

# Le modèle IRSN 2003 des retombées de l'accident de Tchernobyl en France

A. Aurengo  
18 décembre 2005

---

## Résumé

---

L'estimation des retombées de l'accident de Tchernobyl sur la France a fait l'objet de nombreux rapports et publications mais reste un sujet de controverses. Cette note est une analyse de la validité du modèle présenté par l'IPSN en 2002 puis par l'IRSN en 2003 pour quantifier ces retombées.

En 1997, les auteurs de ce modèle ont publié un rapport<sup>1</sup> sur ces retombées, fondé sur les données disponibles considérées comme les plus fiables: concentrations en césium 137 (<sup>137</sup>Cs) et en iode 131 (<sup>131</sup>I) mesurées dans le lait, les légumes-feuilles, l'air et l'eau de pluie par différents organismes lors de l'accident. La validité des données recueillies au sol lors de l'accident n'y est pas mise en cause, mais leur caractère parcellaire a conduit l'IPSN à utiliser son logiciel ASTRAL qui permet l'estimation des retombées à partir de nombreuses données recueillies sur des produits alimentaires. La cartographie des dépôts moyens de <sup>137</sup>Cs et <sup>131</sup>I sur les terres agricoles, calculés au moyen d'ASTRAL, permet de définir de l'ouest à l'est, quatre zones de contamination croissante.

Cette cartographie est cohérente avec les cartes du SCPRI (fondées sur la mesure de l'activité de prélèvements « sol + végétation »), avec la cinétique de décroissance des contaminations des aliments mesurée et calculée, avec les données moyennes de la CRII-RAD, avec les estimations faites en Allemagne par la Commission de protection radiologique allemande et avec 2200 mesures conduites sur les personnels du CEA, de la COGEMA et d'EDF.

Les résultats d'ASTRAL sont à la base d'une estimation dosimétrique moyenne (dose efficace et dose à la thyroïde) pour les adultes et les enfants selon leur résidence. Cette dosimétrie a été utilisée dans un rapport conjoint IPSN-InVS de 2001 sur l'estimation des conséquences sanitaires de l'accident.

En revanche, ces résultats sont des valeurs moyennes qui ne permettent pas d'appréhender la variabilité locale des retombées. Cette variabilité qui est sans conséquence dosimétrique sur la majorité de la population qui consomme des produits alimentaires mélanges de provenances diverses, peut aboutir à des contaminations plus élevées pour des personnes vivant en autarcie sur des terrains de contamination supérieure à la moyenne. Cette difficulté a conduit les auteurs du rapport 1997 à élaborer une nouvelle approche, au sein de l'IPSN puis de l'IRSN.

En janvier 2002, à Ajaccio<sup>2</sup>, l'IPSN a ainsi présenté un nouveau modèle, fondé sur une relation linéaire entre la pluie et les dépôts, observée à partir de mesures conduites dans la basse vallée du Rhône en 1999-2000. Cette relation a été étendue à l'est du méridien 4° en supposant que la contamination de l'air y était constante pendant le passage du « nuage » et uniforme (et que les dépôts ne dépendaient donc que de la pluie). Elle a été appliquée à la Corse pour estimer les retombées locales et en déduire des estimations dosimétriques. Cette première version du modèle a été publiée en 2003<sup>3</sup>

La même année, le modèle est étendu par l'IRSN à l'ensemble du territoire français, en modélisant la concentration de l'air à l'ouest du méridien 4° par une relation exponentielle décroissante d'est en ouest<sup>4</sup>.

La carte qui résulte de ce modèle montre, en particulier dans l'est, des valeurs de contamination 2 à 4 fois plus élevées que celles fournies par ASTRAL. C'est elle qui sous-tend désormais la position officielle de l'Institut.

Les critiques formulées contre cette modélisation ont conduit l'IRSN à une analyse détaillée du modèle et

---

<sup>1</sup> Renaud P, Beaugelin K, Maubert H, Ledenvic P. Les retombées en France de l'accident de Tchernobyl. Conséquences radioécologiques et dosimétriques. IPSN. EDP Sciences 1997. (voir Annexe 6).

<sup>2</sup> Actes de la « Journée d'information scientifique sur les conséquences sanitaires de l'accident de Tchernobyl en Corse » organisée à Ajaccio 31 janvier 2002 par la Préfecture de Corse.

