Sigma C(j), \varepsilon)_{SE}$	-0.33	0.319
$(\Sigma C(j), \varepsilon)_{NE}$	-0.43	0.017
$(\Sigma C(j), \varepsilon)_O$	-0.11	0.683

Cet ajustement suggère des fluctuations régionales dans les processus de dépôt humide. Ce modèle revient à ajuster le modèle original dans chaque région. Les coefficients α ont des valeurs significativement différentes d'une région à l'autre ($SE > NE > O$). Le coefficient β est non significatif dans l'ouest. Il est non physique dans le sud-est, et est significatif dans le nord-est. Par ailleurs, la valeur du coefficient β est biaisée dans le nord-est du fait d'une corrélation significative entre les résidus et la variable $\Sigma C(j)$.

4.2.6 DISCUSSION DES RÉSULTATS

Détermination des modèles les plus pertinents du point de vue de l'analyse statistique des ajustements :

L'étude comparative des différentes variantes du modèle incite à conserver le modèle original (1) ou éventuellement à adopter les modèles avec effet région (5) et avec effet temps (3). Le modèle original (1) est un cas particulier de chacune des formulations alternatives (2) à (5). On se trouve donc dans le cas de modèles emboîtés (cf. annexe 4). La simple lecture des tests d'hypothèses (tableau ci-dessous) conduirait à préférer les modèles (3), (4) ou (5) au modèle original (1), avec la hiérarchie suivante (5)>(4)>(3). Cependant d'autres arguments modulent ces règles de décision. Le modèle avec facteur correctif (4) s'ajuste bien mais avec des valeurs non physiques pour β et δ . Son utilisation prédictive n'est pas défendable. Le modèle avec effet région (5) utilise un facteur qualitatif « région » défini par des intervalles de latitudes et longitudes. Sa construction par nature arbitraire est discutable, mais elle améliore très significativement l'ajustement.

Modèle restreint	Modèle général	f (Fisher)	Pr	Décision
original (1)	avec déphasage (2)	1.902	0.1734084	modèle (1)
original (1)	avec effet temps (3)	2.889	0.03100827	modèle (3)
original (1)	avec facteur correctif (4)	16.255	0.0001719516	modèle (4)
original (1)	avec effet région (5)	5.908	0.0005368246	modèle (5)

Les trois modèles les plus satisfaisants statistiquement sont donc le modèle original (1), le modèle avec effet temps (3) et celui avec effet région (5).

Degré de signification statistique et physique des paramètres α et β .

Dans le modèle original, la valeur de α est très significative. Il en est de même des valeurs de α_2 , α_3 et α_4 de la variante du le modèle avec effet temps, qui correspondent au jours où les pluies ont été les plus importantes, ainsi que des valeurs de α dans l'est du pays pour la variante du modèle avec effet région. Il en résulte que le terme de dépôts humides est la variable la plus pertinente pour expliquer les activités de ^{137}Cs présentes dans les sols en mai 1986. Pour toutes les variantes du modèles pour lesquelles des valeurs significatives de α ont pu être obtenues, celles-ci vont de 930 à 2050 $\text{m}^3.\text{l}^{-1}$. Ces valeurs sont dans la gamme des valeurs proposées dans la littérature pour les coefficients de lessivage humide, utilisées dans les modèles et observées mensuellement en France depuis 1971 par le SCPRI, l'OPRI et l'IPSN. Ainsi, la moyenne des 220 valeurs du rapport établi mensuellement entre les activités mesurées dans l'air et celles mesurées dans l'eau de pluie à la station OPERA d'Orsay est de 980 $\text{m}^3.\text{l}^{-1}$, proche des valeurs de α obtenues. A partir du début des années 80, on note une tendance à l'augmentation de cette valeur, avec la diminution des activités de ^{137}Cs dans l'air après le dernier essai nucléaire chinois. Ainsi, sur les autres stations OPERA, les moyennes de la période 1998-2004 vont de 1300 $\text{m}^3.\text{l}^{-1}$ à 3800 $\text{m}^3.\text{l}^{-1}$. Les gammes de valeurs proposées dans la littérature sont comparables : 230 - 6600 $\text{m}^3.\text{l}^{-1}$ (Garland et Playford, 1991). Ainsi, malgré les imprécisions inhérentes aux données utilisées (en particulier $C_i(j)$) et

la variabilité inévitable des activités de ^{137}Cs rémanentes dans les sols, induite par des phénomènes sans rapport avec le lessivage humide de l'atmosphère, l'approche employée dans cette étude permet d'accéder à une estimation du coefficient de lessivage humide α qui est à la fois statistiquement significative et cohérente avec les valeurs connues par ailleurs.

Les valeurs de β ne sont jamais significatives sur un plan statistique ou sont biaisées par les données utilisées dans cette étude ($C_i(j)$ principalement). Ceci résulte de la faible contribution du dépôt sec au dépôt total pour les sites sur lesquels le modèle a été obtenu. Souvent négatives, elles n'ont dans ce cas plus de réalité physique. Toutefois, il est intéressant d'observer que la valeur obtenue avec le modèle original (240 m), bien qu'entachée d'une forte imprécision, est physiquement conforme aux valeurs connues pour les aérosols de taille micrométrique ou inférieure : en effet, la vitesse de dépôt sec pour de tels aérosols est comprise entre 10^{-4} et $5 \cdot 10^{-3}$ m/s, ce qui, appliqué à des activités volumiques de l'air intégrées sur une journée (cas du modèle développé dans cette étude), donne des valeurs de β comprises entre 86 et 432 m.

Incertitudes liées à l'application du modèle et ses variantes :

L'écart type résiduel des ajustements (1) à (5) varie de 3630 à 4218 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$. Si on tient également compte de l'écart type des coefficients estimés, introduisant une erreur dans la composante déterministe des modèles, il en résulte que l'application du modèle ou de ses variantes pour évaluer les activités rémanentes dans les sols après mai 1986 conduit à une incertitude de l'ordre de ± 5000 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ au niveau de confiance de 80% et ± 10000 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ au niveau de 95%. Compte tenu des niveaux de dépôts estimés sur la France, compris entre quelques centaines et 40000 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$, il n'est pas envisageable d'obtenir une cartographie des dépôts fiable à ce niveau de 95%. Le degré de confiance que l'on pourra accorder à une carte suffisamment informative des dépôts en France sera donc au maximum de 80%.

Ainsi, bien que l'approche appliquée dans cette étude permette d'accéder aux paramètres du dépôt humide induit par l'accident de Tchernobyl, de façon statistiquement et physiquement significative, et de démontrer la part prépondérante de ce phénomène dans l'explication des dépôts de ^{137}Cs mesurés dans les sols après mai 1986, les modèles de dépôt utilisés dans cette étude sont trop simplificateurs pour une reconstitution précise des dépôts rémanents dans les sols, très variables sur le territoire. En particulier, en dehors de l'activité rémanente des tirs atmosphériques d'armes nucléaires, ces modèles ne considèrent que les phénomènes de retombées atmosphériques consécutifs à l'accident de Tchernobyl et négligent les phénomènes de redistribution au sol du dépôt humide.

Ajustement de la relation originale (1)

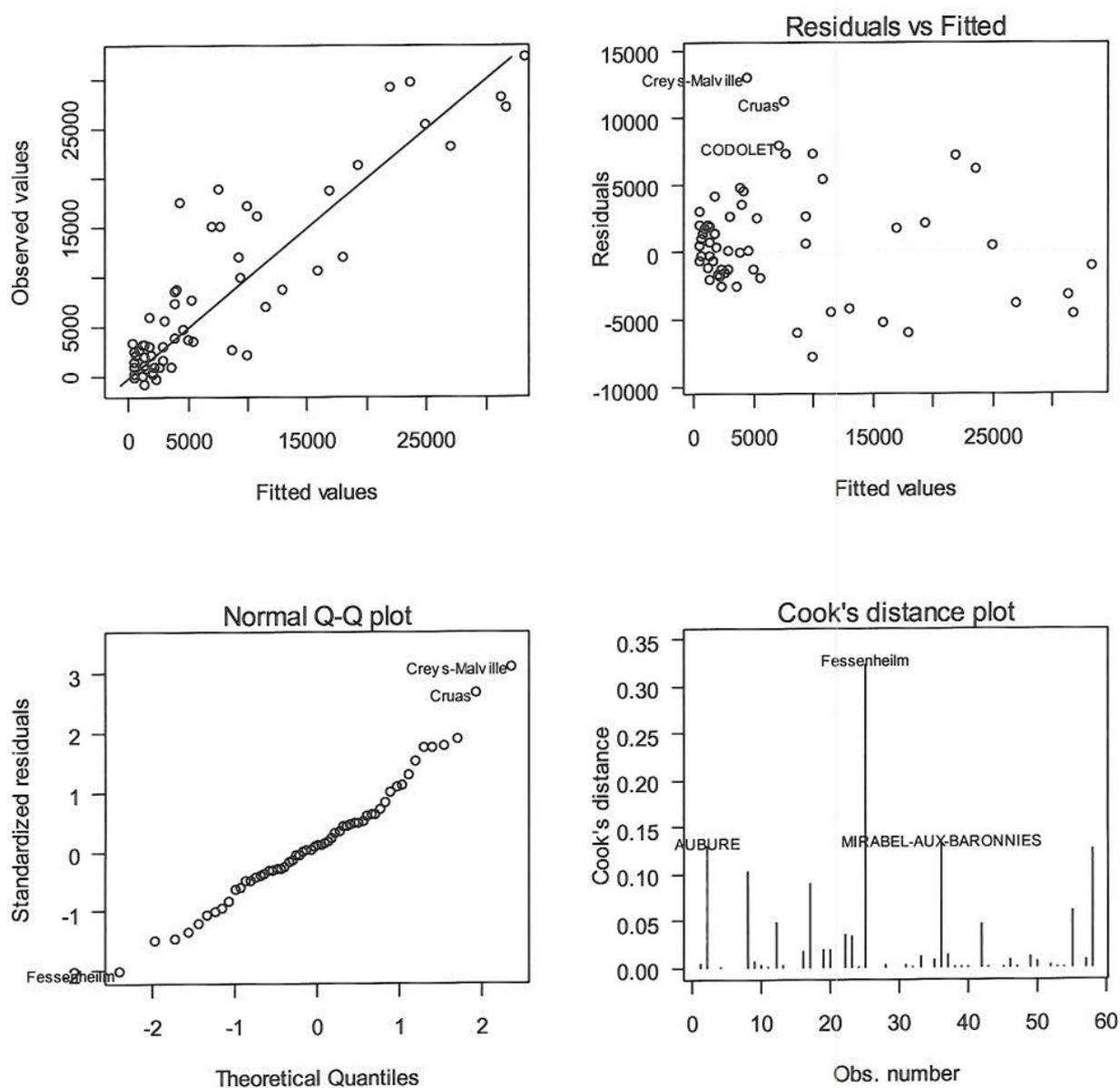


Figure 26.1 - Ajustement du modèle original (1). Les deux premiers graphes représentent les données observées et les résidus du modèle ($Bq.m^2$). Le diagramme de Henri (Normal Q-Q plot) permet de juger la normalité des résidus. La distance de Cook permet de détecter les observations très influentes sur la régression (la distance associée doit être supérieure à 1).

Ajustement de la relation avec déphasage (2)

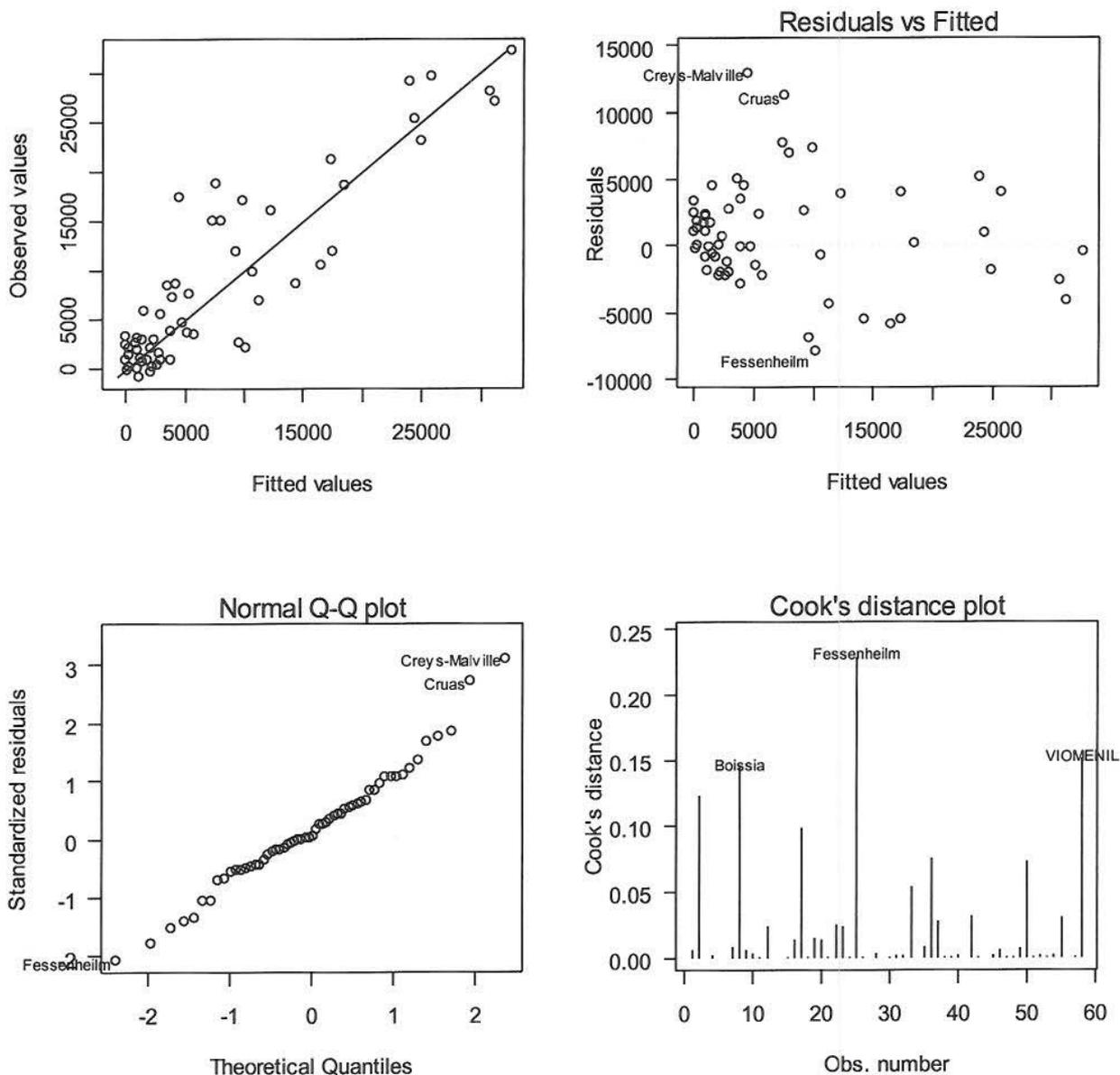


Figure 26.2 - Ajustement du modèle avec déphasage (2). Les deux premiers graphes représentent les données observées et les résidus du modèle ($Bq.m^{-2}$). Le diagramme de Henri (Normal Q-Q plot) permet de juger la normalité des résidus. La distance de Cook permet de détecter les observations très influentes sur la régression (la distance associée doit être supérieure à 1).

Ajustement de la relation avec effet temps (3)

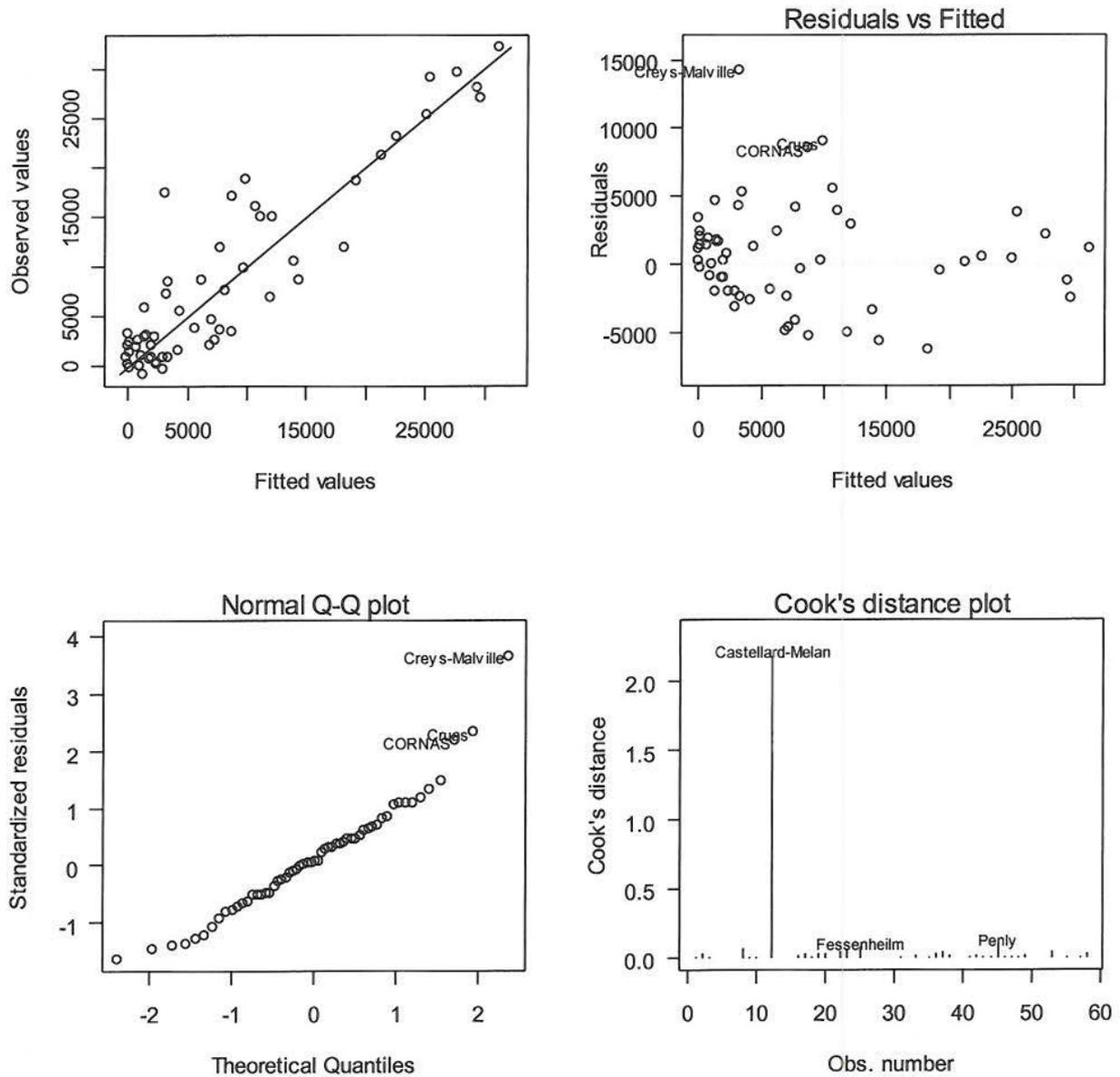


Figure 26.3 - Ajustement du modèle avec effet temps (3). Les deux premiers graphes représentent les données observées et les résidus du modèle ($Bq.m^{-2}$). Le diagramme de Henri (Normal Q-Q plot) permet de juger la normalité des résidus. La distance de Cook permet de détecter les observations très influentes sur la régression (la distance associée doit être supérieure à 1).