<sup>3</sup> Renaud P, Pourcelot L, Métivier JM, Morello M. Mapping of <sup>137</sup>Cs deposition over eastern France 16 years after 137 the Chernobyl accident. The Science of Total Environment 309 : 257-264 ; 2003.

<sup>4</sup> Rapport IRSN « Tchernobyl 17 ans après » publié fin avril 2003.

à des calculs complémentaires qui ont fait l'objet de deux rapports, l'un en 2004<sup>5</sup>, l'autre fin novembre 2005<sup>6</sup>.

Les principales faiblesses du modèle IRSN-2003, analysées dans cette note sont les suivantes :

- L'identification des paramètres du modèle utilise exclusivement des mesures de dépôts faites dans une zone très réduite de la France appelée « zone atelier », plus de dix ans après l'accident, ce qui ne permet pas d'estimer la part respective due aux retombées des essais nucléaires et à Tchernobyl.
- La méthode utilisée pour l'identification des paramètres est inadaptée car elle ne tient pas compte de la variance très différente des données.
- Les retombées des essais nucléaires, estimés à partir de la relation pluie-dépôts, sont considérés comme uniformes à  $980 \text{ Bq.m}^{-2}$  sur toute la France où ils peuvent en réalité dépasser  $5000 \text{ Bq.m}^{-2}$ .
- Le modèle postule une contamination de l'air constante pendant toute la durée des retombées et uniforme à longitude égale. Il utilise des valeurs très différentes de celles mesurées en 2002 par l'OPRI sur des filtres à air conservés depuis 1986. Certains jours et en certains points, la surestimation de la concentration de l'air par le modèle dépasse un facteur 4 à l'est du méridien  $4^\circ$  et 100 à l'ouest.
- Le modèle suppose constant et uniforme le coefficient de lessivage (par lequel il faut multiplier la pluviométrie et la contamination de l'air pour obtenir le dépôt lié à la pluie) alors qu'il varie du simple au double selon le jour et selon la région considérés.
- La valeur du coefficient de lessivage réellement utilisée est nettement plus élevée que celle trouvée par la plupart des auteurs (les auteurs du modèle ne pouvaient pas s'en rendre compte, les valeurs de contamination de l'air utilisées dans la zone atelier étant erronées).
- La modélisation utilise en chaque point la pluviométrie globale sur 5 jours multipliée par la concentration dans l'air et non un calcul jour après jour, ce qui conduit à multiplier la pluie d'un jour par la contamination d'un autre jour. Pour les sites de l'est où les données nécessaires étaient disponibles, cela conduit à une surestimation des dépôts dans un rapport de 1,5 à 6,6.
- La confrontation des valeurs obtenues par le modèle à des données réelles montre une surestimation par le modèle d'un facteur qui peut atteindre 3,3 en Corse, ce qui conduit les auteurs à mettre en cause la validité du modèle pour des pluies dépassant 40 mm.
- Malgré cette constatation, les auteurs utilisent leur modèle en Corse pour des estimations dosimétriques, dans une zone où la pluviométrie était de 96 mm.
- Cette approche dosimétrique ne tient pas compte de la variabilité (de 18 à 1,8) du rapport des dépôts d'iode aux dépôts de césium en fonction de la pluie, rapport qu'ils considèrent toujours égal à 7,5.
- Le modèle IRSN-2003 n'est en cohérence ni avec les données du SCPRI, ni avec les résultats d'ASTRAL, ni avec les données obtenues près de nos frontières en Belgique, Allemagne, Suisse et Italie, ni avec les données moyennes de la CRII-RAD présentées dans le rapport IPSN-1997.

Un modèle alternatif a été mis en œuvre en 2004-2005 par l'IRSN, fondé sur un calcul jour après jour, sur une estimation de la contamination de l'air plus réaliste (mesures quotidiennes interpolées par krigeage), et prenant mieux en compte les retombées des essais nucléaires. Ce modèle a été identifié sur des données dont la sélection écarte presque toutes celles de 1986 qui étaient considérées comme les plus fiables dans le rapport IPSN-1997. La plupart (56%) des données retenues pour cette identification sont celles de la zone atelier ce qui explique en grande partie que les résultats de ces nouveaux calculs ne soient pas

---

<sup>5</sup> Renaud R, Leprieur F, Métivier JM, Pourcelot L, Duffa C, Lemaitre N, Linden G, Champion D. Rapport IRSN « Eléments de réponse sur les représentations cartographiques des retombées de l'accident de Tchernobyl en France » DEI n° 04-02. Mars 2004.

<sup>6</sup> Renaud P, Garcia-Sanchez L, Métivier JM, Pourcelot L, Champion D. Interprétation phénoménologique et analytique de la relation pluie-dépôts utilisée pour la reconstitution des dépôts de  $^{137}\text{Cs}$  en France consécutifs à l'accident de Tchernobyl. Rapport IRSN DEI 2005-03. Novembre 2005.

significativement différents de ceux du modèle initial.

En conclusion, l'ensemble de ces imprécisions méthodologiques, l'écart parfois considérable entre les hypothèses très simplificatrices retenues et les données disponibles (en particulier pour la contamination de l'air et les retombées des essais nucléaires), l'écart entre les résultats du modèle et les mesures, ses résultats incompatibles avec ceux exposés et dûment validés dans le rapport IPSN-1997, conduisent à considérer que le modèle IRSN-2003 ne permet pas une estimation quantitative fiable des retombées de Tchernobyl et encore moins les estimations dosimétriques pour lesquelles il a été utilisé.

---

## Introduction

---

Le rapport « Tchernobyl 17 ans après » publié par l'IRSN fin avril 2003 présente comme la position officielle de l'Institut un modèle (IRSN-2003) utilisant une relation pluie-dépôt.

Un modèle analogue, publié en 1988, est à la base d'une estimation des retombées sur le Royaume Uni<sup>7</sup>. Ses auteurs, Clark et Smith, ont utilisé une relation pluie-dépôts identifiée à partir de mesures de contamination de l'air et de mesures d'échantillons d'herbe, contemporaines de l'accident, qui leur semblaient plus fiables que des mesures plus tardives sur les sols<sup>8</sup>.

Le modèle IRSN-2003 utilise l'extension à l'ensemble du territoire d'une relation pluie-dépôt établie dans la basse vallée du Rhône. L'extension à l'ensemble du territoire a nécessité la modélisation de la contamination de l'air, supposée uniforme à l'est du méridien 4° et assimilée à une exponentielle décroissante d'est en ouest, uniforme pour une même longitude. La contamination a été supposée constante pendant les 5 jours du passage du nuage de Tchernobyl sur la France, du 1<sup>er</sup> au 5 mai 1986.

Ce modèle a permis de préciser la grande hétérogénéité locale des dépôts, ce qui peut avoir un impact dosimétrique notable pour des personnes consommant préférentiellement des produits alimentaires provenant de zones de forte contamination.

Le modèle de l'IRSN conduit à une nouvelle carte qui s'écarte notablement de la carte moyenne des dépôts sur les surfaces agricoles donnée dans le rapport IPSN-1997 et qui reste la référence pour les calculs dosimétriques moyens.

L'écart entre les valeurs données par le modèle IRSN-2003 et le rapport IPSN-1997 sont difficiles à apprécier car il faudrait connaître les valeurs moyennes département par département. Approximativement, et pour les régions de l'est les plus contaminées, le modèle IRSN-2003 conduit à des valeurs 2 à 4 fois plus élevées que celles du rapport IPSN-1997.

Les critiques de la valeur quantitative du modèle IRSN-2003 ont conduit ses auteurs à la rédaction d'un mémoire réfutant mes réserves et remis en mars 2004 au groupe de travail constitué pour la mission que m'ont confiée les Ministres de la Santé et de l'Ecologie.

À la suite de la présentation de ce mémoire, l'IRSN a effectué de nouveaux calculs dont les résultats sont compilés dans un rapport dont la version définitive m'a été envoyée fin novembre 2005.

Cette note a pour but de discuter la validité du modèle « IRSN-2003 ». Nous analysons successivement :

1. la formulation du modèle ;
2. les hypothèses simplificatrices retenues par les auteurs ;
3. l'identification du modèle avec les données de la « zone atelier » ;
4. l'extension du modèle au reste du territoire situé à l'est du méridien 4° ;
5. l'extension du modèle au reste du territoire situé à l'ouest du méridien 4° ;
6. la validation du modèle ;
7. l'utilisation du modèle pour des estimations dosimétriques ;
8. les travaux complémentaires effectués sur ce sujet par l'IRSN pour répondre aux réserves formulées à l'encontre de ce modèle.