Ajustement de la relation avec facteur correctif (4)

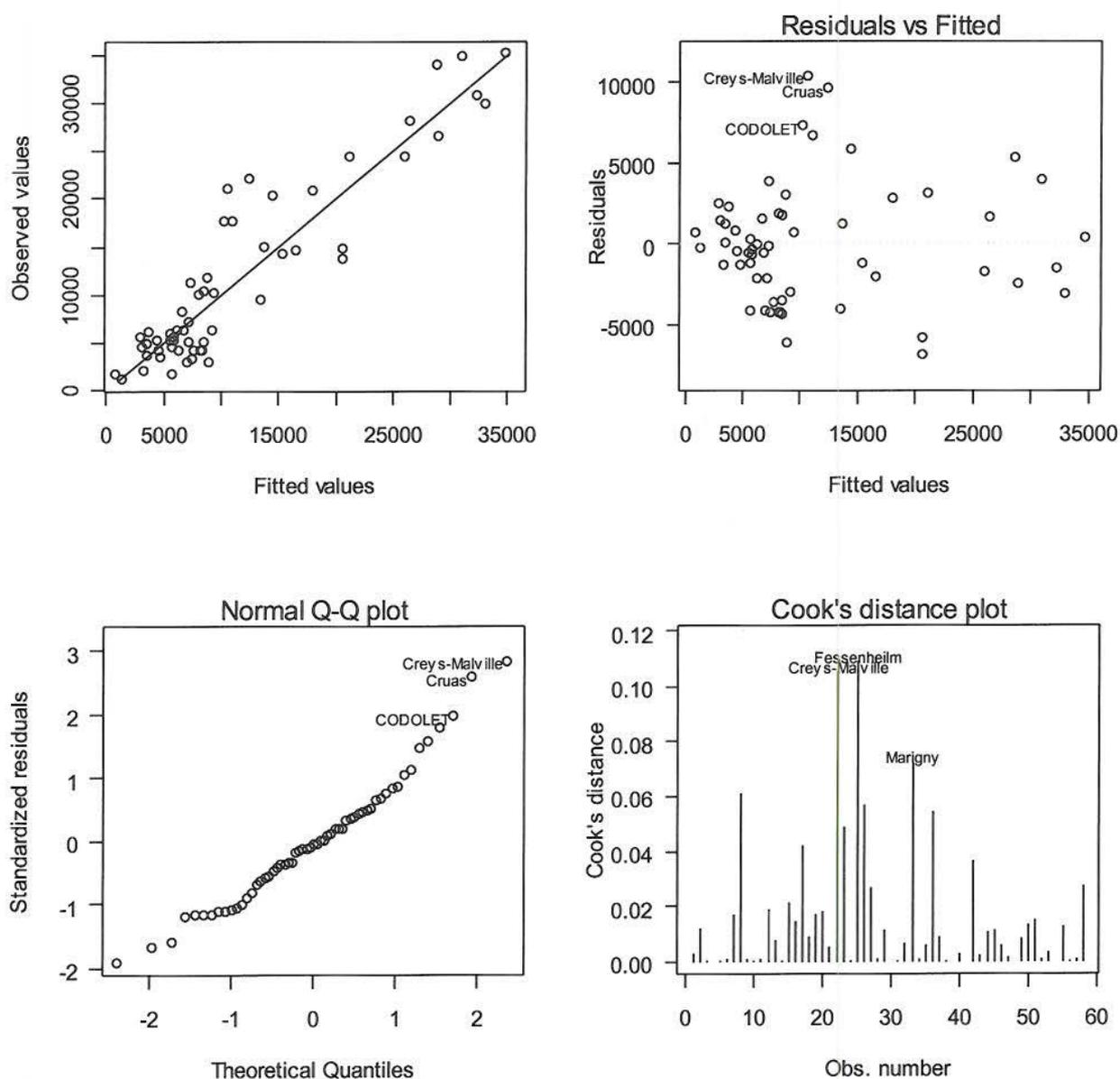


Figure 26.4 - Ajustement du modèle avec facteur correctif (4). Les deux premiers graphes représentent les données observées et les résidus du modèle ($Bq.m^{-2}$). Le diagramme de Henri (Normal Q-Q plot) permet de juger la normalité des résidus. La distance de Cook permet de déceler les observations très influentes sur la régression (la distance associée doit être supérieure à 1).

Ajustement de la relation avec effet region (5)

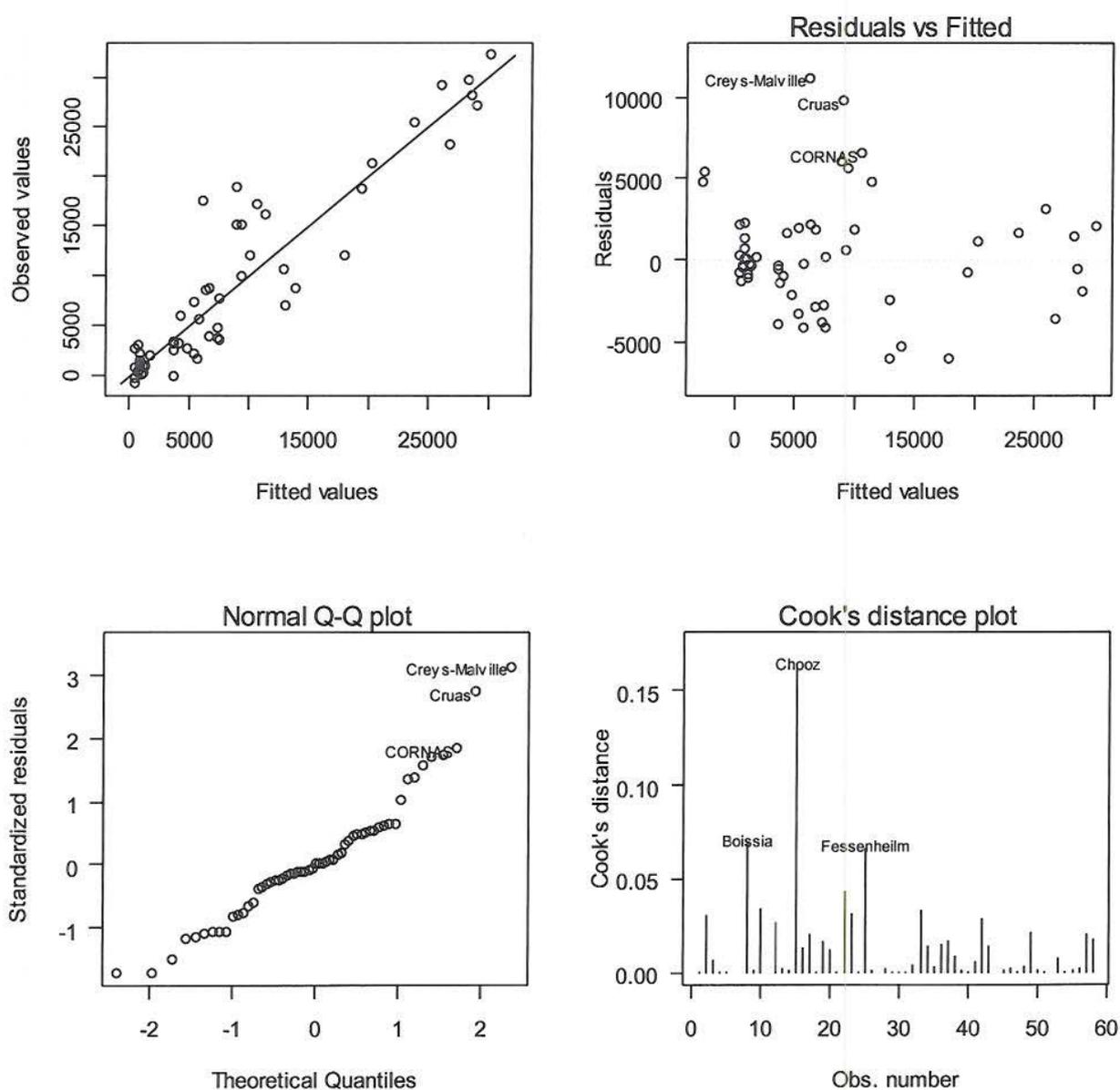


Figure 26.5. Ajustement du modèle avec effet région (5). Les deux premiers graphes représentent les données observées et les résidus du modèle ($Bq.m^{-2}$). Le diagramme de Henri (Normal Q-Q plot) permet de juger la normalité des résidus. La distance de Cook permet de déceler les observations très influentes sur la régression (la distance associée doit être supérieure à 1).

5. APPLICATION DES MODELES ET COMPARAISON AVEC LES MESURES DANS LES SOLS

Deux approches différentes permettent la reconstitution des retombées atmosphériques en France consécutives à l'accident de Tchernobyl (cumul des dépôts secs et humides = « dépôt atmosphérique total » (DAT) ; cf. figure 1 du § 2.1), en un point i donné :

- l'approche empirique développée dans les travaux antérieurs de l'IRSN, conduisant à deux équations applicables de part et d'autre de longitude 4° Est (cf. équations (1') et 2 du § 2.2) :

$$DAT_i = 560 \times \sum_j (P_i(j)) + 1000, \text{ à l'est de la longitude } 4^\circ \text{ Est,} \quad (6)$$

$$DAT_i = (560 \times \sum_j (P_i(j)) + 1000) \times e^{(0,43 \times (Long_i - 4))}, \text{ à l'ouest de la longitude } 4^\circ \text{ Est,} \quad (7)$$

j variant du 1^{er} au 5 mai 1986 ;

- et l'approche analytique de la présente étude, à l'aide de l'équation dérivée de la relation (3) :

$$DAT_i = \alpha \times \sum_j (C_i(j) \times P_i(j)) + \beta \times \sum_j C_i(j), \text{ } j \text{ variant du 1}^\text{er} \text{ au 5 mai 1986} \quad (8)$$

En ajoutant à la valeur de DAT_i ainsi calculée, celle de R_i estimée à l'aide de la relation de Mitchell, on en déduit l'activité rémanente dans les sols en mai 1986 (D_i) à comparer avec les valeurs mesurées.

Ainsi, la figure 27 permet la comparaison des activités D_i prédites par les deux approches (2005 et 2003) avec les mesures dans les sols sur les 58 sites sélectionnés pour la détermination des paramètres α et β dans cette étude ; c'est le modèle original (1) et ses variantes avec effet région (5) et effet temps (3) qui sont utilisés pour estimer les DAT_i selon l'équation 8. Cette figure montre que les estimations obtenues selon les différentes variantes de l'approche analytique ne peuvent pas être différenciées de celles obtenue à l'aide de la relation empirique de 2003. En effet, bien que les prédictions soient numériquement différentes, elles ne sont pas distinguables statistiquement, compte tenu de l'incertitude attachée aux résultats des calculs estimée à $\pm 5000 \text{ Bq.m}^{-2}$ au niveau de confiance de 80%.

La figure 28 présente le même type de comparaison mais élargie à l'ensemble des données D_i disponibles, y compris celles écartées lors de la sélection des données utilisée pour établir les paramètres α et β . Cette confrontation ne change pas les conclusions précédentes, mais montre une augmentation de la dispersion des points autour des droites de tendance, tout particulièrement avec le modèle analytique. Cette dispersion peut être interprétée comme le résultat cumulé de la variabilité (représentativité) des D_i , elle-même liée à des processus concomitants ou postérieurs aux dépôts qui ont altéré le « signal » initial de du phénomène de retombées atmosphériques, et de l'imprécision des données utilisées dans les modèles, notamment les $C_i(j)$ (particulièrement dans le cas du modèle analytique). Malgré cette forte dispersion des points, il apparaît que les courbes de tendance des valeurs estimées selon les deux modèles restent proches entre elles, et sont elles-même voisines de la droite d'ajustement idéal des mesures. En aucune façon on observe une tendance significative à la surestimation ou à la sous-estimation des valeurs mesurées à l'aide de l'un ou l'autre des modèles.

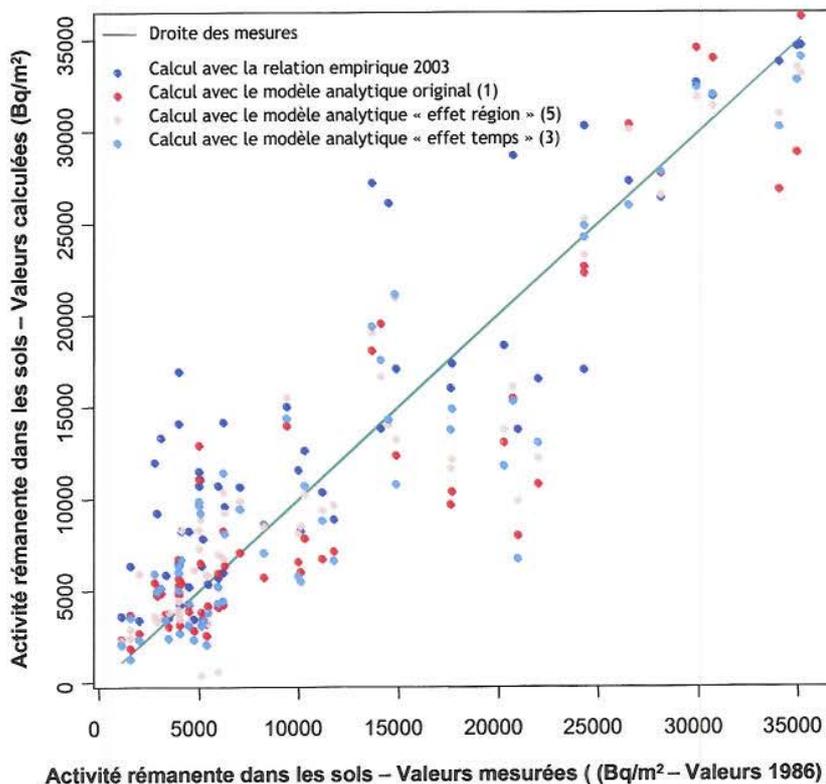


Figure 27 - Comparaison des valeurs calculées et mesurées de l'activité du ^{137}Cs rémanente dans les sols en mai 1986, pour différents modèles appliqués aux 58 sites sélectionnées pour l'étude. La ligne verte, correspondant aux mesures, matérialise la droite de parfait ajustement. Quand les points sont au-dessus (respectivement en dessous) de cette droite, le modèle surestime (respectivement sous-estime) le dépôt rémanent réel.

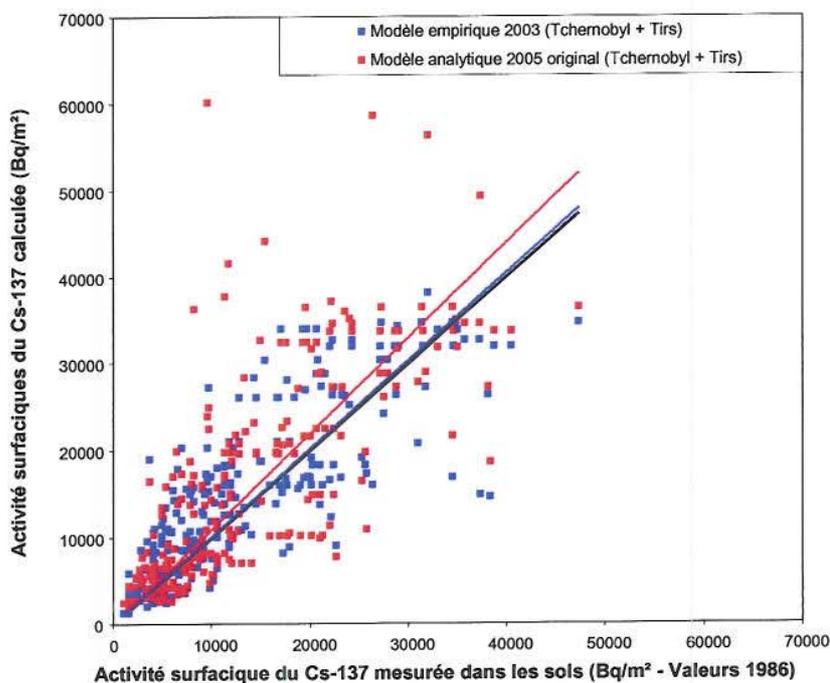


Figure 28 - Comparaison des valeurs calculées de l'activité du ^{137}Cs rémanente dans les sols en mai 1986 et des 237 valeurs mesurées inventoriées dans la présente étude. Pour chacun des deux modèles utilisés (modèle empirique 2003 et modèle analytique original), les droites de tendance sont représentées respectivement en bleu et en rouge.

Ainsi, malgré la sophistication de l'approche et la prise en compte d'un nombre de données plus important, cette étude montre qu'aucune précision accrue n'a vraiment été apportée dans la reconstitution du dépôt rémanent de ^{137}Cs dans les sols. La valeur ajoutée potentielle des nouveaux ajustements a certainement été masquée par l'insuffisance de certaines des données introduites (par ailleurs largement discutée dans les différentes parties de ce rapport).

En ce qui concerne la reconstitution spécifique des retombées atmosphériques consécutives à l'accident de Tchernobyl, la figure 29 confirme la cohérence globale entre les estimations obtenues à l'aide de la relation empirique de 2003 et le modèle analytique original de la présente étude.

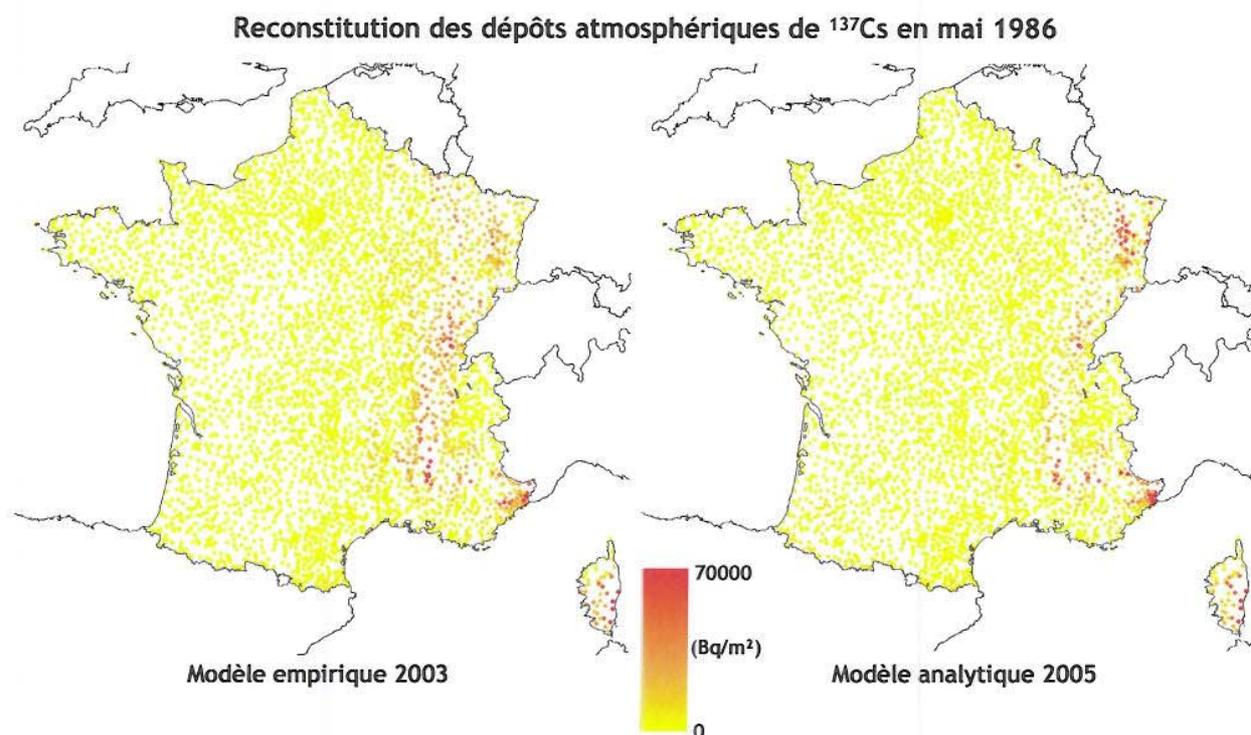


Figure 29 - Comparaison des dépôts atmosphériques totaux consécutifs à l'accident de Tchernobyl, estimés avec les modèles de 2003 et de 2005. L'estimation des dépôts de césium 137 est donnée avec un degré de confiance de 80% dans l'intervalle de $\pm 5000 \text{ Bq.m}^{-2}$

Pour 3451 stations, soit 94% des stations du réseau de Météo-France, les écarts entre les estimations des deux modèles sont inférieurs à 5000 Bq.m^{-2} . Parmi ces stations, 2809, soit 77% du nombre total des stations, présentent des écarts entre modèles inférieurs à 2000 Bq.m^{-2} . Compte tenu des incertitudes déterminées précédemment, les écarts observés entre les résultats de ces deux modèles, dans la grande majorité des points où ils ont été appliqués, ne peuvent être considérés comme significatifs. Cette observation confirme qu'il n'est pas possible de différencier les résultats fournis par ces deux modèles. En tendance spatiale indicative, et toujours pour des écarts inférieurs à 5000 Bq.m^{-2} , le modèle de 2005 fournit des résultats supérieurs à ceux du modèle de 2003 à l'ouest, notamment dans le sud-ouest. Inversement, dans une partie importante de l'est du pays, le modèle de 2003 donne généralement des estimations plus élevées. Cependant, pour 8 stations de l'extrême est du pays (Vosges et Alsace) et dans l'arrière pays niçois, le modèle de 2005 fournit des estimations de plus de 20000 Bq.m^{-2} supérieures à celles du modèle de 2003. Ces écarts importants, bien que peu nombreux, peuvent être expliqués par le fait que le modèle de 2003 est basé sur l'hypothèse d'une activité homogène des masses d'air en moyenne entre le 1^{er} et le 5 mai 1986, voisine de 1 Bq.m^{-3} , alors que sur ces quelques stations où l'estimation par le modèle 2005 donne un résultat significativement plus élevé, les pluies à l'origine du dépôt sont survenues au moment où

les activités dans l'air étaient beaucoup plus élevées, notamment le 2 mai 1986, créant ainsi une conjonction des valeurs extrêmes des données utilisées dans le modèle analytique de 2005. Compte tenu de l'imprécision des données utilisées, il n'est pas certain que ces cas singuliers obtenus à l'aide du modèle analytique de 2005 correspondent à une réalité locale mesurable.

6. CONCLUSION

Les travaux présentés dans ce rapport permettent de tirer deux ensembles de conclusions : le premier porte sur la reconstitution des dépôts de ^{137}Cs induits par l'accident de Tchernobyl ; le second porte sur l'amélioration des méthodes d'évaluation des conséquences post-accidentelles résultant de retombées atmosphériques de polluants radioactifs.

6.1. RECONSTITUTION DES DÉPÔTS DE ^{137}Cs INDUITS PAR L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL

L'approche retenue dans cette étude, fondée sur une formulation analytique générale de l'activité surfacique mesurable dans les sols après l'accident de Tchernobyl, a nécessité un important travail de recueil, d'évaluation et d'interprétation des données nécessaires à l'étude, à savoir les dépôts de ^{137}Cs mesurés dans les sols (D_i), l'activité volumique moyenne quotidienne de ce radionucléide dans l'air, à proximité du sol ($C_i(j)$ entre le 1^{er} et le 5 mai 1986), les hauteurs des précipitations quotidiennes entre le 1^{er} et le 5 mai 1986 ($P_i(j)$) et l'activité surfacique résiduelle provenant des retombées des essais d'armes nucléaires (R_i). Les principales conclusions suivantes sont retirées :

- concernant les mesures d'activité surfacique du ^{137}Cs dans les sols : seules les mesures acquises en laboratoire sur des échantillons prélevés dans des conditions maîtrisées ont été considérées. Ainsi, 237 valeurs ont été collectées pour l'étude, obtenues à des périodes variables entre 1986 et 2005. Compte tenu des phénomènes de redistribution du ^{137}Cs contemporains ou postérieurs au dépôt, une sélection de ces données a été faite pour ne retenir que celles qui assurent la meilleure représentativité du phénomène de dépôt atmosphérique. Malgré ces précautions, les 139 valeurs de D_i réparties sur 58 sites distincts sélectionnés ne représentent qu'une image imparfaite des dépôts atmosphériques initiaux. Pour les sites où plusieurs valeurs de D_i sont disponibles, c'est la valeur moyenne qui a été attribuée, afin d'améliorer la représentativité au regard de la variabilité locale du dépôt, non accessible par la relation analytique et les données retenues pour cette étude. Bien qu'en apparence limité, ce nombre de données est suffisant pour les besoins de l'étude et porte sur une gamme de variation du dépôt représentative à l'échelle de la France, comprise entre 1125 et 35117 Bq/m². Cette gamme est analogue à celle observée en basse vallée du Rhône, zone retenue pour établir la relation empirique pluie-dépôt ayant conduit à la carte publiée en 2003 par l'IRSN. On notera toutefois une représentation insuffisante de la moitié ouest du territoire, avec une quinzaine de sites ;
- concernant l'activité volumique moyenne quotidienne du ^{137}Cs dans l'air : sur l'ensemble du territoire français, des valeurs mesurées ne sont disponibles que sur 39 sites, correspondant principalement aux sites nucléaires ; outre leur faible nombre, ces sites sont mal répartis sur le territoire, laissant de vastes zones (sud-ouest notamment) non couvertes par des mesures. Par conséquent, la détermination des

valeurs de $C_i(j)$ n'a été possible que par interpolation des valeurs mesurées, selon une méthode de krigeage donnant une estimation des incertitudes. Afin de consolider l'estimation sur l'ensemble du territoire, cette méthode a nécessité la prise en compte de mesures de contamination de l'air disponibles dans les pays frontaliers. Au final, même s'il est possible de déterminer une valeur d'activité volumique du ^{137}Cs dans l'air en chacun des 58 sites où D_i est connu, cette estimation est très imprécise, particulièrement aux faibles valeurs (en dessous de $0,1 \text{ Bq/m}^3$, c'est-à-dire principalement à l'ouest de la France, l'estimation doit être considérée comme non significative) ;

- concernant l'activité résiduelle héritée des essais d'armes atomiques en atmosphère : rares sont les sites où l'activité résiduelle du ^{137}Cs dans les sols était mesurée juste avant l'accident de Tchernobyl (stations de référence du SCPRI). Par conséquent, seules des méthodes indirectes ont permis d'accéder aux valeurs de R_i , basées sur les travaux récents menés par l'IRSN. La méthode la plus robuste repose sur la corrélation entre l'activité déposée et l'importance des précipitations moyennes annuelles ; sauf cas particulier, il s'agit de la méthode privilégiée pour estimer R_i . Le plus souvent, cette valeur se situe en dessous de 3000 Bq/m^2 et dépasse rarement 5000 Bq/m^2 (zones montagneuses). La principale source d'incertitude sur ce terme concerne la part de ce dépôt effectivement présent dans les échantillons de sol prélevés à des profondeurs plus ou moins importantes. Cette incertitude peut peser sensiblement dans les parties du territoire où les retombées de l'accident de Tchernobyl ont été faibles (de l'ordre de quelques milliers de Bq/m^2), mais elle est d'une moindre importance dans les zones où ces retombées ont été plus importantes ;
- Concernant les hauteurs quotidiennes de pluie tombée entre le 1^{er} et le 5 mai 1986 : les hauteurs de précipitation quotidienne entre le 1^{er} et le 5 mai 1986 sont connues à l'échelle de la France entière sur près de 3700 stations de mesures météorologiques, ce qui représente une densité d'information très satisfaisante. Dans un tel cas, l'interpolation des valeurs mesurées par une méthode déterministe est suffisante. Il convient toutefois de souligner qu'à l'échelle locale, il a pu exister une forte hétérogénéité des précipitations en l'espace de quelques kilomètres. L'approche utilisée ne permet pas de décrire les conséquences de cette hétérogénéité ; l'estimation du dépôt de ^{137}Cs n'est donc au mieux représentative qu'à l'échelle du canton. C'est une des raisons qui a conduit à utiliser la moyenne des valeurs de D_i disponibles en un même site.

Ces données ont été exploitées pour déterminer les paramètres α et β de la relation :

$$D_i = \alpha \times \sum_j (C_i(j) \times P_i(j)) + \beta \times \sum_j C_i(j) + R_i,$$

ainsi que des variantes de cette relation.

Plusieurs enseignements en sont retirés :

- sur le paramètre α (lessivage du ^{137}Cs de l'air par les pluies) : des valeurs statistiquement significatives de ce paramètre sont obtenues avec pratiquement toutes les variantes de ce modèle. Cela confirme le caractère prépondérant du phénomène de dépôt humide à la suite de l'accident de Tchernobyl, dans l'explication des activités surfaciques du ^{137}Cs observées sur l'ensemble du territoire. La valeur de α sur la durée totale des retombées de l'accident de Tchernobyl (du 1^{er} au 5 mai 1986) est estimée à $1190 \pm 76 \text{ m}^3/\text{l}$ (Bq/l d'eau de pluie par Bq/m^3 d'air). Une analyse plus détaillée suggère une fluctuation de ce

paramètre d'un jour à l'autre : aucune valeur significative n'est obtenue pour les 1^{er} et 5 mai 1986, jours où les pluies ont été faibles sur les 58 sites étudiés, rarement supérieures à 10 mm (4 sites le 1^{er} mai, 6 sites le 5 mai) ; des valeurs significatives sont déterminées pour le 2 mai ($1488 \pm 157 \text{ m}^3/\text{l}$), le 3 mai ($930 \pm 117 \text{ m}^3/\text{l}$) et le 4 mai ($2035 \pm 332 \text{ m}^3/\text{l}$). Ces variations sont significatives et traduisent probablement des conditions différentes de collecte des aérosols de ^{137}Cs de l'air par les gouttes de pluie. De même, une application régionalisée du modèle conduit à des valeurs différentes de α entre le Nord-Est ($951 \pm 85 \text{ m}^3/\text{l}$) et le Sud-Est ($1573 \pm 139 \text{ m}^3/\text{l}$) ; aucune valeur significative de ce paramètre n'a pu être obtenue pour la moitié ouest de la France, mais l'estimation suggère une valeur plutôt faible. Ces variations pourraient traduire une évolution spatiale de l'efficacité de l'interaction entre les pluies et les aérosols, mais elles peuvent aussi être expliquées par l'évolution des zones de pluie dans le temps, en rapport avec le changement de valeur de α d'un jour sur l'autre (cf. plus haut) ; en effet, le Nord-Est est surtout influencé par les pluies du 3 mai, alors que le Sud-Est a principalement reçu les pluies du 2 et 4 mai ;

Ces valeurs du paramètre α sont dans la gamme des valeurs proposées dans la littérature pour les coefficients de lessivage humide, utilisées dans les modèles de dispersion des aérosols, mais aussi observées à partir des mesures mensuelles de la radioactivité de l'air réalisées en France depuis 1971 par le SCPRI, l'OPRI et l'IPSN.

Ainsi, malgré les imprécisions inhérentes aux données utilisées (en particulier $C_i(j)$) et la variabilité inévitable des activités de ^{137}Cs rémanentes dans les sols, induite par des phénomènes sans rapport avec le lessivage humide de l'atmosphère, l'approche employée dans cette étude permet d'accéder à une estimation du coefficient de lessivage humide α qui est à la fois statistiquement significative et cohérente avec les valeurs connues par ailleurs.

- sur le paramètre β (coefficient de dépôt sec) : quelles que soient les variantes du modèle, aucune valeur statistiquement significative de β n'a pu être obtenue, ces valeurs étant par ailleurs fluctuantes et, dans certains cas, sans signification physique (valeurs négatives) ; on notera cependant que dans le modèle initial proposé, la valeur obtenue (240 m) est dans la gamme usuelle des valeurs observées pour les aérosols de taille micrométrique ou sub-micrométrique (entre 86 et 432 m). Une contribution le plus souvent très faible, voire négligeable des dépôts secs au regard des dépôts pluvieux, et souvent plus faible que la rémanence des essais nucléaires, elle-même connue avec imprécision, expliquent cette impossibilité de caractériser le coefficient de dépôt sec propre aux retombés de l'accident de Tchernobyl avec une précision acceptable. Cette limite semble irrémédiable, car le coefficient β dépend fortement des caractéristiques des aérosols (diamètre des particules), de l'état des surfaces où se forme le dépôt (effet de peigne des forêts par exemple) et des conditions de vents. Il convient cependant de relativiser cette difficulté dans la mesure où, lorsque des dépôts humides importants se sont formés, la part provenant du dépôt sec et l'incertitude associée deviennent marginales au regard de l'estimation du dépôt total ;
- parmi les variantes du modèle, celle faisant intervenir l'activité volumique de l'air mesurée la veille du jour du dépôt humide ne met pas en évidence d'influence significative de cette variable dans l'explication du dépôt total ; cette hypothèse est donc à rejeter. De même, la prise en compte d'une fraction du dépôt résiduel résultant des tirs atmosphériques d'armes nucléaires (R_i) n'apporte aucune amélioration dans l'estimation des paramètres α et β .

L'écart type résiduel des ajustements du modèle obtenu et de ses variantes varie de 3630 à 4218 Bq.m⁻². Il en résulte que leur application pour évaluer les dépôts de mai 1986 conduit à une incertitude de l'ordre de ±5000 Bq.m⁻² au niveau de confiance de 80% et ±10000 Bq.m⁻² au niveau de 95%. Compte tenu des niveaux de dépôts estimés sur la France, compris entre quelques centaines et 40000 Bq.m⁻², il n'est pas envisageable d'obtenir une cartographie des dépôts fiable à ce niveau de 95%. Le degré de confiance que l'on pourra accorder une carte suffisamment informative des dépôts en France sera donc au maximum de 80%.

Il est donc impossible d'obtenir une estimation précise du dépôt dans les zones où les retombées de l'accident de Tchernobyl ont été de faible importance, c'est-à-dire dans les zones où les dépôts humides ont été modérés ou absents. Sur les territoires où les activités surfaciques sont plus élevées (au dessus de 10000 Bq/m²), l'estimation peut être considérée comme significative à un niveau de confiance de 80%. L'incertitude de 5000 Bq.m⁻², correspondant à ce niveau de confiance est du même ordre de grandeur que celle considérée dans les travaux antérieurs de l'IRSN (cf. rapport DEI n°04-02).

L'analyse du résidu entre valeurs estimées par le modèle et valeurs mesurées met également en évidence un biais dans l'estimation des paramètres, corrélée à certaines variables explicatives (principalement $\Sigma C_i(j)$). Il est impossible de quantifier ce biais ni de réduire son effet, car aucune donnée nouvelle ne permettrait de le faire ; en particulier, il est impossible d'améliorer la connaissance sur les $C_i(j)$, ces données n'ayant pu être acquises que par des prélèvements réalisés le jour considéré. Cette conclusion confirme également celle évoquée plus haut sur l'impossibilité de déterminer une valeur significative de β .

Enfin, même si des valeurs numériques différentes sont obtenues entre ce modèle analytique (et ses variantes) et la relation empirique pluie-dépôt utilisée pour la carte de 2003, l'écart entre ces valeurs n'est pas statistiquement significatif : l'application des deux modèles aux 3657 stations de Météo-France ayant mesuré les hauteurs de pluie en mai 1986 donne des écarts de résultats qui, pour 94% des stations, sont inférieurs (en valeur absolue) à 5000 Bq/m². De même, la comparaison aux valeurs mesurées ne permet pas de discriminer les différents modèles.

Ainsi, l'approche analytique adoptée dans cette étude ne permet pas d'améliorer la reconstitution des retombées de l'accident de Tchernobyl en France au regard de ce qui avait été obtenu en 2003. Elle confirme cependant par une meilleure quantification des incertitudes associées aux données et à leur spatialisation, les limitations de représentativité et de lecture de la cartographie des dépôts de césium 137 obtenue en 2003. En l'occurrence, cette cartographie, à lire à l'échelle minimale du 1/1000000^{ième} avec un degré de confiance de 80%, présente les grandes tendances des dépôts de mai 1986 : des dépôts beaucoup plus faibles à l'ouest qu'à l'est, assez homogènes sur les 2/3 ouest du pays (< 4000 Bq/m²), avec une hétérogénéité à l'est liée à l'importance des pluies ; des dépôts qui ont atteint 10000 Bq/m² là où les pluies cumulées ont dépassé 20 mm et qui ont dépassé 20000 Bq/m² sur les zones les plus arrosées (plus de 35 mm). Que ce soit par la relation empirique de 2003 ou la relation analytique de la présente étude, en aucune façon il n'est possible de décrire des gradients plus fins des dépôts ni de se prononcer à plus petite échelle, d'un canton ou d'une par exemple. La démarche rétrospective se heurte à la faible représentativité des données mesurées, notamment celles relatives à l'activité volumique quotidienne du ¹³⁷Cs dans l'air. Aucune mesure nouvelle ne permet de compenser cette carence. Par conséquent, aucune amélioration significative de la cartographie générale des retombées de l'accident de Tchernobyl en France n'est plus à attendre sur la base des mesures faites à l'époque ou acquises depuis.

6.2. AMÉLIORATION DES MÉTHODES D'ÉVALUATION DES CONSÉQUENCES POST-ACCIDENTELLES RÉSULTANT DE RETOMBÉES ATMOSPHÉRIQUES DE POLLUANTS RADIOACTIFS

Le premier enseignement prospectif retiré de ce travail est la nécessité de disposer d'un réseau de stations de prélèvement des aérosols radioactifs suffisamment dense et bien réparti sur le territoire. Malheureusement, de telles qualités n'étaient pas réunies en 1986. Aujourd'hui, le réseau de surveillance des aérosols exploité par l'IRSN assure, avec ses 70 stations, une meilleure couverture du territoire (figure 30).

Il convient cependant d'évaluer si les caractéristiques de ce réseau sont suffisantes au regard des besoins de détermination de l'état de contamination de l'air sur l'ensemble du territoire, en cas d'accident de même ampleur que celui de Tchernobyl. L'objectif est d'améliorer le résultat de l'interpolation entre stations de mesure, et de disposer d'une connaissance du niveau de contamination de l'air suffisamment précise en tout lieu. Cette interpolation peut être obtenue soit par des méthodes mathématiques (déterministes ou par krigeage) telles que celles utilisées dans la présente étude, soit par ajustement des résultats de mesure à l'aide des modèles de dispersion atmosphérique de nouvelle génération, en cours de développement au sein de l'IRSN (DEI/SESUC) pour les besoins de la gestion des situations de crise nucléaire et radiologique. Ainsi, l'IRSN poursuivra un travail visant à évaluer le dimensionnement optimal de son réseau de surveillance des aérosols radioactifs dans un tel contexte.

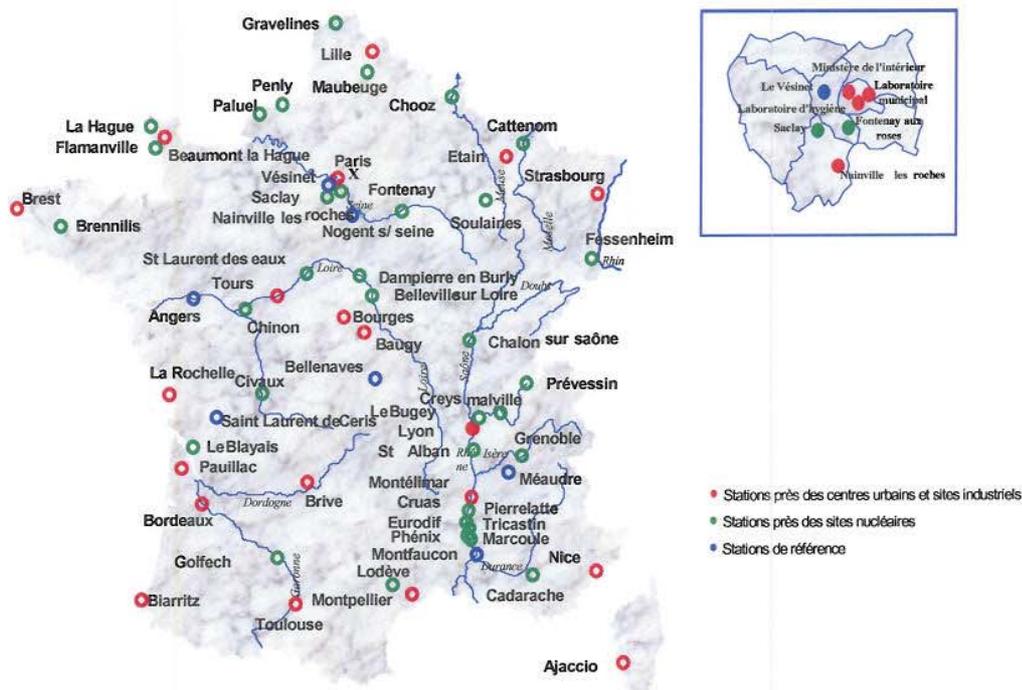


Figure 30 : carte du réseau de surveillance des aérosols radioactifs de l'IRSN en 2005

Le second enseignement, lié à l'importance que revêt le phénomène de dépôt humide dans le flux total déposé au sol, touche à la forte fluctuation du coefficient de lessivage α , avec deux conséquences : la conjecture d'uniformité spatiale et temporelle de l'interaction entre les gouttelettes de pluie et les aérosols de l'air n'est pas satisfaisante et la mesure de l'activité volumique du ^{137}Cs dans l'air au niveau du sol ne peut pas, à elle seule, décrire la situation en altitude, où se chargent les gouttes d'eau responsables du dépôt. Deux voies d'amélioration en découlent et sont en développement au sein de l'IRSN :

- au-delà des observations retirées de cette étude liée à l'accident de Tchernobyl, l'IRSN va poursuivre l'étude événementielle du lessivage de l'atmosphère, par l'exploitation dans la durée des données recueillies par certaines des stations de son réseau d'observation OPERA. L'objectif est de mieux connaître l'amplitude de variation du coefficient de lessivage et d'en déterminer les facteurs explicatifs : effet du type de précipitation (averses ou continue), de l'origine de la masse d'air, de l'intensité des pluies, de la taille des gouttes, etc.. Cette connaissance permettra de guider le travail d'expertise des situations post-accidentelles en tenant compte des circonstances propres à ces situations ;
- en situation de contamination accidentelle de l'atmosphère, à défaut de pouvoir accéder à des mesures en altitude, l'IRSN poursuit le développement d'un modèle de dispersion atmosphérique à longue distance permettant notamment de mieux décrire l'état de contamination à différentes altitudes. L'emploi de ce modèle, calé sur les données météorologiques réelles et se recoupant avec les mesures de contamination de l'air faites au niveau du sol grâce au réseau de surveillance des aérosols (cf. ci-dessus), devrait permettre une évaluation plus précise du flux déposé par les précipitations. Par ailleurs, ce modèle ayant une base physique associée notamment aux phénomènes météorologiques, il devrait permettre une interpolation des mesures de la contamination de l'air au niveau du sol plus satisfaisante que celle obtenue par des techniques purement mathématiques. En termes de perspectives, compte tenu des données recueillies dans la présente étude, ce modèle pourra être mis à l'épreuve sur le cas particulier et historique de l'accident de Tchernobyl.