Les citations extraites des différents textes et rapports sont en italiques.

---

<sup>7</sup> Clark MJ, Smith FB. Wet and dry deposition of Chernobyl releases. Nature 332, 245-249, 1988

<sup>8</sup> *early grass measurements avoid the need to correct for weapons fallout, and variations due to surface water run off and drainage are likely to be small, compared to later soil measurements*

## 1 Formulation du modèle

Cette formulation n'est pas celle des auteurs ; je l'ai explicitée pour mieux préciser les hypothèses sur lesquelles sont fondés leurs calculs.

Le modèle IRSN-03 a été établi pour estimer les retombées de l'accident de Tchernobyl sur la France, en tenant mieux compte de la variabilité locale de ces retombées. Il repose sur une modélisation des dépôts de césium 137 ( $^{137}\text{Cs}$ ), déjà utilisée au Royaume Uni en 1988 [CLA.88] et qui, pour une période de temps donnée  $\Delta t$ , décompose le dépôt total au point  $j$ , noté  $D_{Total}(j, \Delta t)$  en :

- un dépôt « humide »  $D_{Humide}(j, \Delta t)$  proportionnel à la pluviométrie totale  $P(j, \Delta t)$  au point  $j$  pendant la période considérée et à la concentration du  $^{137}\text{Cs}$  dans l'air  $C(j, \Delta t)$ . Le facteur de proportionnalité, appelé « coefficient de lessivage », dépend *a priori* de la période considérée  $\Delta t$  et du point  $j$  ; il est noté  $l(j, \Delta t)$  ;
- un dépôt « sec »  $D_{Sec}(j, \Delta t)$  indépendant de la pluviométrie, proportionnel à la concentration du  $^{137}\text{Cs}$  dans l'air et dépendant de la nature des sols. Le facteur de proportionnalité, appelé « coefficient de dépôt sec », dépend *a priori* du point  $j$  (nature locale du sol) ; il est noté  $s(j)$ .

Le modèle s'écrit donc, en un point  $j$  :

$$\begin{aligned} D_{Humide}(j, \Delta t) &= l(j, \Delta t) \times P(j, \Delta t) \times C(j, \Delta t) \\ D_{Sec}(j, \Delta t) &= s(j) \times C(j, \Delta t) \\ D_{Total}(j, \Delta t) &= D_{Humide}(j, \Delta t) + D_{Sec}(j, \Delta t) = (l(j, \Delta t) \times P(j, \Delta t) + s(j)) \times C(j, \Delta t) \end{aligned} \quad [1]$$

La mesure de la concentration du  $^{137}\text{Cs}$  effectuée dans le sol du point  $j$  après l'accident, notée  $M(j)$  prend en compte les retombées totales de l'accident pendant toute la période de contamination de l'air (soit du 1<sup>er</sup> au 5 mai 1986 inclus) et les retombées locales des essais nucléaires  $E(j)$  ; donc :

$$M(j) = E(j) + \sum_{\Delta t=1-5mai} D_{Total}(\Delta t, j) = E(j) + \sum_{\Delta t=1-5mai} (l(j, \Delta t) \times P(j, \Delta t) + s(j)) \times C(j, \Delta t) \quad [2]$$

## 2 Hypothèses simplificatrices retenues par les auteurs

À partir de cette formulation générale, les auteurs du modèle ont simplifié le modèle en faisant les hypothèses suivantes dont nous discuterons la validité :

- Le coefficient de lessivage  $l(j, \Delta t)$  est supposé uniforme sur tout le territoire métropolitain et en Corse (donc indépendant de  $j$ ), et constant du 1<sup>er</sup> au 5 mai (donc indépendant de  $\Delta t$ ) ; il est noté  $l$ .
- Le coefficient de dépôt sec  $s(j)$  est supposé uniforme sur tout le territoire métropolitain et en Corse ; il est noté  $s$ .
- La concentration moyenne du  $^{137}\text{Cs}$  dans l'air est supposée constante en un lieu donné pendant la période du 1<sup>er</sup> au 5 mai. Cette hypothèse implicite est avérée par la manière dont les auteurs estiment le coefficient de lessivage à partir des mesures obtenues dans la basse vallée du Rhône (en supposant constante cette concentration, les 3 et 4 mai) et calculent les retombées sur le territoire français (en multipliant en chaque point la pluviométrie du 1<sup>er</sup> au 5 mai par la même valeur de la concentration de  $^{137}\text{Cs}$  dans l'air). Nous noterons donc :  $C(j, \Delta t) = C^{1-5}(j)$ . Il en résulte que la pluviométrie n'est pas prise en compte jour après jour, mais globalement sur la période du 1<sup>er</sup> au 5 mai. Nous noterons  $\sum_{\Delta t=1-5mai} P(j, \Delta t) = P^{1-5}(j)$
- Les retombées des essais nucléaires  $E(j)$  sont supposés uniformes sur tout le territoire métropolitain et en Corse :  $E(j) = E$ .