En conclusion, des perspectives claires et positives se dégagent en faveur d'une méthode suffisamment robuste permettant d'évaluer, dans un délai court après un accident radiologique majeur, l'importance du flux de contaminants radioactifs déposé au sol. Les actions permettant de consolider cette méthode sont engagées au sein de l'IRSN. Elles sont couplées également à l'étude de la sensibilité radioécologique à l'aval du processus de dépôt, dont la connaissance est indispensable pour expliquer et prévoir la variabilité observée dans les différents compartiments des milieux terrestres, le sol et les végétaux en particulier.

7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bunzl K., Kracke W. (1988) - Cumulative deposition of ^{137}Cs , ^{238}Pu , and ^{241}Am from global fallout in soils from forest, grassland and arable land in Bavaria (FRG), *Journal of Environmental Radioactivity* 8 (1) , 1-14.

Caput C., Belot Y., Guenot J., Gauthier D. (1988) - Observations portant sur les retombées consécutives à l'accident de Tchernobyl dans la moitié Nord-Est de la France - IV^e Symposium International de Radioécologie de Cadarache, CEN Cadarache 14-18 mars 1988.

Chiles J-P, Delfiner P. (1999) - *Geostatistics, Modeling Spatial Uncertainty*- XII, 696 p., WILEY & SONS

CRII-RAD (1991) - Evaluation de la contamination des sols en Alsace, rapport Conseil Régional d'Alsace.

CRII-RAD (1992) - Etude Radioécologique d'Avignon, Service Communal d'Hygiène et de Santé de la mairie d'Avignon.

Descamps B., Lumia G. (1996) - Etude Radioécologique de l'environnement terrestre du site de Marcoule, année 1994 - Rapport IPSN/DPEI/SERE 96-019.

Descamps B. (1997) - Etude Radioécologique de l'environnement terrestre du site de Marcoule, année 1995- Rapport IPSN/DPRE/SERE 97-002.

Draper, N. et Smith, H. (1981) - *Applied regression analysis*. 2nd edition- John Wiley & sons, New York.

Duffa C. (2001) - Répartition du plutonium et de l'Américium dans l'environnement terrestre de la Basse Vallée du Rhône, Thèse université Aix Marseille III, 179 p.

Holgye, Z., Filgas, R. (1995) - Inventory of ^{238}Pu and $^{239,240}\text{Pu}$ in the soil of Czechoslovakia in 1990, *Journal of Environmental Radioactivity* 27 (2) , 181-189.

Lumia G., Descamps B. (1995) - Etude Radioécologique de l'environnement terrestre du site de Marcoule, année 1993 - Rapport IPSN/DPEI/SERE 95-028.

Duffa, C., Claval, D., Masson, M., Gontier, G., Renaud, Ph. (2004) - Synthèse des études radioécologiques annuelles menées dans l'environnement des centrales électronucléaires françaises depuis 1991, *Radioprotection*, Vol. 39, n° 2, pages 233 à 254.

Maubert H., Roussel S., Lion R. (1988) - Les dépôts consécutifs à l'accident de Tchernobyl dans le bassin du Var - IV^e Symposium International de Radioécologie de Cadarache, CEN Cadarache 14-18 mars 1988.

Mitchell, P.I., Sanchez-Cabeza, J.A., Ryan, T.P., McGarry, A.T., Vidal-Quatras, A. (1990) - Preliminary estimates of cumulative caesium and plutonium deposition in the Irish terrestrial environment. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1990. 138, 241-256.

Ottavi L. et Charlent L. (1988) - Le Tavignano en Corse - Etude d'un bassin versant après les retombées de l'accident de Tchernobyl - IV^e Symposium International de Radioécologie de Cadarache, CEN Cadarache 14-18 mars 1988.

Pourcelot L., Renaud Ph., Morello M., Marquet J. (2001) - Etat de la contamination en ¹³⁷Cs des sols de la commune de Sisteron (Alpes de Haute Provence) - Institut de protection et de Sûreté Nucléaire - IPSN/DPRE/SERNAT Report 2001-28, 8 p.

Pourcelot L. et Renaud Ph. (2002) - Etude des retombées de l'accident de Tchernobyl en Corse - Estimation des dépôts de 1986 et état actuel de la contamination des sols, Rapport IRSN 2002 21, 34 p.

Pourcelot L., Louvat D., Gauthier-Lafaye F. and Stille P. (2003) - Formation of radioactivity enriched soils in mountain areas, Journal of Environmental Radioactivity, 68, p. 215-233.

R Development Core Team (2004) - R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Raes F., Graziano G., Grossi L., Marciano L.; Peirs D., Perersen B., Stanners D., Zarimpas N. (1989) - Radioactivity measurements in Europe after the Chernobyl accident Part 1 : air - Commission of the European Communities Radiation Protection, Directorate-General Science, Research and Development Joint, Research Centre EUR 12269 EN.

Renaud Ph et Metivier J.-M. (2000) - Caractérisation des zones de France métropolitaine ayant reçu les dépôts radioactifs les plus importants à la suite de l'accident de Tchernobyl - Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, Rapport IPSN/DPRE/SERNAT 2000- 33, 21 p.

Renaud Ph, Metivier J. M et Morello M. (2001) - Modélisation de la répartition spatiale des dépôts de ¹³⁷Cs dans les sols de la basse vallée du Rhône - Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, Rapport IPSN/DPRE/SERNAT 2001-17.

Renaud Ph., Pourcelot L., Métivier J-M and Morello M. (2003) - ¹³⁷Cs deposits and behaviour over eastern France after the Chernobyl accident, the Sciences of the Total Environment, 309, p. 257-264.

Renaud Ph., Metivier J M, Castelier E., Pourcelot L et Louvat D (2004) - Cartographie des dépôts de ¹³⁷Cs en mai 1986 sur l'ensemble du territoire français métropolitain, Radioprotection, 39, p. 23-38.

Renaud, Ph., Louvat, D. (2004) - Magnitude of fission products deposition from atmospheric nuclear weapon test fallout in France, Health Physics, Health Physics 86 (4) , 353-358.

Renaud Ph., Leprieur F., Metivier J-M, Pourcelot L., Duffa C., Lemaitre N., Linden G., Champion D. (2004) - Elements de réponse sur les représentations cartographiques des retombées de l'accident de Tchernobyl en France, Rapport IRSN-DEI-2004-02, 41 p.

République Française, Ministère de la Santé, Service Central de Protection Contre les Rayonnements Ionisants (SCPRI) (1989)- Bulletin mensuel de résultats de mesures de mai 1986-décembre 1989.

United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations (UNSCEAR) (1982)- Ionizing radiation : sources and biological effects, report to the general assembly (New York).

Wright, S.M., Howard, B.J., Strand, P., Nylén, T., Sickel, M.A.K. (1999) - Prediction of ¹³⁷Cs deposition from atmospheric nuclear weapons tests within the Arctic, Environmental Pollution 104 (1) , 131-143

ANNEXE 1 : LES DONNÉES DISPONIBLES

Site	Coordonnées		Valeurs de C_i interpolées (Bq/m ³ - Mai 1986)					$\Sigma C_i(j)$
	X	Y	01-mai	02-mai	03-mai	04-mai	05-mai	
Flamanville	294516	2512592	0,02	0,30	-0,01	0,00	0,00	0,31
Blayais	362204	2032954	0,75	0,12	0,02	0,01	0,00	0,90
Flers	386187	2420592	0,27	0,26	0,00	0,01	0,00	0,54
Cléville	422736	2463333	0,29	0,33	0,03	0,02	0,00	0,67
Chinon	435763	2249732	0,84	0,21	0,00	0,00	0,00	1,06
Saint-Laurent-de-Ceris	456065	2109447	0,63	0,14	0,00	0,01	0,00	0,78
Paluel	477544	2541437	0,43	0,49	0,12	0,04	0,00	1,09
Golfech	480505	1901793	0,45	0,18	0,05	0,05	0,02	0,75
Penly	519154	2550962	0,66	0,61	0,15	0,05	0,00	1,48
Saint Laurent	543057	2302557	0,71	0,28	0,02	0,01	0,01	1,02
Vesinet	584959	2432753	1,20	0,64	0,06	0,03	0,01	1,93
Gravelines	585829	2669053	0,70	0,94	0,39	0,10	0,00	2,13
Nainville-Les-Roches	596495	2366772	1,14	0,51	0,03	0,02	0,01	1,71
Dampierre	613552	2303746	1,01	0,40	0,01	0,01	0,01	1,44
Belleville	640616	2279058	1,02	0,40	0,00	0,01	0,01	1,44
Saulzet-le-Froid	645138	2071034	0,23	0,29	0,03	0,07	0,04	0,65
Beaune-Le-Froid	645350	2065600	0,22	0,29	0,03	0,07	0,04	0,66
Besse en Chambesse	645669	2057310	0,21	0,29	0,04	0,07	0,04	0,66
Saint-Genès-Champan.	652785	2079454	0,24	0,29	0,03	0,07	0,04	0,66
Bellenaves	657328	2133582	0,38	0,27	0,00	0,05	0,03	0,73
Opme	657813	2077855	0,23	0,29	0,03	0,07	0,04	0,67
Nogent	687307	2391612	1,91	0,89	0,05	0,03	0,01	2,89
Barjac	760380	1925674	0,17	0,47	0,42	0,21	0,12	1,40
Barjac	760380	1925674	0,17	0,47	0,42	0,21	0,12	1,40
Barjac	760380	1925674	0,17	0,47	0,42	0,21	0,12	1,40
Bussy-Le-Grand	764220	2287877	1,72	0,71	0,03	0,04	0,02	2,51
Saint Genest Malifaux	764425	2041317	0,21	0,39	0,20	0,14	0,09	1,03
Uzès	766969	1894167	0,20	0,48	0,50	0,23	0,13	1,55
Uzès	766969	1894167	0,20	0,48	0,50	0,23	0,13	1,55
Mas d'Asport	767615	1853152	0,24	0,46	0,57	0,25	0,14	1,66
Mas d'Asport	767615	1853152	0,24	0,46	0,57	0,25	0,14	1,66
Mas d'Asport	767615	1853152	0,24	0,46	0,57	0,25	0,14	1,66
Mas d'Asport	767615	1853152	0,24	0,46	0,57	0,25	0,14	1,66
Mas d'Asport	767615	1853152	0,24	0,46	0,57	0,25	0,14	1,66
Mirabel	771557	1957663	0,16	0,48	0,39	0,20	0,12	1,35
Albaron	772913	1847869	0,24	0,47	0,60	0,26	0,14	1,71
Albaron	772913	1847869	0,24	0,47	0,60	0,26	0,14	1,71
Cavillargues	774711	1904434	0,20	0,50	0,51	0,23	0,14	1,57
Chooz	776800	2568800	2,12	1,69	0,36	0,09	0,03	4,29
Fourques	778314	1858987	0,24	0,49	0,60	0,26	0,14	1,72
Fourques	778314	1858987	0,24	0,49	0,60	0,26	0,14	1,72
Fourques	778314	1858987	0,24	0,49	0,60	0,26	0,14	1,72
Tresque	780945	1904275	0,20	0,51	0,53	0,24	0,14	1,61
Pont-Saint-Esprit	784301	1919460	0,19	0,52	0,50	0,23	0,14	1,58
Palus	785014	1897185	0,21	0,52	0,55	0,25	0,14	1,67
Vallabrègues	785123	1876034	0,22	0,51	0,59	0,25	0,15	1,73
Vénéjan	786910	1913252	0,20	0,52	0,53	0,24	0,14	1,62

Site	Coordonnées		Valeurs de C _i interpolées (Bq/m ³ - Mai 1986)					Σ C _i (j)
	X	Y	01-mai	02-mai	03-mai	04-mai	05-mai	
Chusclan	788481	1908731	0,20	0,53	0,54	0,24	0,14	1,65
Chusclan	788481	1908731	0,20	0,53	0,54	0,24	0,14	1,65
Tavel	788717	1892579	0,21	0,53	0,57	0,25	0,14	1,71
Tavel	788717	1892579	0,21	0,53	0,57	0,25	0,14	1,71
Codolet	789328	1905673	0,21	0,53	0,55	0,24	0,14	1,67
Codolet	789328	1905673	0,21	0,53	0,55	0,24	0,14	1,67
Codolet	789328	1905673	0,21	0,53	0,55	0,24	0,14	1,67
Codolet	789328	1905673	0,21	0,53	0,55	0,24	0,14	1,67
Codolet	789328	1905673	0,21	0,53	0,55	0,24	0,14	1,67
Codolet	789328	1905673	0,21	0,53	0,55	0,24	0,14	1,67
Codolet	789328	1905673	0,21	0,53	0,55	0,24	0,14	1,67
Saint Alban	789364	2047751	0,26	0,42	0,23	0,15	0,10	1,16
Tricastin	791117	1928484	0,19	0,53	0,50	0,23	0,14	1,60
Cruas	792100	1962090	0,18	0,51	0,43	0,21	0,13	1,47
Montfaucon	792337	1900208	0,21	0,54	0,57	0,25	0,14	1,71
Montfaucon	792337	1900208	0,21	0,54	0,57	0,25	0,14	1,71
Montfaucon	792337	1900208	0,21	0,54	0,57	0,25	0,14	1,71
Caderousse	792979	1904474	0,21	0,54	0,56	0,25	0,14	1,70
Caderousse	792979	1904474	0,21	0,54	0,56	0,25	0,14	1,70
Piolenc	793915	1911555	0,20	0,54	0,55	0,24	0,14	1,68
Roquemaure	794422	1896599	0,22	0,54	0,58	0,25	0,15	1,74
Pujaut	794939	1891743	0,22	0,54	0,59	0,26	0,15	1,76
Pujaut	794939	1891743	0,22	0,54	0,59	0,26	0,15	1,76
Pujaut	794939	1891743	0,22	0,54	0,59	0,26	0,15	1,76
Orange	797522	1905845	0,21	0,55	0,57	0,25	0,15	1,73
Orange	797522	1905845	0,21	0,55	0,57	0,25	0,15	1,73
Orange	797522	1905845	0,21	0,55	0,57	0,25	0,15	1,73
Cornas	797867	1999380	0,20	0,49	0,36	0,19	0,12	1,35
Cornas	797867	1999380	0,20	0,49	0,36	0,19	0,12	1,35
Cornas	797867	1999380	0,20	0,49	0,36	0,19	0,12	1,35
La Roche de Glun	798115	2004517	0,21	0,48	0,35	0,19	0,12	1,34
La Roche de Glun	798116	2004517	0,21	0,48	0,35	0,19	0,12	1,34
Sauveterre	798779	1893710	0,22	0,55	0,60	0,26	0,15	1,78
Chateauneuf du Pape	799654	1898556	0,22	0,55	0,59	0,26	0,15	1,77
Avignon	800707	1885463	0,23	0,55	0,62	0,26	0,15	1,82
Avignon	800707	1885463	0,23	0,55	0,62	0,26	0,15	1,82
Avignon	800707	1885463	0,23	0,55	0,62	0,26	0,15	1,82
Avignon	800708	1885464	0,23	0,55	0,62	0,26	0,15	1,82
Avignon	800708	1885464	0,23	0,55	0,62	0,26	0,15	1,82
Noves	806425	1876490	0,24	0,57	0,66	0,27	0,16	1,89
Noves	806425	1876490	0,24	0,57	0,66	0,27	0,16	1,89
Noves	806425	1876490	0,24	0,57	0,66	0,27	0,16	1,89
Noves	806425	1876490	0,24	0,57	0,66	0,27	0,16	1,89
Sarrians	809741	1903502	0,22	0,58	0,61	0,26	0,15	1,83
Séguret	815102	1916460	0,22	0,59	0,60	0,26	0,15	1,82
Vinsobres	816874	1929965	0,22	0,59	0,58	0,25	0,15	1,78
Vinsobres	816874	1929965	0,22	0,59	0,58	0,25	0,15	1,78
Vinsobres	816874	1929965	0,22	0,59	0,58	0,25	0,15	1,78
Vinsobres	816874	1929965	0,22	0,59	0,58	0,25	0,15	1,78

Site	Coordonnées		Valeurs de C _i interpolées (Bq/m ³ - Mai 1986)					Σ C _i (j)
	X	Y	01-mai	02-mai	03-mai	04-mai	05-mai	
Vaison-La-Romaine	817587	1919083	0,23	0,59	0,60	0,26	0,15	1,83
Vaison-La-Romaine	817587	1919083	0,23	0,59	0,60	0,26	0,15	1,83
Vaison-La-Romaine	817587	1919083	0,23	0,59	0,60	0,26	0,15	1,83
Vaison-La-Romaine	817587	1919083	0,23	0,59	0,60	0,26	0,15	1,83
Vaison-La-Romaine	817587	1919083	0,23	0,59	0,60	0,26	0,15	1,83
Vaison-La-Romaine	817587	1919083	0,23	0,59	0,60	0,26	0,15	1,83
Vaison-La-Romaine	817587	1919083	0,23	0,59	0,60	0,26	0,15	1,83
Vaison-La-Romaine	817587	1919083	0,23	0,59	0,60	0,26	0,15	1,83
Vaison-La-Romaine	817587	1919083	0,23	0,59	0,60	0,26	0,15	1,83
Mirabel-aux-Baronnies	821353	1927447	0,23	0,60	0,60	0,26	0,15	1,83
Mirabel-aux-Baronnies	821353	1927447	0,23	0,60	0,60	0,26	0,15	1,83
Mirabel-aux-Baronnies	821353	1927447	0,23	0,60	0,60	0,26	0,15	1,83
Mirabel-aux-Baronnies	821353	1927447	0,23	0,60	0,60	0,26	0,15	1,83
Nyons	822393	1932517	0,23	0,60	0,59	0,25	0,15	1,82
Nyons	822393	1932517	0,23	0,60	0,59	0,25	0,15	1,82
Nyons	822393	1932517	0,23	0,60	0,59	0,25	0,15	1,82
Nyons	822393	1932517	0,23	0,60	0,59	0,25	0,15	1,82
Saint-Pierre-de-Vassol	825225	1903718	0,24	0,62	0,66	0,27	0,16	1,95
Saint-Pierre-de-Vassol	825225	1903718	0,24	0,62	0,66	0,27	0,16	1,95
Saint-Pierre-de-Vassol	825225	1903718	0,24	0,62	0,66	0,27	0,16	1,95
Malaucène	825505	1912840	0,24	0,62	0,64	0,27	0,16	1,92
Malaucène	825505	1912840	0,24	0,62	0,64	0,27	0,16	1,92
Malaucène	825505	1912840	0,24	0,62	0,64	0,27	0,16	1,92
Malaucène	825505	1912840	0,24	0,62	0,64	0,27	0,16	1,92
Creys-Malville	828089	2092951	0,49	0,44	0,21	0,14	0,09	1,36
Mollans sur Ouvèze	828528	1919326	0,24	0,62	0,64	0,27	0,16	1,92
Mollans sur Ouvèze	828528	1919326	0,24	0,62	0,64	0,27	0,16	1,92
Bugey	843975	2089280	0,51	0,47	0,25	0,15	0,10	1,47
Montaigu	847663	2188873	1,14	0,57	0,12	0,09	0,06	1,98
Montaigu	847663	2188873	1,14	0,57	0,12	0,09	0,06	1,98
Méaudres	851589	2019583	0,33	0,57	0,43	0,21	0,13	1,67
Crançot	855301	2193685	1,19	0,60	0,13	0,09	0,06	2,08
Crançot	855301	2193685	1,19	0,60	0,13	0,09	0,06	2,08
Crançot	855301	2193685	1,19	0,60	0,13	0,09	0,06	2,08
Crançot	855301	2193685	1,19	0,60	0,13	0,09	0,06	2,08
Crançot	855301	2193685	1,19	0,60	0,13	0,09	0,06	2,08
Boissia	860007	2182471	1,12	0,59	0,15	0,10	0,07	2,02
Boissia	860007	2182471	1,12	0,59	0,15	0,10	0,07	2,02
Cogna	860050	2181808	1,11	0,59	0,15	0,10	0,07	2,01
Cogna	860050	2181808	1,11	0,59	0,15	0,10	0,07	2,01
Cogna	860050	2181808	1,11	0,59	0,15	0,10	0,07	2,01
Cogna	860050	2181808	1,11	0,59	0,15	0,10	0,07	2,01
Cogna	860050	2181808	1,11	0,59	0,15	0,10	0,07	2,01
Mirebel	860123	2194212	1,21	0,62	0,14	0,09	0,06	2,13
Clairveaux les lacs	862125	2179357	1,10	0,59	0,15	0,10	0,07	2,01
Marigny	863657	2192318	1,20	0,63	0,15	0,09	0,06	2,14
Marigny	864319	2193265	1,21	0,63	0,15	0,09	0,06	2,15
Marigny	864319	2193265	1,21	0,63	0,15	0,09	0,06	2,15
Chatel de Joux	864553	2174878	1,07	0,58	0,16	0,10	0,07	1,99

Site	Coordonnées		Valeurs de C _i interpolées (Bq/m ³ - Mai 1986)					Σ C _i (j)
	X	Y	01-mai	02-mai	03-mai	04-mai	05-mai	
Chatel de Joux	864553	2174878	1,07	0,58	0,16	0,10	0,07	1,99
Chatel de Joux	864553	2174878	1,07	0,58	0,16	0,10	0,07	1,99
Mison	882093	1924229	0,33	0,77	0,78	0,30	0,18	2,36
Viomenil	884940	2350323	2,56	1,57	0,30	0,07	0,04	4,55
Sisteron	887063	1917414	0,34	0,78	0,81	0,31	0,19	2,43
Sisteron	887063	1917414	0,34	0,78	0,81	0,31	0,19	2,43
Sisteron	887063	1917414	0,34	0,78	0,81	0,31	0,19	2,43
Sisteron	887063	1917414	0,34	0,78	0,81	0,31	0,19	2,43
Le Castellard-Melan	903031	1916864	0,37	0,83	0,86	0,32	0,20	2,58
Le Castellard-Melan	903705	1918304	0,37	0,83	0,85	0,32	0,20	2,58
Gerardmer	936488	2350499	2,57	1,85	0,45	0,10	0,07	5,03
Saint-Jean-d'Ormont	944919	2380424	2,70	2,07	0,52	0,11	0,07	5,46
Kruth	945258	2338051	2,49	1,82	0,46	0,10	0,07	4,94
Oderen	947628	2336303	2,48	1,82	0,46	0,10	0,07	4,94
Sarre-Union	947971	2448945	2,75	2,31	0,61	0,12	0,09	5,88
Mittlach	949488	2343201	2,52	1,87	0,48	0,10	0,07	5,05
Delle	950779	2289198	2,15	1,52	0,41	0,10	0,07	4,26
La Cayolle	951851	1930152	0,50	0,98	0,94	0,35	0,22	2,98
Estenc	952960	1924734	0,50	0,99	0,95	0,36	0,22	3,01
La Bonette	953751	1942288	0,51	0,97	0,91	0,34	0,21	2,95
Saales	953873	2383441	2,70	2,13	0,55	0,11	0,08	5,56
Entraunes	953989	1923269	0,50	0,99	0,96	0,36	0,22	3,03
Geishouse	953995	2331753	2,45	1,83	0,48	0,10	0,08	4,93
Le Bonhomme	954120	2362208	2,61	2,01	0,52	0,11	0,08	5,34
Saint Auban	954176	1879912	0,48	1,00	1,05	0,39	0,23	3,15
Linthal	954590	2339329	2,50	1,88	0,49	0,10	0,08	5,04
Diemeringen	956388	2449596	2,73	2,35	0,63	0,13	0,10	5,94
Orbey	956993	2357151	2,59	2,00	0,52	0,11	0,08	5,30
Ban de La Roche	959147	2391349	2,71	2,19	0,58	0,11	0,09	5,68
Rothau	960025	2395012	2,72	2,21	0,59	0,12	0,09	5,72
Wattwiller	962051	2327027	2,42	1,84	0,50	0,11	0,08	4,94
Aubure	962579	2366742	2,63	2,09	0,56	0,11	0,08	5,46
Aubure	962579	2366742	2,63	2,09	0,56	0,11	0,08	5,46
Aubure	962579	2366742	2,63	2,09	0,56	0,11	0,08	5,46
Guebwiller	964057	2334884	2,46	1,90	0,51	0,11	0,08	5,07
Kaysersberg	964527	2362134	2,60	2,07	0,56	0,11	0,08	5,43
Turckheim	965892	2354474	2,57	2,03	0,55	0,11	0,08	5,35
Breitenbach	966718	2386535	2,69	2,21	0,60	0,12	0,09	5,70
Puget-thénier	966877	1893678	0,52	1,04	1,05	0,39	0,23	3,23
Howald	968049	2389732	2,70	2,23	0,61	0,12	0,09	5,74
Ribeauvillier	968348	2368309	2,63	2,12	0,58	0,12	0,09	5,53
Neuve-Eglise	968667	2381058	2,67	2,19	0,60	0,12	0,09	5,66
Saverne	968967	2427767	2,73	2,36	0,65	0,13	0,10	5,98
Rouffach	970552	2341536	2,50	1,98	0,55	0,11	0,09	5,22
Beuil	970970	1912577	0,54	1,05	1,02	0,38	0,23	3,22
Romanswiller	971643	2416573	2,73	2,34	0,65	0,13	0,10	5,95
Mulhouse	973826	2317839	2,36	1,84	0,52	0,11	0,09	4,92
Jettswiller	974225	2419868	2,73	2,37	0,66	0,13	0,10	5,98
Barr	974577	2391684	2,69	2,27	0,63	0,12	0,10	5,81

Site	Coordonnées		Valeurs de C _i interpolées (Bq/m ³ - Mai 1986)					Σ C _i (j)
	X	Y	01-mai	02-mai	03-mai	04-mai	05-mai	
Durmenach	976410	2292654	2,18	1,69	0,49	0,11	0,09	4,57
Biltzheim	976550	2341306	2,49	2,01	0,56	0,12	0,09	5,27
Oberetzen	976597	2339091	2,48	1,99	0,56	0,12	0,09	5,24
Roquesteron	976937	1885465	0,53	1,07	1,08	0,41	0,24	3,33
Kiffis	978460	2283525	2,12	1,63	0,49	0,12	0,09	4,45
Baldersheim	979523	2323136	2,39	1,91	0,55	0,12	0,09	5,05
Isola	979722	1921209	0,57	1,07	1,01	0,38	0,23	3,27
Isola 2000	981228	1923274	0,57	1,08	1,01	0,38	0,23	3,27
Schlierbach	982263	2310674	2,31	1,84	0,54	0,12	0,09	4,89
Ebersheim	982721	2379618	2,65	2,25	0,64	0,12	0,10	5,77
Wolgantzen	984526	2349309	2,53	2,10	0,60	0,12	0,10	5,45
Oberbronn	985189	2450597	2,67	2,46	0,72	0,14	0,12	6,11
Malaussene	985965	1891082	0,56	1,10	1,08	0,41	0,25	3,40
Altekendork	986247	2434663	2,70	2,45	0,71	0,14	0,12	6,11
Truchtersheim	988902	2419668	2,70	2,43	0,71	0,14	0,11	6,09
Valdeblore	989082	1913435	0,59	1,11	1,04	0,40	0,24	3,37
Fessenheim	990500	2335499	2,45	2,05	0,60	0,12	0,10	5,32
Reichoffheim	990954	2451041	2,66	2,48	0,74	0,15	0,13	6,15
Entzheim	990987	2406144	2,69	2,40	0,70	0,14	0,11	6,03
Sundhouse	991382	2374802	2,62	2,27	0,66	0,13	0,10	5,79
Madone d'Utelle	994501	1891930	0,59	1,13	1,09	0,42	0,25	3,47
Diebolsheim	994545	2378630	2,63	2,31	0,68	0,13	0,11	5,85
Brumath	995529	2427018	2,69	2,47	0,74	0,14	0,12	6,16
Erstein	995758	2393360	2,67	2,37	0,70	0,13	0,11	5,99
Mundolsheim	996265	2418248	2,69	2,45	0,73	0,14	0,12	6,13
Ostwald	996524	2407809	2,68	2,43	0,72	0,14	0,12	6,08
Col de Salèse	998988	1915567	0,62	1,13	1,05	0,40	0,25	3,45
Strasbourg	999875	2410697	2,68	2,45	0,73	0,14	0,12	6,12
Schilitigheim	1000352	2415791	2,68	2,46	0,74	0,14	0,12	6,15
Preushdorf	1000376	2453035	2,63	2,51	0,77	0,15	0,14	6,20
Boréon	1001006	1914512	0,62	1,14	1,06	0,40	0,25	3,47
Haguenau	1002332	2440785	2,66	2,51	0,77	0,15	0,13	6,22
Gambenheim	1008118	2424665	2,67	2,51	0,77	0,15	0,13	6,23
Saorge	1012833	1902092	0,65	1,18	1,09	0,43	0,26	3,60
Stattmatten	1017430	2436757	0,20	0,53	0,54	0,24	0,14	1,65
Lauterbourg	1028734	2456314	2,58	2,58	0,85	0,17	0,16	6,35
Corte	1156396	1720521	0,77	1,11	1,04	0,69	0,33	3,95
Ghisonaccia	1187204	1697412	0,84	1,09	0,99	0,74	0,35	4,02
Aléria	1193076	1704157	0,88	1,12	1,01	0,76	0,35	4,12

Site	Valeurs de P _i interpolées (1/10 mm)					C _i . P _i				
	01-mai	02-mai	03-mai	04-mai	05-mai	01-mai	02-mai	03-mai	04-mai	05-mai
Flamanville	5,21	65,10	10,43	61,02	0,00	0,08	19,22	-0,08	0,19	0,00
Blayais	0,00	171,56	5,67	19,15	33,23	0,00	19,85	0,09	0,19	0,04
Flers	0,00	44,05	12,11	83,96	35,52	0,00	11,38	0,01	0,74	-0,05
Cléville	20,15	11,32	11,65	11,68	0,00	5,90	3,72	0,36	0,23	0,00
Chinon	0,00	64,15	2,18	15,52	5,41	0,00	13,62	0,00	0,02	0,01
St-Laurent-de-Ceris	0,00	116,81	11,86	18,77	22,22	0,00	16,23	-0,05	0,22	0,03
Paluel	26,97	9,28	3,34	7,68	0,00	11,68	4,54	0,40	0,34	0,00
Golfech	0,00	86,03	14,07	0,00	0,00	0,00	15,72	0,76	0,00	0,00
Penly	26,14	16,95	0,00	0,00	0,00	17,16	10,38	0,00	0,00	0,00
Saint Laurent	13,40	10,90	9,97	0,00	0,00	9,48	3,03	0,17	0,00	0,00
Vesinet	0,00	0,00	18,20	0,03	5,66	0,00	0,00	1,10	0,00	0,03
Gravelines	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Nainville-Les-Roches	0,00	13,27	9,30	0,00	4,34	0,00	6,80	0,26	0,00	0,04
Dampierre	1,91	0,00	9,36	1,38	0,00	1,92	0,00	0,07	0,02	0,00
Belleville	3,11	14,03	28,30	0,00	0,00	3,17	5,56	-0,08	0,00	0,00
Saulzet-le-Froid	0,00	0,00	16,54	0,84	0,17	0,00	0,00	0,48	0,06	0,01
Beaune-Le-Froid	0,00	0,00	19,74	2,77	0,71	0,00	0,00	0,64	0,19	0,03
Besse en Chambesse	0,00	0,00	29,23	1,24	0,31	0,00	0,00	1,12	0,09	0,01
St-Genès-Champan.	0,00	0,00	8,69	0,18	0,00	0,00	0,00	0,24	0,01	0,00
Bellenaves	0,00	21,05	47,99	0,00	6,24	0,00	5,66	0,11	0,00	0,21
Opme	0,00	0,00	27,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,86	0,00	0,00
Nogent	0,00	5,13	25,73	0,00	0,00	0,00	4,57	1,23	0,00	0,00
Barjac	0,00	0,00	0,00	35,48	0,00	0,00	0,00	0,00	7,52	0,00
Barjac	0,00	0,00	0,00	35,48	0,00	0,00	0,00	0,00	7,52	0,00
Barjac	0,00	0,00	0,00	35,48	0,00	0,00	0,00	0,00	7,52	0,00
Bussy-Le-Grand	0,00	0,05	29,23	11,29	0,09	0,00	0,04	0,73	0,40	0,00
Saint Genest Malifaux	0,00	0,00	14,87	23,37	0,00	0,00	0,00	2,93	3,30	0,00
Uzès	0,00	0,00	0,00	34,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,91	0,00
Uzès	0,00	0,00	0,00	34,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,91	0,00
Mas d'Asport	0,00	0,00	0,00	4,03	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
Mas d'Asport	0,00	0,00	0,00	4,03	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
Mas d'Asport	0,00	0,00	0,00	4,03	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
Mas d'Asport	0,00	0,00	0,00	4,03	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
Mas d'Asport	0,00	0,00	0,00	4,03	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
Mirabel	0,00	0,00	0,01	283,87	0,00	0,00	0,00	0,00	57,05	0,00
Albaron	0,00	0,00	0,00	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	0,00
Albaron	0,00	0,00	0,00	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	0,00
Cavillargues	2,00	0,00	0,00	34,04	0,00	0,39	0,00	0,00	7,95	0,00
Chooz	0,00	0,00	19,33	101,01	0,00	0,00	0,00	6,87	8,92	0,00
Fourques	0,00	0,00	0,00	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,77	0,00
Fourques	0,00	0,00	0,00	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,77	0,00
Fourques	0,00	0,00	0,00	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,77	0,00
Tresque	0,00	0,00	0,00	36,08	0,00	0,00	0,00	0,00	8,60	0,00
Pont-Saint-Esprit	0,00	4,98	0,00	206,79	0,00	0,00	2,58	0,00	48,15	0,00
Palus	0,00	0,00	0,07	58,46	0,00	0,00	0,00	0,04	14,33	0,00
Vallabrègues	0,00	0,00	0,00	16,31	0,00	0,00	0,00	0,00	4,15	0,00
Vénéjan	0,00	7,57	0,01	235,21	0,00	0,00	3,97	0,01	56,03	0,00

Site	Valeurs de P _i interpolées (1/10 mm)					C _i . P _i				
	01-mai	02-mai	03-mai	04-mai	05-mai	01-mai	02-mai	03-mai	04-mai	05-mai
Chusclan	0,00	7,98	0,01	235,63	0,00	0,00	4,21	0,00	56,98	0,00
Chusclan	0,00	7,98	0,01	235,63	0,00	0,00	4,21	0,00	56,98	0,00
Tavel	0,00	0,00	0,13	87,97	0,01	0,00	0,00	0,07	22,00	0,00
Tavel	0,00	0,00	0,13	87,97	0,01	0,00	0,00	0,07	22,00	0,00
Codolet	0,00	6,95	0,01	214,09	0,00	0,00	3,69	0,00	52,25	0,00
Codolet	0,00	6,95	0,01	214,09	0,00	0,00	3,69	0,00	52,25	0,00
Codolet	0,00	6,95	0,01	214,09	0,00	0,00	3,69	0,00	52,25	0,00
Codolet	0,00	6,95	0,01	214,09	0,00	0,00	3,69	0,00	52,25	0,00
Codolet	0,00	6,95	0,01	214,09	0,00	0,00	3,69	0,00	52,25	0,00
Codolet	0,00	6,95	0,01	214,09	0,00	0,00	3,69	0,00	52,25	0,00
Codolet	0,00	6,95	0,01	214,09	0,00	0,00	3,69	0,00	52,25	0,00
Saint Alban	0,00	0,00	119,97	22,08	0,01	0,00	0,00	27,53	3,31	0,00
Tricastin	0,00	0,02	0,00	185,95	0,01	0,00	0,01	0,00	43,26	0,00
Cruas	0,00	18,40	41,01	159,39	0,00	0,00	9,42	17,68	33,81	0,00
Montfaucon	0,00	1,45	0,00	152,70	0,00	0,00	0,78	0,00	38,05	0,00
Montfaucon	0,00	1,45	0,00	152,70	0,00	0,00	0,78	0,00	38,05	0,00
Montfaucon	0,00	1,45	0,00	152,70	0,00	0,00	0,78	0,00	38,05	0,00
Caderousse	0,00	3,22	0,00	158,25	0,00	0,00	1,73	0,00	39,16	0,00
Caderousse	0,00	3,22	0,00	158,25	0,00	0,00	1,73	0,00	39,16	0,00
Piolenc	0,00	0,70	0,00	127,71	0,00	0,00	0,38	0,00	31,21	0,00
Roquemaure	0,00	0,00	0,00	140,96	0,00	0,00	0,00	0,00	35,60	0,00
Pujaut	0,00	0,00	0,01	121,84	0,00	0,00	0,00	0,00	31,11	0,00
Pujaut	0,00	0,00	0,01	121,84	0,00	0,00	0,00	0,00	31,11	0,00
Pujaut	0,00	0,00	0,01	121,84	0,00	0,00	0,00	0,00	31,11	0,00
Orange	0,00	0,02	0,00	83,55	0,00	0,00	0,01	0,00	20,90	0,00
Orange	0,00	0,02	0,00	83,55	0,00	0,00	0,01	0,00	20,90	0,00
Orange	0,00	0,02	0,00	83,55	0,00	0,00	0,01	0,00	20,90	0,00
Cornas	0,00	1,04	194,03	58,14	0,05	0,00	0,51	69,22	11,04	0,01
Cornas	0,00	1,04	194,03	58,14	0,05	0,00	0,51	69,22	11,04	0,01
Cornas	0,00	1,04	194,03	58,14	0,05	0,00	0,51	69,22	11,04	0,01
La Roche de Glun	0,00	3,64	196,51	32,99	0,03	0,00	1,75	67,81	6,15	0,00
La Roche de Glun	0,00	3,64	196,52	32,99	0,03	0,00	1,75	67,81	6,15	0,00
Sauveterre	0,00	0,00	0,20	148,55	0,00	0,00	0,00	0,12	38,23	0,00
Chateauneuf du Pape	0,00	0,00	0,01	154,74	0,00	0,00	0,00	0,00	39,55	0,00
Avignon	0,00	0,00	0,00	104,02	0,00	0,00	0,00	0,00	27,34	0,00
Avignon	0,00	0,00	0,00	104,02	0,00	0,00	0,00	0,00	27,34	0,00
Avignon	0,00	0,00	0,00	104,02	0,00	0,00	0,00	0,00	27,34	0,00
Avignon	1,00	1,00	1,00	105,02	1,00	0,23	0,55	0,62	27,60	0,15
Avignon	1,00	1,00	1,00	105,02	1,00	0,23	0,55	0,62	27,60	0,15
Noves	0,00	0,00	0,00	129,66	0,00	0,00	0,00	0,00	35,18	0,00
Noves	0,00	0,00	0,00	129,66	0,00	0,00	0,00	0,00	35,18	0,00
Noves	0,00	0,00	0,00	129,66	0,00	0,00	0,00	0,00	35,18	0,00
Noves	0,00	0,00	0,00	129,66	0,00	0,00	0,00	0,00	35,18	0,00
Sarrians	0,00	0,00	0,00	33,62	0,00	0,00	0,00	0,00	8,76	0,00
Séguret	0,00	0,28	73,39	110,11	0,00	0,00	0,17	44,22	28,35	0,00
Vinsobres	0,00	64,99	357,92	124,99	1,00	0,00	38,14	206,47	31,31	0,15
Vinsobres	0,00	64,99	357,92	124,99	1,00	0,00	38,14	206,47	31,31	0,15
Vinsobres	0,00	64,99	357,92	124,99	1,00	0,00	38,14	206,47	31,31	0,15
Vinsobres	0,00	64,99	357,92	124,99	1,00	0,00	38,14	206,47	31,31	0,15