Ces hypothèses simplificatrices conduisent à l'écriture suivante du modèle [2] :

$$M(j) = E + (l \times P^{1-5}(j) + s) \times C^{1-5}(j) \quad [3]$$

- Les coefficients  $l$  et  $s$  ont été estimés à partir de données mesurées dans le sol en 1999-2000, dans la basse vallée du Rhône, dans une zone appelée « zone atelier » (ZA).
- L'estimation des retombées des essais nucléaires n'a pas utilisé les données disponibles sur ces retombées, mais a été faite par différence à partir d'une estimation de  $E + s \times C^{1-5}(j)$  (intercept d'une régression linéaire entre  $M(j)$  et  $P^{1-5}(j)$  utilisant [3]) et d'une estimation globale des dépôts secs  $s \times C^{1-5}(j)$  issue des données de la littérature.
- La concentration moyenne du  $^{137}\text{Cs}$  dans l'air au point  $j$  pendant la période du 1<sup>er</sup> au 5 mai,  $C^{1-5}(j)$  a été supposée uniforme à l'est du méridien  $4^\circ$ , et égale à la concentration moyenne du  $^{137}\text{Cs}$  dans l'air dans la zone atelier les 3 et 4 mai 1986, valeur que nous noterons  $C^{3-4}(ZA)$ .
- La concentration du  $^{137}\text{Cs}$  dans l'air au point  $j$  à l'ouest du méridien  $4^\circ$  a été supposée ne dépendre que de la longitude  $\text{lng}(j)$  et a été modélisée par une exponentielle décroissante d'est en ouest, avec la valeur :  $C^{1-5}(j) = C^{3-4}(ZA) \times e^{0,44(\text{lng}(j)-4,5)}$

Le modèle utilisé est donc de la forme :

$$\begin{aligned} \text{longitude}(j) \geq 4^\circ &\Rightarrow M(j) = E + (l \times P^{1-5}(j) + s) \times C^{3-4}(ZA) \\ \text{longitude}(j) < 4^\circ &\Rightarrow M(j) = E + (l \times P^{1-5}(j) + s) \times C^{3-4}(ZA) \times e^{0,44(\text{lng}(j)-4,5)} \end{aligned} \quad [4]$$

Et les retombées totales liées à l'accident de Tchernobyl sont donc modélisées sous la forme :

$$\begin{aligned} \text{longitude}(j) \geq 4^\circ &\Rightarrow D_{\text{Total}}(j) = (l \times P^{1-5}(j) + s) \times C^{3-4}(ZA) \\ \text{longitude}(j) < 4^\circ &\Rightarrow D_{\text{Total}}(j) = (l \times P^{1-5}(j) + s) \times C^{3-4}(ZA) \times e^{0,44(\text{lng}(j)-4,5)} \end{aligned} \quad [5]$$

Le modèle n'est pas présenté par leurs auteurs sous cette forme explicite mais avec les produits  $L = l \times C^{3-4}(ZA)$  et  $S = s \times C^{3-4}(ZA)$ , sous la forme :

$$\begin{aligned} \text{longitude}(j) \geq 4^\circ &\Rightarrow D_{\text{Total}}(j) = L \times P^{1-5}(j) + S \\ \text{longitude}(j) < 4^\circ &\Rightarrow D_{\text{Total}}(j) = (L \times P^{1-5}(j) + S) \times e^{0,44(\text{lng}(j)-4,5)} \end{aligned} \quad [6]$$

---

### 3 Identification du modèle avec les données de la « zone atelier »

---

Les données recueillies en 1999-2000 dans la basse vallée du Rhône (zone atelier) ont été utilisées pour établir une relation « pluie-dépôts » entre la pluviométrie pendant le passage du nuage de Tchernobyl et les dépôts de  $^{137}\text{Cs}$  mesurés dans le sol.