Site	Valeurs de P _i interpolées (1/10 mm)					C _i . P _i				
	01-mai	02-mai	03-mai	04-mai	05-mai	01-mai	02-mai	03-mai	04-mai	05-mai
Vaison-La-Romaine	0,00	50,00	324,70	129,92	0,01	0,00	29,67	196,16	33,48	0,00
Vaison-La-Romaine	0,00	50,00	324,70	129,92	0,01	0,00	29,67	196,16	33,48	0,00
Vaison-La-Romaine	0,00	50,00	324,70	129,92	0,01	0,00	29,67	196,16	33,48	0,00
Vaison-La-Romaine	0,00	50,00	324,70	129,92	0,01	0,00	29,67	196,16	33,48	0,00
Vaison-La-Romaine	0,00	50,00	324,70	129,92	0,01	0,00	29,67	196,16	33,48	0,00
Vaison-La-Romaine	0,00	50,00	324,70	129,92	0,01	0,00	29,67	196,16	33,48	0,00
Vaison-La-Romaine	0,00	50,00	324,70	129,92	0,01	0,00	29,67	196,16	33,48	0,00
Vaison-La-Romaine	0,00	50,00	324,70	129,92	0,01	0,00	29,67	196,16	33,48	0,00
Vaison-La-Romaine	0,00	50,00	324,70	129,92	0,01	0,00	29,67	196,16	33,48	0,00
Mirabel-aux-Baronnies	0,00	48,09	338,17	128,82	0,01	0,00	28,80	201,56	32,90	0,00
Mirabel-aux-Baronnies	0,00	48,09	338,17	128,82	0,01	0,00	28,80	201,56	32,90	0,00
Mirabel-aux-Baronnies	0,00	48,09	338,17	128,82	0,01	0,00	28,80	201,56	32,90	0,00
Mirabel-aux-Baronnies	0,00	48,09	338,17	128,82	0,01	0,00	28,80	201,56	32,90	0,00
Nyons	0,00	55,02	151,78	100,08	0,03	0,00	32,93	89,10	25,31	0,00
Nyons	0,00	55,02	151,78	100,08	0,03	0,00	32,93	89,10	25,31	0,00
Nyons	0,00	55,02	151,78	100,08	0,03	0,00	32,93	89,10	25,31	0,00
Nyons	0,00	55,02	151,78	100,08	0,03	0,00	32,93	89,10	25,31	0,00
Saint-Pierre-de-Vassol	0,00	0,02	92,98	113,97	0,00	0,00	0,01	61,48	31,04	0,00
Saint-Pierre-de-Vassol	0,00	0,02	92,98	113,97	0,00	0,00	0,01	61,48	31,04	0,00
Saint-Pierre-de-Vassol	0,00	0,02	92,98	113,97	0,00	0,00	0,01	61,48	31,04	0,00
Malaucène	0,00	54,92	209,74	139,90	0,00	0,00	33,79	134,67	37,40	0,00
Malaucène	0,00	54,92	209,74	139,90	0,00	0,00	33,79	134,67	37,40	0,00
Malaucène	0,00	54,92	209,74	139,90	0,00	0,00	33,79	134,67	37,40	0,00
Malaucène	0,00	54,92	209,74	139,90	0,00	0,00	33,79	134,67	37,40	0,00
Creys-Malville	0,00	0,00	163,24	0,00	0,00	0,00	0,00	34,20	0,00	0,00
Mollans sur Ouvèze	0,00	75,85	127,12	57,12	1,02	0,00	47,06	80,90	15,18	0,16
Mollans sur Ouvèze	0,00	75,85	127,12	57,12	1,02	0,00	47,06	80,90	15,18	0,16
Bugey	0,00	0,00	39,56	16,13	0,00	0,00	0,00	9,78	2,39	0,00
Montaigu	6,97	69,93	284,90	44,91	5,98	7,92	39,76	34,96	3,98	0,36
Montaigu	6,97	69,93	284,90	44,91	5,98	7,92	39,76	34,96	3,98	0,36
Méaudres	0,00	1,63	50,39	31,45	0,20	0,00	0,93	21,91	6,52	0,03
Crançot	0,00	62,40	221,07	80,45	1,78	0,00	37,74	29,63	7,20	0,11
Crançot	0,00	62,40	221,07	80,45	1,78	0,00	37,74	29,63	7,20	0,11
Crançot	0,00	62,40	221,07	80,45	1,78	0,00	37,74	29,63	7,20	0,11
Crançot	0,00	62,40	221,07	80,45	1,78	0,00	37,74	29,63	7,20	0,11
Crançot	0,00	62,40	221,07	80,45	1,78	0,00	37,74	29,63	7,20	0,11
Boissia	0,60	247,64	189,15	58,28	2,40	0,67	145,57	28,14	5,63	0,16
Boissia	0,60	247,64	189,15	58,28	2,40	0,67	145,57	28,14	5,63	0,16
Cogna	0,61	253,90	188,04	56,07	2,42	0,68	148,85	28,07	5,44	0,16
Cogna	0,61	253,90	188,04	56,07	2,42	0,68	148,85	28,07	5,44	0,16
Cogna	0,61	253,90	188,04	56,07	2,42	0,68	148,85	28,07	5,44	0,16
Cogna	0,61	253,90	188,04	56,07	2,42	0,68	148,85	28,07	5,44	0,16
Cogna	0,61	253,90	188,04	56,07	2,42	0,68	148,85	28,07	5,44	0,16
Mirebel	0,00	115,85	201,18	88,26	0,84	0,00	72,00	28,73	8,05	0,05
Clairveaux les lacs	0,00	276,52	174,07	55,02	1,99	0,00	162,13	26,95	5,45	0,14
Marigny	0,02	118,79	183,91	89,65	1,16	0,02	74,47	27,66	8,38	0,07
Marigny	0,03	109,14	181,13	87,62	1,24	0,03	68,97	27,40	8,17	0,08
Marigny	0,03	109,14	181,13	87,62	1,24	0,03	68,97	27,40	8,17	0,08
Chatel de Joux	0,00	175,18	183,08	63,14	0,40	0,00	102,11	29,79	6,46	0,03

Site	Valeurs de P _i interpolées (1/10 mm)					C _i . P _i				
	01-mai	02-mai	03-mai	04-mai	05-mai	01-mai	02-mai	03-mai	04-mai	05-mai
Chatel de Joux	0,00	175,18	183,08	63,14	0,40	0,00	102,11	29,79	6,46	0,03
Chatel de Joux	0,00	175,18	183,08	63,14	0,40	0,00	102,11	29,79	6,46	0,03
Mison	0,00	349,54	0,00	0,06	29,92	0,00	267,51	0,00	0,02	5,48
Viomenil	0,00	18,04	119,06	1,81	6,17	0,00	28,40	35,14	0,13	0,28
Sisteron	0,00	189,69	0,00	4,62	37,65	0,00	148,82	0,00	1,44	7,07
Sisteron	0,00	189,69	0,00	4,62	37,65	0,00	148,82	0,00	1,44	7,07
Sisteron	0,00	189,69	0,00	4,62	37,65	0,00	148,82	0,00	1,44	7,07
Sisteron	0,00	189,69	0,00	4,62	37,65	0,00	148,82	0,00	1,44	7,07
Castellard-Melan	0,00	221,88	0,52	9,44	176,93	0,00	184,94	0,44	3,05	34,66
Castellard-Melan	0,00	219,90	0,00	10,00	179,92	0,00	183,54	0,00	3,23	35,23
Gerardmer	0,00	0,00	315,24	1,98	2,99	0,00	0,01	141,31	0,19	0,20
St-Jean-d'Ormont	0,00	31,87	347,30	0,00	0,00	0,00	65,86	179,70	0,00	0,00
Kruth	0,00	65,42	92,23	0,00	1,34	0,00	119,01	42,28	0,00	0,09
Oderen	0,00	46,11	109,93	0,00	22,64	0,00	83,95	50,94	0,00	1,63
Sarre-union	0,00	0,00	135,69	0,04	9,70	0,00	0,00	82,56	0,01	0,89
Mittlach	0,00	12,17	106,02	0,00	40,69	0,00	22,81	50,82	0,00	2,99
Delle	0,02	31,54	66,27	0,01	48,32	0,03	48,02	27,17	0,00	3,59
La Cayolle	0,00	141,95	49,67	39,81	51,45	0,00	138,82	46,54	13,98	11,11
Estenc	0,00	9,21	0,00	26,55	37,60	0,00	9,08	0,00	9,46	8,21
La Bonette	0,00	44,86	0,00	38,61	5,84	0,00	43,63	0,00	13,22	1,24
Saales	0,00	72,62	126,70	0,03	6,04	0,00	154,52	69,76	0,00	0,49
Entraunes	0,00	0,10	0,06	24,01	40,02	0,00	0,10	0,05	8,61	8,78
Geishouse	0,00	2,07	142,02	0,00	36,97	0,00	3,78	67,78	0,00	2,79
Le Bonhome	0,00	68,94	154,97	1,99	9,99	0,00	138,92	80,84	0,21	0,78
Saint Auban	0,00	0,00	0,00	164,96	86,96	0,00	0,00	0,00	64,27	20,09
Linthal	0,00	71,52	138,78	0,00	24,05	0,00	134,30	68,02	0,00	1,83
Diemeringen	32,97	0,00	98,30	0,07	0,00	89,95	0,00	62,41	0,01	0,00
Orbey	0,00	8,14	144,96	0,00	11,01	0,00	16,29	75,92	0,00	0,87
Ban de La Roche	0,00	31,15	111,83	0,63	20,59	0,00	68,27	64,68	0,07	1,76
Rothau	0,00	43,49	110,55	0,00	24,04	0,00	96,21	64,79	0,00	2,09
Wattwiller	0,00	0,00	167,46	0,00	27,68	0,00	0,00	83,11	0,00	2,21
Aubure	0,00	29,95	102,79	0,53	31,23	0,00	62,45	57,12	0,06	2,61
Aubure	0,00	29,95	102,79	0,53	31,23	0,00	62,45	57,12	0,06	2,61
Aubure	0,00	29,95	102,79	0,53	31,23	0,00	62,45	57,12	0,06	2,61
Guebwiller	0,00	0,02	179,94	0,00	29,99	0,00	0,04	92,53	0,00	2,44
Kaysersberg	0,00	11,05	83,08	0,00	12,01	0,00	22,87	46,15	0,00	1,01
Turckheim	0,00	96,79	152,83	0,00	8,01	0,00	196,69	83,89	0,00	0,67
Breitenbach	0,43	97,27	82,48	0,22	13,54	1,15	214,68	49,22	0,03	1,21
Puget-thénier	0,00	0,00	0,01	92,98	5,04	0,00	0,00	0,01	36,40	1,18
Howald	0,00	194,72	62,13	0,00	11,98	0,00	433,86	37,61	0,00	1,09
Ribeauvillier	0,00	0,02	78,04	0,00	40,96	0,00	0,04	45,02	0,00	3,59
Neuve-Eglise	1,00	0,04	84,01	0,00	22,99	2,67	0,08	50,04	0,00	2,07
Saverne	0,00	0,00	39,03	0,00	39,97	0,00	0,00	25,49	0,00	4,04
Rouffach	0,00	6,13	40,12	0,00	10,06	0,00	12,13	21,87	0,00	0,86
Beuil	0,00	0,00	89,38	28,33	78,67	0,00	0,00	90,77	10,79	18,21
Romanswiller	0,00	0,00	109,08	0,00	17,06	0,00	0,00	70,86	0,00	1,71
Mulhouse	0,00	2,01	31,99	0,00	15,02	0,00	3,70	16,66	0,00	1,29
Jetterswiller	0,00	0,00	77,82	0,00	20,95	0,00	0,00	51,48	0,00	2,15
Barr	0,00	0,09	40,04	0,00	48,95	0,00	0,20	25,19	0,00	4,71

Site	Valeurs de P _i interpolées (1/10 mm)					C _i . P _i				
	01-mai	02-mai	03-mai	04-mai	05-mai	01-mai	02-mai	03-mai	04-mai	05-mai
Durmenach	1,89	82,22	1,06	0,00	115,56	4,14	138,59	0,52	0,00	10,13
Biltzheim	0,11	4,83	17,93	1,82	25,53	0,28	9,71	10,11	0,21	2,28
Oberetzen	0,00	5,41	3,94	2,04	26,85	0,00	10,79	2,21	0,24	2,39
Roquesteron	0,00	0,07	0,00	265,09	21,44	0,00	0,07	0,00	107,62	5,18
Kiffis	0,00	75,10	4,97	0,00	69,14	0,01	122,79	2,43	0,00	6,17
Baldersheim	0,00	0,00	4,91	0,00	85,94	0,00	0,00	2,68	0,00	7,72
Isola	0,00	79,97	0,02	96,98	7,02	0,00	85,79	0,02	36,96	1,64
Isola 2000	0,00	77,14	1,39	92,55	8,51	0,00	83,02	1,40	35,23	1,98
Schlierbach	0,00	0,00	25,09	0,00	39,91	0,00	0,01	13,49	0,00	3,63
Ebersheim	0,00	0,33	67,55	0,00	27,93	0,00	0,75	43,20	0,00	2,78
Wolgantzen	0,00	0,00	170,84	0,02	12,63	0,00	0,00	102,88	0,00	1,21
Oberbronn	0,00	0,12	21,18	0,00	57,63	0,00	0,31	15,32	0,00	6,98
Malaussene	0,00	0,09	0,00	246,42	14,43	0,00	0,10	0,00	101,05	3,54
Altekendork	0,00	1,00	46,01	0,00	59,97	0,00	2,44	32,83	0,00	7,00
Truchtersheim	0,00	0,00	38,99	0,00	16,01	0,00	0,00	27,59	0,00	1,83
Valdeblore	0,00	24,99	0,02	166,96	38,95	0,00	27,62	0,02	66,03	9,37
Fessenheim	0,00	8,82	87,77	0,00	24,42	0,00	18,05	52,74	0,00	2,39
Reichoffheim	0,00	0,00	40,97	0,00	122,91	0,00	0,00	30,34	0,00	15,52
Entzheim	0,00	0,00	38,99	0,00	0,01	0,00	0,01	27,27	0,00	0,00
Sundhouse	0,00	43,56	45,65	0,00	6,14	0,00	98,96	30,18	0,00	0,64
Madone d'Utelle	0,00	0,00	0,04	211,85	4,40	0,00	0,00	0,05	88,37	1,10
Diebolsheim	0,00	159,7	40,97	0,00	0,03	0,00	367,13	27,72	0,00	0,00
Brumath	0,00	0,01	82,02	0,00	19,07	0,00	0,01	60,30	0,00	2,33
Erstein	0,00	54,71	29,99	0,00	0,02	0,00	129,83	20,98	0,00	0,00
Mundolsheim	0,00	0,70	39,81	0,00	30,90	0,00	1,71	29,03	0,00	3,71
Ostwald	0,00	132,6	24,65	0,00	5,41	0,00	321,76	17,72	0,00	0,63
Col de Salèse	0,00	6,06	10,67	143,47	59,91	0,00	6,87	11,21	57,71	14,69
Strasbourg	0,00	196,1	17,01	0,00	10,01	0,00	480,09	12,46	0,00	1,21
Schilitigheim	0,00	114,6	21,40	0,00	18,34	0,00	282,28	15,82	0,00	2,25
Preusdorf	0,00	76,08	21,18	1,99	72,51	0,00	190,73	16,30	0,31	9,82
Boréon	0,00	2,79	12,64	158,34	62,01	0,00	3,19	13,35	64,11	15,29
Haguenau	0,00	3,02	6,99	0,00	12,04	0,00	7,59	5,36	0,00	1,60
Gambsheim	0,00	0,00	4,97	0,00	0,98	0,00	0,00	3,83	0,00	0,13
Saorge	0,00	0,35	35,13	437,86	51,69	0,00	0,42	38,46	186,48	13,27
Stattmatten	0,00	7,62	0,09	246,43	0,00	0,00	4,03	0,05	59,32	0,00
Lauterbourg	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03	0,00	0,00	0,00
Corte	0,00	5,00	3,00	319,33	58,97	0,00	5,55	3,13	220,47	19,70
Ghisonaccia	0,00	0,00	23,88	477,13	113,85	0,00	0,00	23,72	354,68	39,49
Aléria	0,00	0,00	19,99	353,99	104,98	0,00	0,00	20,12	267,59	37,26

Site	$\Sigma C_i \cdot P_i$	D_i	précip.moy.ann.	R_i	Fraction R_i
		Bq/m ²	mm/an	Bq/m ²	
Flamanville	19,41	2800	909	3058	1,0
Blayais	20,17	4000	904	3250	0,8
Flers	12,08	4000	966	3211	0,8
Cléville	10,21	1560	620	2287	1,0
Chinon	13,66	4500	639	2400	0,8
Saint-Laurent-de-Ceris	16,43	3135	957	2790	1,0
Paluel	16,96	4000	896	3023	0,8
Golfech	16,48	2900	738	2350	0,8
Penly	27,55	4000	904	3044	0,8
Saint Laurent	12,68	5500	668	2416	0,8
Vesinet	1,14	1560	639	1275	1,0
Gravelines	0,01	3500	717	2544	0,8
Nainville-Les-Roches	7,09	1125	659	1100	1,0
Dampierre	2,01	4100	725	2566	0,8
Belleville	8,66	3400	643	2348	1,0
Saulzet-le-Froid	0,54	7658	1201	3837	1,0
Beaune-Le-Froid	0,87	6128	1311	4130	1,0
Besse en Chambesse	1,23	7937	1497	4628	1,0
Saint-Genès-Champan.	0,25	5048	947	3159	1,0
Bellenaves	5,98	5220	763	2595	1,0
Opme	0,86	7392	815	2807	1,0
Nogent	5,81	4500	698	2494	0,8
Barjac	7,52	5711	889	3005	1,0
Barjac	7,52	6018	889	3005	1,0
Barjac	7,52	6939	889	3005	1,0
Bussy-Le-Grand	1,18	5130	971	3060	1,0
Saint Genest Malifaux	6,22	4180	1059	3458	1,0
Uzès	7,91	5169	816	2811	1,0
Uzès	7,91	6726	816	2811	1,0
Mas d'Asport	1,00	2230	587	2198	1,0
Mas d'Asport	1,00	2443	587	2198	1,0
Mas d'Asport	1,00	1808	587	2198	1,0
Mas d'Asport	1,00	1947	587	2198	1,0
Mas d'Asport	1,00	1649	587	2198	1,0
Mirabel	57,05	12260	1056	3452	1,0
Albaron	0,23	4851	553	2109	1,0
Albaron	0,23	6018	553	2109	1,0
Cavillargues	8,34	1664	844	2886	1,0
Chooz	15,79	6000	887	2850	1,0
Fourques	0,77	4390	627	2306	1,0
Fourques	0,77	4602	627	2306	1,0
Fourques	0,77	5239	627	2306	1,0
Tresque	8,60	4354	784	2724	1,0
Pont-Saint-Esprit	50,73	7434	803	2775	1,0
Palus	14,37	4248	796	2757	1,0
Vallabregues	4,15	6566	673	2428	1,0
Vénéjan	60,00	12745	788	2736	1,0

Site	$\Sigma C_i \cdot P_i$	D_i Bq/m ²	précip.moy.ann. mm/an	R_i Bq/m ²	Fraction R_i
Chusclan	61,19	9501	770	2688	1,0
Chusclan	61,19	25844	770	2688	1,0
Tavel	22,08	7293	766	2676	1,0
Tavel	22,08	9205	766	2676	1,0
Codolet	55,94	12008	744	2616	1,0
Codolet	55,94	15931	744	2616	1,0
Codolet	55,94	16993	744	2616	1,0
Codolet	55,94	17701	744	2616	1,0
Codolet	55,94	19117	744	2616	1,0
Codolet	55,94	20179	744	2616	1,0
Codolet	55,94	21241	744	2616	1,0
Saint Alban	30,84	10000	742	2900	0,8
Tricastin	43,28	6200	784	2900	0,8
Cruas	60,91	22000	963	3300	0,8
Montfaucon	38,82	4248	728	1455	1,0
Montfaucon	38,82	5650	728	1455	1,0
Montfaucon	38,82	5310	728	1455	1,0
Caderousse	40,89	11374	729	2578	1,0
Caderousse	40,89	9205	729	2578	1,0
Piolenc	31,58	13044	751	2637	1,0
Roquemaure	35,60	10632	726	2570	1,0
Pujaut	31,12	7434	719	2550	1,0
Pujaut	31,12	12037	719	2550	1,0
Pujaut	31,12	14090	719	2550	1,0
Orange	20,91	3753	723	2560	1,0
Orange	20,91	4248	723	2560	1,0
Orange	20,91	4354	723	2560	1,0
Cornas	80,77	20337	926	3104	1,0
Cornas	80,77	21067	926	3104	1,0
Cornas	80,77	22472	926	3104	1,0
La Roche de Glun	75,71	10000	890	3007	0,8
La Roche de Glun	75,71	19800	890	3006	0,8
Sauveterre	38,35	10474	702	2506	1,0
Chateauneuf du Pape	39,55	5090	711	2530	1,0
Avignon	27,34	4956	683	2455	1,0
Avignon	27,34	5310	683	2455	1,0
Avignon	27,34	5664	683	2455	1,0
Avignon	29,16	7430	683	2456	1,0
Avignon	29,16	7980	683	2455	1,0
Noves	35,18	5664	666	2408	1,0
Noves	35,18	5983	666	2408	1,0
Noves	35,18	7860	666	2408	1,0
Noves	35,18	8815	666	2408	1,0
Sarrians	8,77	4248	670	2420	1,0
Séguret	72,74	10352	765	2672	1,0
Vinsobres	276,08	31396	826	2837	1,0
Vinsobres	276,08	34503	826	2837	1,0
Vinsobres	276,08	47275	826	2837	1,0
Vinsobres	27,76	27292	826	2919	1,0