Les données qui m'ont été communiquées le 21 octobre 2005 ne sont pas complètes. Elles ne comprennent que 120 prélèvements, alors que les publications sont fondées sur 137 prélèvements [Renaud.03, Renaud.04.D]. J'ai supposé que les 17 données manquantes n'étaient pas de nature à modifier sensiblement mes conclusions.

L'analyse des prélèvements a porté sur le  $^{137}\text{Cs}$ , dont l'activité a été recalculée à la date de l'accident, en corrigeant la décroissance radioactive.

Ces données ont fait l'objet d'une régression linéaire qui donne le résultat suivant [Renaud.03, Renaud.04.B, Renaud.04.D] :

$$\text{Dépôt total } ^{137}\text{Cs} (\text{Bq.m}^{-2}) = 560 [\text{précipitations du 1}^{\text{er}} \text{ au 5 mai (mm)}] + 1984$$

Ce que nous mettons sous la forme :

$$M(j) = L \times P^{1-5}(j) + q$$

avec  $L = 560$  et  $q = 1984$

où  $M(j)$  représente le dépôt total (essais nucléaires + Tchernobyl) au point  $j$  ;  $L$  le produit du

coefficient de lessivage par la concentration moyenne du  $^{137}\text{Cs}$  dans l'air ;  $P^{1-5}(j)$  la pluie du 1<sup>er</sup> au 5 mai 1986 et  $q$  la somme des dépôts secs et des retombées des essais nucléaires ( $q = S + E$ ).

Les auteurs ne donnent pas l'intervalle de confiance des résultats de la régression linéaire qu'ils utilisent. Avec les données qui m'ont été transmises, on obtient :

- pente  $L = 559$  [IC 95 % : 488 à 629],
- ordonnée à l'origine  $q = 1702$  [IC 95 % : -741 à 4147].

Les auteurs [Renaud.03] estiment ensuite le coefficient de lessivage à partir de la contamination moyenne dans la zone atelier  $C^{3-4}(ZA)$  les 3 et 4 mai, prise égale à  $0,65 - 0,75 \text{ Bq.m}^{-3}$ . Les auteurs justifient que leur calcul ne porte que sur ces deux jours par le fait que la pluviométrie était négligeable les 1, 2 et 5 mai dans la zone atelier.

Ils en déduisent une valeur du coefficient de lessivage entre  $750 \times 10^3$  et  $860 \times 10^3 \text{ Bq.m}^{-3}$  (de pluie) par  $\text{Bq.m}^{-3}$  (d'air).

Les auteurs insistent sur la validation de cette valeur par sa proximité avec des mesures analogues conduites par l'IPSN et le SCPRI :  $520 \times 10^3$  à  $720 \times 10^3$  dans le sud-est de la France et  $640 \times 10^3$  à  $710 \times 10^3$  dans le nord-est ; ou à Paris par Thomas [Thomas 86] :  $750 \times 10^3$ .

Enfin, les dépôts secs de Tchernobyl sont estimés à environ  $1000 \text{ Bq.m}^{-2}$  en se fondant sur une donnée publiée dans [UNSCEAR 88]. Les auteurs attribuent la différence  $1984 - 1000 = 984$  aux retombées des essais nucléaires.

Le modèle des dépôts  $M(j)$  et des retombées totales de Tchernobyl  $D_{Total}(j)$  prend donc la forme :

$$M(j) = L \times P^{1-5}(j) + E + S = 560 \times P^{1-5}(j) + 984 + 1000$$

$$D_{Total}(j) = 560 \times P^{1-5}(j) + 1000$$

Soit, en retenant la valeur moyenne  $C^{3-4}(ZA) \approx 0,7 \text{ Bq.m}^{-3}$  :