Site	$\Sigma C_i \cdot P_i$	D_i Bq/m ²	précip. moy. ann. mm/an	R_i Bq/m ²	Fraction R_i
Vaison-La-Romaine	259,32	22091	759	2658	1,0
Vaison-La-Romaine	259,32	31503	759	2658	1,0
Vaison-La-Romaine	259,32	34647	759	2658	1,0
Vaison-La-Romaine	259,32	38719	759	2658	1,0
Vaison-La-Romaine	259,32	40454	759	2658	1,0
Vaison-La-Romaine	25,71	28590	759	2658	1,0
Vaison-La-Romaine	25,71	28980	759	2658	1,0
Vaison-La-Romaine	25,71	24250	759	2658	1,0
Vaison-La-Romaine	25,71	27210	759	2658	1,0
Mirabel-aux-Baronnies	263,26	22325	806	2784	1,0
Mirabel-aux-Baronnies	263,26	24243	806	2784	1,0
Mirabel-aux-Baronnies	263,26	35735	806	2784	1,0
Mirabel-aux-Baronnies	263,26	37221	806	2784	1,0
Nyons	147,35	11792	846	2890	1,0
Nyons	147,35	12802	846	2890	1,0
Nyons	147,35	16708	846	2890	1,0
Nyons	147,35	17921	846	2890	1,0
Saint-Pierre-de-Vassol	92,53	7813	675	2434	1,0
Saint-Pierre-de-Vassol	92,53	9345	675	2434	1,0
Saint-Pierre-de-Vassol	92,53	11047	675	2434	1,0
Malaucène	205,86	22339	783	2722	1,0
Malaucène	205,86	23245	783	2722	1,0
Malaucène	205,86	28777	783	2722	1,0
Malaucène	205,86	38061	783	2722	1,0
Creys-Malville	34,21	21000	1116	3600	1,0
Mollans sur Ouvèze	13,95	12100	791	2744	1,0
Mollans sur Ouvèze	13,95	25652	791	2744	1,0
Bugey	12,17	10100	1323	3450	1,0
Montaigu	86,98	21527	1491	4612	1,0
Montaigu	86,98	20738	1491	4612	1,0
Méaudres	29,38	11790	1422	3200	1,0
Crançot	74,68	12876	1491	4612	1,0
Crançot	74,68	18418	1491	4612	1,0
Crançot	12,02	16790	1491	4612	1,0
Crançot	12,02	14559	1491	4612	1,0
Crançot	12,02	16647	1491	4612	1,0
Boissia	180,18	35032	1595	4890	1,0
Boissia	180,18	32950	1595	4890	1,0
Cogna	183,21	19634	1602	4909	1,0
Cogna	183,21	20637	1602	4909	1,0
Cogna	183,21	17091	1602	4909	1,0
Cogna	22,55	19269	1602	4909	1,0
Cogna	183,21	17033	1602	4909	1,0
Mirebel	108,82	14301	1491	4612	1,0
Clairveaux les lacs	194,67	34900	1701	5172	1,0
Marigny	110,60	17731	1632	4988	1,0
Marigny	104,65	9757	1641	5013	1,0
Marigny	14,10	22405	1641	5013	1,0
Chatel de Joux	138,39	20775	1883	5659	1,0

Site	$\Sigma C_i \cdot P_i$	D_i Bq/m ²	précip. moy. ann. mm/an	R_i Bq/m ²	Fraction R_i
Chatel de Joux	138,39	27912	1883	5659	1,0
Chatel de Joux	18,87	27168	1883	5659	1,0
Mison	273,02	24060	871	2957	1,0
Viomenil	63,95	5040	1102	2385	1,0
Sisteron	157,32	19450	866	2943	0,8
Sisteron	157,32	20000	866	2943	0,8
Sisteron	157,32	23150	866	2943	0,8
Sisteron	157,32	34500	866	2943	0,8
Le Castelard-Melan	223,09	31820	980	3248	0,5
Le Castellard-Melan	222,00	21150	1019	3351	1,0
Gerardmer	141,71	27500	1711	5198	0,8
Saint-Jean-d'Ormont	245,57	23500	1250	3968	0,8
Kruth	161,38	18780	1904	5714	1,0
Oderen	136,52	9562	1801	5441	1,0
Sarre-union	83,45	6928	860	2927	1,0
Mittlach	76,62	6134	1861	5599	1,0
Delle	78,81	12000	1043	3416	1,0
La Cayolle	210,45	30960	1204	3845	0,0
Estenc	26,75	22652	1253	3977	0,3
La Bonette	58,10	17986	824	2832	0,3
Saales	224,77	17588	1378	4309	1,0
Entraunes	17,54	6936	1239	3940	0,3
Geishouse	74,35	9043	1524	4700	1,0
Le Bonhome	220,76	14919	1452	4509	1,0
Saint Auban	84,37	15100	1150	3701	1,0
Linthal	204,15	20200	1634	4993	1,0
Diemeringen	152,36	13409	863	2935	1,0
Orbey	93,08	8190	1252	3973	1,0
Ban de La Roche	134,79	12423	1403	4377	1,0
Rothau	163,08	9682	1400	4370	1,0
Wattwiller	85,32	7965	1090	3542	1,0
Aubure	122,25	14525	1117	3614	1,0
Aubure	122,25	11364	1117	3614	1,0
Aubure	122,25	16519	1117	3614	1,0
Guebwiller	95,00	11311	975	3235	1,0
Kaysersberg	70,03	8233	803	2776	1,0
Turckheim	281,25	11361	774	2697	1,0
Breitenbach	266,29	8280	1202	3841	1,0
Puget-thénier	37,60	3438	947	3159	0,0
Howald	472,57	9532	1343	4217	1,0
Ribeauvillier	48,64	4120	870	2954	1,0
Neuve-Eglise	54,86	10603	895	3020	1,0
Saverne	29,53	8239	805	2780	1,0
Rouffach	34,87	3037	585	2194	1,0
Beuil	119,77	9050	1106	3585	0,3
Romanswiller	72,57	12813	818	2814	1,0
Mulhouse	21,66	3179	727	2572	1,0
Jetterswiller	53,63	4130	748	2628	1,0
Barr	30,09	8546	985	3260	1,0

Site	$\Sigma C_i \cdot P_i$	D_i Bq/m ²	précip.moy.ann. mm/an	R_i Bq/m ²	Fraction R_i
Durmenach	153,38	17140	873	2963	1,0
Biltzheim	22,59	2680	562	2131	1,0
Oberetzen	15,63	2418	571	2156	1,0
Roquesteron	112,87	7020	998	3296	0,3
Kiffis	131,39	6516	1062	3466	1,0
Baldersheim	10,40	2842	675	2434	1,0
Isola	124,41	38329	994	3284	0,3
Isola 2000	121,64	12109	1188	3803	0,3
Schlierbach	17,12	4140	820	2820	1,0
Ebersheim	46,73	5660	614	2270	1,0
Wolgantzen	104,09	5338	582	2185	1,0
Oberbronn	22,60	7257	870	2955	1,0
Malaussene	104,69	3685	1040	3407	0,3
Altekendork	42,27	8815	702	2506	1,0
Truchtersheim	29,42	10609	648	2361	1,0
Valdeblore	103,05	11295	1421	4425	0,0
Fessenheim	73,19	5000	848	2450	0,7
Reichoffheim	45,86	9143	810	2794	1,0
Entzheim	27,28	8556	613	3404	1,0
Sundhouse	129,79	7828	720	2553	1,0
Madone d'Utelle	89,51	11910	956	3184	0,3
Diebolsheim	394,86	37377	779	2710	1,0
Brumath	62,64	11783	729	2577	1,0
Erstein	150,82	17319	659	2391	1,0
Mundolsheim	34,44	9260	711	2528	1,0
Ostwald	340,11	11710	695	2487	1,0
Col de Salèse	90,49	10577	1537	4736	0,0
Strasbourg	493,76	26376	733	2589	1,0
Schilitigheim	300,35	22182	739	2604	1,0
Preushdorf	217,15	13313	843	2881	1,0
Boréon	95,94	25250	1609	4927	0,0
Haguenau	14,55	10245	778	2708	1,0
Gamsheim	3,96	9895	830	2848	1,0
Saorge	238,62	28940	1172	3760	1,0
Stattmatten	6,73	6550	773	2695	1
Lauterbourg	0,04	2382	863	2935	1,0
Corte	248,84	19600	1350	4235	0,5
Ghisonaccia	417,88	31960	734	2591	0,5
Aléria	324,97	15500	694	2485	0,5

ANNEXE 2 : LES DONNÉES RETENUES

Site	Coordonnées		Valeurs de C _i interpolées (Bq/m ³)					Σ C _i
	X	Y	01-mai	02-mai	03-mai	04-mai	05-mai	
Albaron	772912,54	1847869,36	0,24	0,47	0,60	0,26	0,14	1,71
Aubure	962578,5	2366742,16	2,63	2,09	0,56	0,11	0,08	5,46
Avignon	800708,06	1885464,18	0,23	0,55	0,62	0,26	0,15	1,82
Barjac	760380,46	1925674,18	0,17	0,47	0,42	0,21	0,12	1,40
Bellenaves	657327,72	2133581,58	0,38	0,27	0,00	0,05	0,03	0,73
Belleville	640616,1	2279058	1,02	0,40	0,00	0,01	0,01	1,44
Blayais	362204	2032954	0,75	0,12	0,02	0,01	0,00	0,90
Boissia	860006,94	2182470,83	1,12	0,59	0,15	0,10	0,07	2,02
Bugey	843974,6	2089279,72	0,51	0,47	0,25	0,15	0,10	1,47
Bussy-Le-Grand	764220,42	2287876,56	1,72	0,71	0,03	0,04	0,02	2,51
Caderousse	792978,8	1904473,82	0,21	0,54	0,56	0,25	0,14	1,70
Castellard-Melan	903705,2	1918304,2	0,37	0,83	0,85	0,32	0,20	2,58
Chatel de Joux	864552,52	2174877,87	1,07	0,58	0,16	0,10	0,07	1,99
Chinon	435763	2249732	0,84	0,21	0,00	0,00	0,00	1,06
Chooz	776800,38	2568800,08	2,12	1,69	0,36	0,09	0,03	4,29
Chusclan	788481,45	1908731,49	0,20	0,53	0,54	0,24	0,14	1,65
Clairvaux les lacs	862124,72	2179357	1,10	0,59	0,15	0,10	0,07	2,01
Cléville	422735,73	2463333,21	0,29	0,33	0,03	0,02	0,00	0,67
Codolet	789327,53	1905672,88	0,21	0,53	0,55	0,24	0,14	1,67
Cornas	797867,28	1999380,24	0,20	0,49	0,36	0,19	0,12	1,35
Crançot	855301,2	2193684,81	1,19	0,60	0,13	0,09	0,06	2,08
Creys-Malville	828089,02	2092951,37	0,49	0,44	0,21	0,14	0,09	1,36
Cruas	792099,61	1962090,02	0,18	0,51	0,43	0,21	0,13	1,47
Dampierre	613551,7	2303746,2	1,01	0,40	0,01	0,01	0,01	1,44
Fessenheim	990500,19	2335499,27	2,45	2,05	0,60	0,12	0,10	5,32
Flamanville	294515,5	2512591,6	0,02	0,30	-0,01	0,00	0,00	0,31
Fourques	778313,7	1858986,64	0,24	0,49	0,60	0,26	0,14	1,72
Golfech	480505	1901793	0,45	0,18	0,05	0,05	0,02	0,75
Gravelines	585829,3	2669053,2	0,70	0,94	0,39	0,10	0,00	2,13
La Roche de Glun	798116	2004517	0,21	0,48	0,35	0,19	0,12	1,34
Malaucène	825504,96	1912839,76	0,24	0,62	0,64	0,27	0,16	1,92
Marigny	864319,38	2193265,15	1,21	0,63	0,15	0,09	0,06	2,15
Mas d'Asport	767615	1853152	0,24	0,46	0,57	0,25	0,14	1,66
Méaudre	851589,44	2019582,83	0,33	0,57	0,43	0,21	0,13	1,67
Mirabel aux Baronnies	821353,37	1927446,65	0,23	0,60	0,60	0,26	0,15	1,83
Montaigu	847663	2188873	1,14	0,57	0,12	0,09	0,06	1,98
Montfaucon	792336,53	1900207,78	0,21	0,54	0,57	0,25	0,14	1,71
Nainville-Les- Roches	596495,04	2366771,6	1,14	0,51	0,03	0,02	0,01	1,71
Nogent	687307,3	2391612,1	1,91	0,89	0,05	0,03	0,01	2,89
Noves	806424,78	1876490,49	0,24	0,57	0,66	0,27	0,16	1,89
Nyons	822392,96	1932517,18	0,23	0,60	0,59	0,25	0,15	1,82
Orange	797521,97	1905844,5	0,21	0,55	0,57	0,25	0,15	1,73
Paluel	477543,8	2541436,9	0,43	0,49	0,12	0,04	0,00	1,09
Penly	519153,8	2550962,2	0,66	0,61	0,15	0,05	0,00	1,48
Pujaut	794938,93	1891742,85	0,22	0,54	0,59	0,26	0,15	1,76
Saint Alban	789364,31	2047750,85	0,26	0,42	0,23	0,15	0,10	1,16
Saint Laurent	543057	2302556,5	0,71	0,28	0,02	0,01	0,01	1,02
St pierre de Vassol	825225	1903718	0,24	0,62	0,66	0,27	0,16	1,95
Sisteron	887063,2	1917413,98	0,34	0,78	0,81	0,31	0,19	2,43
St Laurent de Cérès	456064,67	2109447,48	0,60	0,14	0,00	0,01	0,00	0,74
Tavel	788716,66	1892579,19	0,21	0,53	0,57	0,25	0,14	1,71

Tricastin	791116,5	1928484,06	0,19	0,53	0,50	0,23	0,14	1,60
Uses	766969,12	1894166,99	0,20	0,48	0,50	0,23	0,13	1,55
Vaison la Romaine	817586,51	1919082,66	0,23	0,59	0,60	0,26	0,15	1,83
Vesinet	584959	2432753	1,20	0,64	0,06	0,03	0,01	1,93
Vinsobres	816873,56	1929964,73	0,22	0,59	0,58	0,25	0,15	1,78
Vioménil	884940,26	2350323,38	2,56	1,57	0,30	0,07	0,04	4,55

Site	Valeurs de P _i interpolées (mm)					C _i - P _i				
	01-mai	02-mai	03-mai	04-mai	05-mai	01-mai	02-mai	03-mai	04-mai	05-mai
Albaron	0,00	0,00	0,00	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	0,00
Aubure	0,00	29,95	102,79	0,53	31,23	0,00	62,45	57,12	0,06	2,61
Avignon	1,00	1,00	1,00	105,02	1,00	0,23	0,55	0,62	27,60	0,15
Barjac	0,00	0,00	0,00	35,48	0,00	0,00	0,00	0,00	7,52	0,00
Bellenaves	0,00	21,05	47,99	0,00	6,24	0,00	5,66	0,11	0,00	0,21
Belleville	3,11	14,03	28,30	0,00	0,00	3,17	5,56	-0,08	0,00	0,00
Blayais	0,00	171,56	5,67	19,15	33,23	0,00	19,85	0,09	0,19	0,04
Boissia	0,60	247,64	189,15	58,28	2,40	0,67	145,57	28,14	5,63	0,16
Bugey	0,00	0,00	39,56	16,13	0,00	0,00	0,00	9,78	2,39	0,00
Bussy-Le-Grand	0,00	0,05	29,23	11,29	0,09	0,00	0,04	0,73	0,40	0,00
Caderousse	0,00	3,22	0,00	158,25	0,00	0,00	1,73	0,00	39,16	0,00
Castellard-Melan	0,00	219,90	0,00	10,00	179,92	0,00	183,54	0,00	3,23	35,23
Chatel de Joux	0,00	175,18	183,08	63,14	0,40	0,00	102,11	29,79	6,46	0,03
Chinon	0,00	64,15	2,18	15,52	5,41	0,00	13,62	0,00	0,02	0,01
Chooz	0,00	0,00	19,33	101,01	0,00	0,00	0,00	6,87	8,92	0,00
Chusclan	0,00	7,98	0,01	235,63	0,00	0,00	4,21	0,00	56,98	0,00
Clairvaux les lacs	0,00	276,52	174,07	55,02	1,99	0,00	162,13	26,95	5,45	0,14
Cléville	20,15	11,32	11,65	11,68	0,00	5,90	3,72	0,36	0,23	0,00
Codolet	0,00	6,95	0,01	214,09	0,00	0,00	3,69	0,00	52,25	0,00
Cornas	0,00	1,04	194,03	58,14	0,05	0,00	0,51	69,22	11,04	0,01
Crançot	0,00	62,40	221,07	80,45	1,78	0,00	37,74	29,63	7,20	0,11
Creys-Malville	0,00	0,00	163,24	0,00	0,00	0,00	0,00	34,20	0,00	0,00
Cruas	0,00	18,40	41,01	159,39	0,00	0,00	9,42	17,68	33,81	0,00
Dampierre	1,91	0,00	9,36	1,38	0,00	1,92	0,00	0,07	0,02	0,00
Fessenheim	0,00	8,82	87,77	0,00	24,42	0,00	18,05	52,74	0,00	2,39
Flamanville	5,21	65,10	10,43	61,02	0,00	0,08	19,22	-0,08	0,19	0,00
Fourques	0,00	0,00	0,00	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,77	0,00
Golfech	0,00	86,03	14,07	0,00	0,00	0,00	15,72	0,76	0,00	0,00
Gravelines	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
La Roche de Glun	0,00	3,64	196,52	32,99	0,03	0,00	1,75	67,81	6,15	0,00
Malaucène	0,00	54,92	209,74	139,90	0,00	0,00	33,79	134,67	37,40	0,00
Marigny	0,03	109,14	181,13	87,62	1,24	0,03	68,97	27,40	8,17	0,08
Mas d'Asport	0,00	0,00	0,00	4,03	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
Méaudre	0,00	1,63	50,39	31,45	0,20	0,00	0,93	21,91	6,52	0,03
Mirabel aux Baronnies	0,00	48,09	338,17	128,82	0,01	0,00	28,80	201,56	32,90	0,00
Montaigu	6,97	69,93	284,90	44,91	5,98	7,92	39,76	34,96	3,98	0,36
Montfaucon	0,00	1,45	0,00	152,70	0,00	0,00	0,78	0,00	38,05	0,00
Nainville-Les- Roches	0,00	13,27	9,30	0,00	4,34	0,00	6,80	0,26	0,00	0,04
Nogent	0,00	5,13	25,73	0,00	0,00	0,00	4,57	1,23	0,00	0,00
Noves	0,00	0,00	0,00	129,66	0,00	0,00	0,00	0,00	35,18	0,00
Nyons	0,00	55,02	151,78	100,08	0,03	0,00	32,93	89,10	25,31	0,00
Orange	0,00	0,02	0,00	83,55	0,00	0,00	0,01	0,00	20,90	0,00
Paluel	26,97	9,28	3,34	7,68	0,00	11,68	4,54	0,40	0,34	0,00
Penly	26,14	16,95	0,00	0,00	0,00	17,16	10,38	0,00	0,00	0,00
Pujaut	0,00	0,00	0,01	121,84	0,00	0,00	0,00	0,00	31,11	0,00
Saint Alban	0,00	0,00	119,97	22,08	0,01	0,00	0,00	27,53	3,31	0,00
Saint Laurent	13,40	10,90	9,97	0,00	0,00	9,48	3,03	0,17	0,00	0,00
St pierre de Vassol	0,00	0,02	92,98	113,97	0,00	0,00	0,01	61,48	31,04	0,00
Sisteron	0,00	189,69	0,00	4,62	37,65	0,00	148,82	0,00	1,44	7,07

St Laurent de Cérés	0,00	116,81	11,86	18,77	22,22	0,00	15,87	-0,05	0,16	0,03
Tavel	0,00	0,00	0,13	87,97	0,01	0,00	0,00	0,07	22,00	0,00
Tricastin	0,00	0,02	0,00	185,95	0,01	0,00	0,01	0,00	43,26	0,00
Uzès	0,00	0,00	0,00	34,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,91	0,00
Vaison la Romaine	0,00	50,00	324,70	129,92	0,01	0,00	29,67	196,16	33,48	0,00
Vesinet	0,00	0,00	18,20	0,03	5,66	0,00	0,00	1,10	0,00	0,03
Vinsobres	0,00	64,99	357,92	124,99	1,00	0,00	38,14	206,47	31,31	0,15
Vioménil	0,00	18,04	119,06	1,81	6,17	0,00	28,40	35,14	0,13	0,28