$$D_{Total}(j) = (800 \times P^{1-5}(j) + 1430) \times 0,7$$

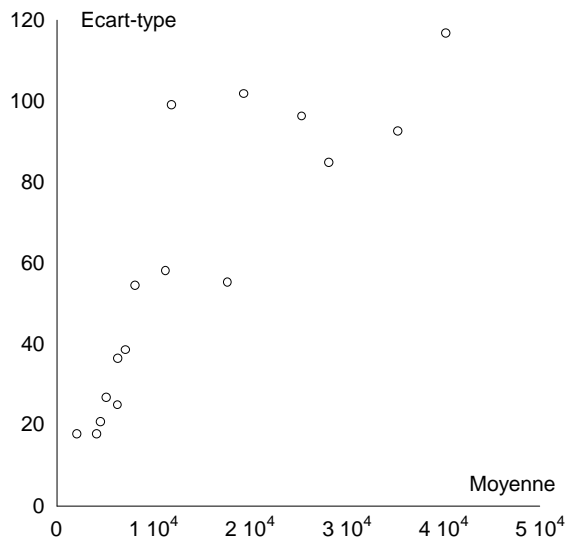
$$l \approx 800$$

$$s \approx 1430$$

Note : la valeur de  $l$  est 800 et non pas  $800 \times 10^3$  car la pluviométrie est exprimée en mm et non en m. Nous discutons ci-dessous la validité de ces premières étapes.

### 3.1 Méthode de régression utilisée

Une régression linéaire simple, comme celle qui a été utilisée, n'est valide que si la variance des données est indépendante de leur moyenne, ce qui n'est pas le cas ici comme le montre le diagramme ci-dessous.



Les mesures de contamination des sols montrent une hétéroscédasticité importante, avec un écart type croissant avec la moyenne.

On peut prendre en compte cette variation de deux manières :

- soit en minimisant l'écart quadratique moyen entre le logarithme des mesures et celui du modèle :

$$\text{Min}_{p,q} \sum_j \left( \ln(M(j)) - \ln(p \times P^{1-5}(j) + q) \right)^2$$

- soit en calculant la variance observée  $V(j)$  des différentes mesures effectuées en un même point et en minimisant la somme des carrés des écarts mesure-modèle pondérés par une estimation de

$$\text{cette variance : } \text{Min}_{p,q} \sum_j \frac{\left( M(j) - (p \times P^{1-5}(j) + q) \right)^2}{V(j)}$$

Avec un modèle logarithmique, on obtient :

- pente = 451 [IC 95 % : 394 à 507]
- ordonnée à l'origine 2842 [IC 95 % : 2161 à 3523].

La manière dont la relation pluie-dépôts a été identifiée par les auteurs surestime donc la pente d'environ 24% et sous-estime l'ordonnée à l'origine d'environ 40%.

### 3.2 Validité des mesures

La dispersion des valeurs des dépôts pour certains points de mesure, principalement pour les fortes valeurs de la pluviométrie comme le montre l'hétéroscédasticité, est étonnante.

À Vaison-la-Romaine par exemple, où la pluie totale du 1<sup>er</sup> au 5 mai a atteint 50 mm, les dépôts mesurés en 1999-2000 vont de 9 820 à 40 454 Bq.m<sup>-2</sup>, soit un rapport de 1 à 4. À Vinsobres, la pluviométrie était de 55 mm et les dépôts de 27 292 à 60 707 Bq.m<sup>-2</sup>.

Dans [Renaud.03], les auteurs expliquent que les dépôts ont été mesurés dans un rayon de 5 km pour les pluies inférieures à 25 mm et 1 km au delà. Pour ces valeurs de la pluviométrie supérieures à 25 mm « *soils sampled within only a 1 km radius gave variation coefficients of 41-136%. In order to analyse the origin of this variability, additional soil samples were collected from nearly flat land within a 500 m radius of the meteorological station [...] activities ranged from 17 200 to 20 500 Bq.m<sup>-2</sup> and the variation coefficient was 17% ».*

Cette augmentation rapide de la variabilité des mesures en fonction de la distance peut s'expliquer, comme le suggèrent les auteurs, par des phénomènes de migration du césium dans le sol (qui posent le problème de la fiabilité de mesures faites 13 ans après l'accident) et/ou par de fortes hétérogénéités locales de la pluviométrie.

Les incertitudes sur la pluviométrie (donc sur l'abscisse des points utilisés dans la régression linéaire) pourraient également affecter les points où les précipitations ont été inférieures à 25 mm, pour lesquels la mesure des dépôts a été faite jusqu'à 5 km de la station de mesure de la hauteur de pluie, mais les cartes des pluies le 3 et le 4 mai que m'ont fournies Météo-France ne montrent pas de gradient spatial de précipitations importants et ces incertitudes sont probablement négligeables.