Site	$\Sigma C_i \cdot P_i$	D_i Bq/m ²	Précip. moy. ann. mm/an	R_i	Fraction R_i
Albaron	0,22999381	5434	553	2109	1,0
Aubure	122,246855	14136	1117	3614	1,0
Avignon	29,1564073	6268	683	2455	1,0
Barjac	7,51758365	6223	889	3005	1,0
Bellenaves	5,97973937	5220	763	2595	1,0
Belleville	8,65971996	3400	643	2348	0,5
Blayais	20,1714493	4000	904	3045	0,5
Boissia	180,183384	33991	1595	4890	1,0
Bugey	12,1718291	10100	1323	4163	0,5
Bussy-Le-Grand	1,17728813	5130	971	3060	1,0
Caderousse	40,8921084	10289	729	2578	1,0
Castellard-Melan	222,003701	26485	1019	3351	1,0
Chatel de Joux	138,392041	24300	1883	5659	1,0
Chinon	13,6550418	4500	639	2337	0,5
Chooz	15,7890558	6000	887	2998	0,3
Chusclan	61,1949784	17672	770	2688	1,0
Clairvaux les lacs	194,674386	34900	1701	5172	1,0
Cléville	10,2058631	1560	620	2287	1,0
Codolet	55,9382658	17596	744	2616	1,0
Cornas	80,769694	20292	926	3104	1,0
Crançot	74,6823306	14525	1491	4612	1,0
Creys-Malville	34,2050272	21000	1116	3600	1,0
Cruas	60,9126668	22000	963	3202	0,8
Dampierre	2,00574406	4100	725	2566	0,3
Fessenheim	73,1860808	5000	848	2896	0,6
Flamanville	19,4135598	2800	909	3058	0,2
Fourques	0,7668023	4744	627	2306	1,0
Golfech	16,4795125	2900	738	2601	0,5
Gravelines	0,01274354	3500	717	2544	0,2
La Roche de Glun	75,7094823	14900	890	3006	0,8
Malaucène	205,861214	28105	783	2722	1,0
Marigny	104,653167	13700	1641	5013	1,0
Mas d'Asport	1,00308249	2015	587	2198	1,0
Méaudre	29,3809368	11790	1422	3200	1,0
Mirabel aux Baronnies	263,262088	29881	806	2784	1,0
Montaigu	14,4471336	20738	1491	4612	2,0
Montfaucon	38,8246025	5070	728	1455	1,0
Nainville-Les- Roches	7,09161463	1125	659	1100	1,0
Nogent	5,80536731	4500	698	2494	0,5
Noves	35,1816615	7080	666	2408	1,0
Nyons	147,347802	14806	846	2890	1,0
Orange	20,910113	4118	723	2560	1,0
Paluel	16,9626751	4000	896	3023	0,5
Penly	27,5451025	4000	904	3044	0,5
Pujaut	31,1161338	11187	719	2550	1,0
Saint Alban	30,8407334	10000	742	2612	0,3
Saint Laurent	12,6793374	5500	668	2416	0,5
St pierre de Vassol	92,5327338	9402	675	2434	1,0
Sisteron	157,32455	24275	866	2943	0,8
St Laurent de Cérés	16,0083446	3135	957	2790	1,0
Tavel	22,0789339	8249	766	2676	1,0

Tricastin	43,275513	6200	784	2723	0,3
Uzès	7,9116276	5948	816	2811	1,0
Vaison la Romaine	25,7063369	30716	759	2658	1,0
Vesinet	1,13980983	1560	639	1275	1,0
Vinsobres	27,7580675	35117	826	2919	1,0
Vioménil	63,9502013	5040	1102	2385	1,0

ANNEXE 3 : LE KRIGEAGE

Le krigeage ordinaire sert à estimer en point x_0 une valeur $z(x_0)$ en utilisant les données $z(x_i)$ au voisinage du point à estimer. L'estimateur par krigeage ordinaire est construit par combinaison linéaire des valeurs observées :

$$\hat{z}(x_0) = w_1 \cdot z(x_1) + \dots + w_n \cdot z(x_n)$$

Les poids w_i sont choisis de façon à satisfaire les contraintes suivantes :

(i) $\hat{z}(x_0)$ est non biaisé, soit : $E[\hat{z}(x_0) - z(x_0)] = 0$

(ii) $\hat{z}(x_0)$ est de variance minimale parmi toutes les combinaisons linéaires

Le krigeage requiert une expression analytique pour le variogramme théorique $\gamma(h)$ du phénomène étudié. Ce modèle permet d'exprimer numériquement les contraintes (i) et (ii), tout en garantissant leur sens physique (la variance de $\hat{z}(x_0)$ est bien positive).

Le krigeage a les avantages suivants :

- 1) il produit une estimation $\hat{z}(x_0)$, mais donne aussi sa variance : $V[\hat{z}(x_0)]$. L'interpolation est ainsi assortie d'un critère de qualité ;
- 2) ses hypothèses (stationnarité, modèle de variogramme, isotropie) sont vérifiables. Il faut examiner pour cela le variogramme empirique construit à partir des données $z(x_i)$.

Les notions utiles pour comprendre la démarche sont un peu plus approfondies dans les paragraphes suivants (voir aussi, par exemple : Wackernagel, 1998 ; Chauvet, 1992).

Les observations $z(x_i)$ distribuées dans l'espace sont vues comme une réalisation en quelques points particuliers d'une variable aléatoire $Z(x)$ définie en tout point x de l'espace (Z est appelée aussi fonction aléatoire). Cette optique a un intérêt méthodologique : elle permet de faire appel à la théorie des probabilités et à la géostatistique.

Le krigeage ordinaire suppose que la variable Z décrivant le phénomène étudié est "intrinsèquement stationnaire au second ordre". Cette hypothèse concerne les incréments $Z(x+h) - Z(x)$ entre des points quelconques du domaine séparés de h . Elle est synonyme d'invariance par translation, l'invariance s'appliquant uniquement ici aux deux premiers moments des incréments. Elle se formule donc ainsi :

(i) Les incréments sont nuls en moyenne $E[Z(x+h) - Z(x)] = 0, \forall h$

(ii) La variance des incréments est finie et ne dépend que du vecteur h .

La stationnarité intrinsèque est l'hypothèse minimale permettant de faire du krigeage. Elle ne concerne que les incréments. La fonction aléatoire Z n'a pas à avoir une espérance/variance constante sur tout le domaine. La stationnarité intrinsèque peut donc concerner une large gamme de phénomènes. Cette hypothèse est réfutable si aucun modèle de variogramme ne s'ajuste au variogramme empirique (voir ces notions plus loin).

Cette hypothèse contourne le fait que les observations $z(x_i)$ ne constituent qu'une seule réalisation de la fonction aléatoire $Z(x)$. S'il y a stationnarité, la fonction aléatoire Z est supposée « régulière ». Les incréments observés

dans différentes portions de l'espace sont considérés comme autant d'observations d'une même variable aléatoire.

Pour une classe d'incrément h_k regroupant $n(h_k)$ couples de points, le variogramme empirique est défini par :

$$\hat{\gamma}(h_k) = 1/2n(h_k) \sum [z(x_i+h) - z(x_i)]^2 \quad \text{avec } h \in h_k$$

Dans la pratique, les classes d'incrément correspondent à un intervalle de distances selon une direction donnée (définie par un angle à une tolérance près). Le variogramme empirique est en général calculé pour des distances h inférieures à la moitié du diamètre de la région d'étude car au-delà, les points considérés ne seraient situés qu'au bord du domaine étudié. Cette fonction contient une part d'arbitraire car le choix des classes est laissé à l'appréciation de l'utilisateur.

Le variogramme empirique quantifie la dissimilarité moyenne des valeurs z entre couples de points en fonction de leur distance. En général, on observe que le variogramme empirique augmente quand l'écartement entre les points augmente. Deux comportements fréquemment observés sont :

- la discontinuité à courte distance : on parle d'*effet pépité*. Le saut du variogramme entre $|h|=0$ et $|h|>0$, quantifié par la constante de pépité, révèle un changement abrupt des dissimilarités à très courte distance, et donc une discontinuité du processus observé ;
- la stabilisation à longue distance : au-delà d'une certaine distance appelée *portée*, le variogramme atteint parfois une valeur stable appelée *palier*. La portée traduit la distance au-delà de laquelle les valeurs sont les moins corrélées. Le palier correspond à la variabilité maximale des incréments.

L'intérêt fondamental de l'hypothèse de stationnarité est d'assurer l'existence d'un variogramme théorique pour la variable aléatoire $Z(x)$. Sous cette hypothèse, on peut définir alors la fonction finie et ne dépendant que du vecteur h :

$$\gamma(h) = 1/2 E([z(x+h) - z(x)]^2)$$

appelée variogramme théorique. Cette fonction traduit la structure spatiale de la variable Z . Elle quantifie la dissimilarité moyenne entre des points du domaine selon leur distance. Le variogramme est nul pour $|h|=0$ car la dissimilarité est nulle entre un point et lui-même.

Pour le krigeage, le variogramme doit être défini sous une forme analytique parmi les nombreuses expressions proposées dans la littérature. Les expressions les plus courantes sont les modèles gaussien, exponentiel, sphérique et d'effet pépité. Par exemple :

- le modèle gaussien s'écrit :

$$\gamma(h) = \sigma^2 [1 - \exp(-(|h|/\Phi)^2)]$$

où Φ est la portée, et σ^2 le palier.

- le modèle d'effet pépité s'écrit :

$$\gamma(h) = 0 \text{ si } |h|=0$$

$$\gamma(h) = \tau^2 \sin$$

où τ^2 est la constante de pépité

Comme l'illustrent ces exemples, les modèles courants de variogramme sont isotropes. Ils ne dépendent que de la norme $|h|$ des incréments et pas de leur direction. Les valeurs de la fonction aléatoire Z sont alors supposées avoir la même structure que celle que soit la direction de l'incrément h .

L'intérêt d'un variogramme théorique est de pouvoir étendre la mesure de dissimilarité au-delà des seules gammes de distance observées. Son choix se fait en général par ajustement visuel où l'essentiel est de vérifier la conformité aux comportements observés/supposés à l'origine et à longue distance (zones d'extrapolation). Le bon ajustement des points intermédiaires (zone d'interpolation) n'est pas aussi sensible sur les prévisions. Cependant, si aucun modèle théorique n'est raisonnablement compatible avec le variogramme empirique, l'hypothèse de stationnarité doit être remise en cause, et le krigeage ordinaire n'est plus applicable.

Le krigeage produit non seulement une estimation locale $\hat{z}(x_0)$ de $z(x_0)$, mais donne aussi la variance $V[\hat{z}(x_0)]$ de cet estimateur. Son expression dépend uniquement des poids w_i et du variogramme théorique adopté :

$$V[\hat{z}(x_0)] = Z \sum w_i \gamma(x_i - x_0) - \sum \sum w_i w_j \gamma(x_i - x_j)$$

Cette variance est un indice de qualité assez grossier :

- a) elle ne permet pas de faire de tests statistiques. La notion de distribution pour $Z(x)$ (e.g. loi normale) est totalement absente du krigeage. Et la variance $V[\hat{z}(x_0)]$ ne permet pas à elle seule de tester une hypothèse concernant $Z(x_0)$;
- b) la variance d'estimation dépend étroitement du variogramme théorique $\gamma(h)$, et notamment son comportement à l'origine. Si γ est monotone et comprend un terme d'effet pépité τ^2 , la variance d'estimation sera nécessairement supérieure à τ^2 . En d'autres termes, une estimation locale ne pourra pas être moins incertaine que le phénomène étudié.

De nombreux logiciels existent dans le domaine public. Nous avons utilisé le logiciel statistique R (R Development Core Team, 2004) et sa librairie géostatistique geoR (Ribeiro & Diggle, 2001).

Références

- Wackernagel, H., 1998. Multivariate geostatistics. 2nd edition, Springer Verlag Berlin Heidelberg.
- Chauvet, P., 1992. Traitement des données à support spatial : la géostatistique et ses usages. Rapport N-28/92/G, Octobre 1992, École des Mines de Paris.
- R Development Core Team, 2004. R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, <http://www.R-project.org>
- Ribeiro Jr., P.J. & Diggle, P.J., 2001. geoR: a package for geostatistical analysis. RNEWS 1(2): 1-18. ISSN 1609-3631

ANNEXE 4 : MÉTHODES DE DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES α ET β

La relation de dépôt originale et ses variantes envisagées ont été étudiées dans le cadre du modèle linéaire. Cette approche statistique est une généralisation de la régression linéaire simple à plusieurs variables explicatives quantitatives (ici les pluies et activités volumiques) et/ou qualitatives (ici le jour, la région...).

LE MODÈLE LINÉAIRE

Un modèle est dit linéaire s'il suppose que les réalisations $Y = {}^t(y_1, y_2, \dots, y_n)$ de la variable à expliquer (ici l'activité surfacique au sol) dépendent de variables explicatives fixées X_1, X_2, \dots selon une relation de la forme :

$$Y = (X_1, X_2, \dots)B + \varepsilon$$

où B est un vecteur de coefficients constants, et ε est l'erreur. Le terme $Y^* = (X_1, X_2, \dots)B$ est la composante déterministe du modèle. Il représente les valeurs de Y expliquées par le modèle. Les coefficients B sont estimés en optimisant un critère d'ajustement. Le terme ε est la composante aléatoire du modèle. Il représente l'erreur commise en approchant Y par Y^* . C'est la part non expliquée par le modèle.

Par ailleurs, les réalisations de l'erreur $\varepsilon = {}^t(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots)$ -appelées aussi résidus- sont supposées :

- (H₁) centrées, soit $E(\varepsilon) = 0$. Le modèle est vrai en moyenne dans toute la gamme d'observation ;
- (H₂) indépendantes et de même variance σ^2 . Les erreurs commises sur les observations Y ont la même dispersion dans toute la gamme d'observation ;
- (H₃) suivre une distribution normale. Dans ce cas, le modèle sera dit *gaussien*. Cette hypothèse, facultative, est avantageuse. Elle permet de conduire des tests d'hypothèse et de construire des intervalles de confiance sur les paramètres et prédictions.

Toutes ces hypothèses sont vérifiables par examen graphique des résidus $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots)$.

Les principes et résultats utiles de la démarche sont détaillés dans les paragraphes suivants (voir aussi [1]).

ESTIMATION

Les coefficients du modèle ont été estimés par la méthode des moindres carrés. D'un point de vue intuitif, cette approche consiste à retenir les coefficients B qui rapprochent le plus les points estimés y_i^* et observés y_i . C'est bien un critère d'ajustement. D'un point de vue analytique, la quantité à minimiser est la somme des carrés des résidus (SCR):

$$SCR = \sum (y_i - y_i^*)^2$$

Ce problème d'optimisation a une solution unique lorsque le problème est régulier, c'est-à-dire lorsqu'il y a plus d'observations que de coefficients à estimer, et que les variables explicatives n'apportent pas la même information (l'une n'est pas combinaison linéaire des autres). On a alors :

$$B^* = ({}^tXX)^{-1} X Y \quad \text{avec: } X = (X_1 \ X_2 \ \dots)$$

Ce critère d'optimisation est le plus couramment employé car il conduit à des estimations \hat{B} cohérentes :

- 1) non biais. $E(\hat{B})=B$. L'estimation de B est juste en moyenne sur plusieurs échantillons ;
- 2) optimalité. La variance de \hat{B} est minimale.

La composante déterministe du modèle associée sera :

$$Y^* = X \hat{B}$$

Pour quantifier la composante aléatoire du modèle, la variance des résidus σ^2 s'estime par la statistique s^2 non biaisée:

$$s^2 = SCR/(n-p)$$

avec n : nombre d'observations, p : nombre de paramètres

Tous ces résultats concernent jusqu'ici des régresseurs déterministes X_1, X_2, \dots fixes et connus avec exactitude. Si leurs valeurs sont en réalité entachées d'imprécision (par exemple pluies et activités interpolées), nous nous situons dans le cas d'un modèle linéaire avec régresseurs stochastiques. L'estimation des moindres carrés \hat{B} et la prédiction Y^* seront biaisés (et donc à proscrire) si on constate une corrélation significative entre les résidus et une des variables explicatives. Soit :

$$\exists i / \rho(X_i, \varepsilon) \neq 0$$

COMMENT JUGER LA QUALITÉ DE L'AJUSTEMENT ?

Il faut vérifier les hypothèses (H_1, H_2) du modèle linéaire avant toute exploitation des ajustements. Ces hypothèses peuvent se vérifier sur le graphe représentant les résidus ε_i en fonction des valeurs ajustées y_i^* .

(H_1) est satisfaite si les résidus sont répartis de part et d'autre de 0 dans toute la gamme des valeurs prédites. Des résidus systématiquement positifs ou négatifs indiquent un défaut local d'ajustement.

(H_2) est satisfaite si l'amplitude des résidus est constante dans toute la gamme des valeurs prédites. Quand on déroge à cette règle, certaines observations prennent plus d'importance dans l'estimation des coefficients, ce qui n'est pas souhaitable *a priori*.

De façon quantitative, l'écart type des erreurs $\sqrt{s^2}$ quantifie l'importance de la composante aléatoire, i.e. la part non expliquée par le modèle. Plus cet écart-type est faible, plus l'ajustement fidèle aux observations, et plus les prédictions seront précises. Ce critère est insuffisant car il incite à augmenter sans discernement le nombre de variables explicatives. Il ne permet pas de juger de la pertinence d'une variable explicative.

L'usage du coefficient de détermination R^2 est à proscrire ici pour juger de la qualité de l'ajustement. Le coefficient R^2 perd en effet tout son sens si le modèle ajusté ne comprend pas de terme constant (ordonnée à l'origine). Les relations de dépôt envisagées sont précisément dans ce cas particulier. Sans précipitation ni activité dans l'air, on suppose qu'il n'y a pas de dépôt.

TESTS ET INTERVALLES DE CONFIANCE (CAS GAUSSIEN)

La pertinence des ajustements et prédictions s'évalue bien mieux dans le cadre de tests statistiques. Mais ces tests sont uniquement autorisés si le modèle linéaire est gaussien (hypothèse H_3).

On peut vérifier la normalité des résidus (hypothèse H_3) sur un graphe appelé diagramme de Henri (*quantile to quantile plot* en anglais). Ce graphe représente les quantiles empiriques des résidus en fonction des quantiles théoriques de la loi normale. Plus le graphe est proche d'une droite, et plus les résidus ont une distribution proche de la loi normale.

Dans le cas gaussien, il est possible, pour un modèle donné, de faire des tests sur les paramètres/prédictions et de construire leur intervalle de confiance car leurs distributions sont alors connues :

Pour la composante déterministe,

1) les coefficients estimés B^* suivent aussi une loi normale de moyenne B et de variance :

$$V(B^*) = \sigma^2 ({}^tXX)^{-1} \text{ estimée par } s^2 ({}^tXX)^{-1}$$

L'intervalle de confiance bilatéral des paramètres B au niveau α est donc :

$$B^* \pm t(n-p, 1-\alpha/2) s \sqrt{({}^tXX)^{-1}}$$

où t désigne les quantiles de la loi de Student.

2) pour des valeurs données $x=(x_1, x_2, \dots)$ des variables explicatives, l'ajustement $y^* = xB^*$ suit une loi normale de moyenne xB et de variance :

$$V(y^*) = x V(B^*) {}^t x \text{ estimée par } s^2 x ({}^tXX)^{-1} {}^t x$$

Pour la composante aléatoire, l'erreur suit une loi normale centrée de variance σ^2 estimée par s^2 .

Les distributions de la composante aléatoire et déterministe sont indépendantes. Les intervalles de confiance bilatéraux des prédictions au niveau α sont donc :

$$y^* \pm t(n-p, 1-\alpha/2) s \sqrt{[1 + (x ({}^tXX)^{-1} {}^t x)]}$$

Dans le cas gaussien, on peut aussi comparer globalement deux modèles entre eux s'ils sont « emboîtés ». Un modèle sera dit emboîté dans un autre s'il en est un cas particulier, par exemple avec certains paramètres supposés fixes, égaux ou nuls (cas les plus courants). Considérons un modèle Ω à p paramètres, et un sous-modèle emboîté $\omega \subset \Omega$ à $q < p$ paramètres. Notons SC_Ω et SC_ω les sommes des carrés résiduels associées. On peut tester l'hypothèse « H_0 : le modèle $\omega \subset \Omega$ est vrai » contre « A : le modèle Ω est vrai » avec la statistique :

$$f = [(SC_\omega - SC_\Omega) / (p-q)] / [SC_\Omega / (n-p)]$$

qui suit une loi de Fisher $F(p-q, n-p)$ si le modèle Ω est vrai. Le modèle complexe Ω sera préféré si son pouvoir explicatif est beaucoup plus important celui du modèle simple ω . Ce test introduit ainsi le principe de modération dans l'élaboration de modèles.

MISE EN ŒUVRE

De nombreux logiciels existent dans le domaine public. Nous avons utilisé le logiciel statistique R [2].

Références

- [1] Draper, N. et Smith, H., 1981. Applied regression analysis. 2nd edition, John Wiley & sons, New York
- [2] R Development Core Team, 2004. R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, <http://www.R-project.org>