### 3.3 Estimation de la contamination de l'air

Toutes les estimations des dépôts étant proportionnelles à la concentration du <sup>137</sup>Cs dans l'air, cette estimation est particulièrement importante. Dans [Renaud.03] les auteurs ont considéré qu'elle était d'environ 0,7 Bq.m<sup>-3</sup> en tout point du territoire français à l'est du méridien 4°, tous les jours de 1<sup>er</sup> au 5 mai 1986. L'origine de cette valeur n'est pas précisée.

Cette valeur est en contradiction avec les données recueillies en 1986 ainsi qu'avec celles de filtres aérosols présents sur 31 stations réparties sur le territoire français, archivés à l'OPRI depuis 1986, et mesurés en février 2002. Il semble que ces données n'aient été connues des concepteurs du modèle qu'en juin 2003, après la publication du modèle, sans d'ailleurs conduire à une correction de celui-ci.



Trois stations étaient très proches (Phénix, Tricastin) ou au sein (Montfaucon) de la zone atelier. Les valeurs de la contamination de l'air relevées sur ces filtres sont les suivantes, en  $\text{Bq.m}^{-3}$  :

Ville	Montfaucon	Phénix	Tricastin
Latitude	44,08	44,15	44,31
Longitude	4,75	4,71	4,74
30/04 - 01/05	0,0234	0,0460	0,0500
01/05 - 02/05	0,2094	0,2336	0,1966
02/05 - 03/05	0,2145	0,3809	0,6439
03/05 - 04/05	0,4884	0,4086	0,5042
04/05 - 05/05	0,1746	0,1732	0,1766
05/05 - 06/05	0,1418	0,1524	0,1360

On constate, même pour des points aussi proches, des variations assez notables. La contamination de l'air les 3 et 4 mai est significativement plus faible que  $0,7 \text{ Bq.m}^{-3}$ .

Dans [Renaud.04.A] les auteurs, qui entre-temps ont eu connaissance des données des filtres aérosols, écrivent : « *Grossièrement, dans l'est du pays, on peut estimer entre 0,3 et 0,9  $\text{Bq.m}^{-3}$  l'activité moyenne des masses d'air au niveau du sol lors des épisodes pluvieux du 2 au 4 mai 1986* ».

Des valeurs interpolées par krigeage ainsi que par interpolation barycentrique (selon l'inverse du carré de la distance) ont été calculées par l'IRSN pour toutes les stations de la zone atelier ; elles sont données dans [Renaud 05].

Il est important de noter :

- qu'une surestimation de la contamination de l'air conduit à une sous-estimation du coefficient de lessivage réellement utilisé, quotient de la pente de la droite de régression dans la zone atelier par cette concentration moyenne ;
- que toutes les valeurs calculées par le modèle sont proportionnelles à cette contamination au point considéré. Se contenter d'une « estimation grossière » de 0,3 à 0,9  $\text{Bq.m}^{-3}$  tout en continuant à utiliser 0,7 conduit à accepter un facteur d'incertitude de 0,8 à 2,3 difficilement compatible avec une correction des cartes antérieures par un facteur d'environ 2 à 4.

Le facteur d'incertitude réel est d'ailleurs supérieur car d'une part les pluies n'ont pas été négligeables partout dans l'est en dehors des 2, 3 et 4 mai et d'autre part (cf Annexe 3), la contamination de l'air dans l'est de la France entre le 1<sup>er</sup> et le 5 mai était très souvent inférieure à  $0,3 \text{ Bq.m}^{-3}$ .

### 3.4 Estimation des retombées des essais nucléaires

Les retombées des essais nucléaires  $E$  sont estimées indirectement à partir de l'ordonnée à l'origine de la droite de régression  $q = S + E = 1986 \text{ Bq.m}^{-2}$  et de l'estimation moyenne des dépôts secs  $S \approx 1000 \text{ Bq.m}^{-2}$  [UNSCEAR 88]. Les auteurs déduisent que les retombées des essais nucléaires sont environ  $E \approx 986 \text{ Bq.m}^{-2}$ . Ils comparent cette valeur aux retombées moyennes en France qui vont de 1500 à 2000  $\text{Bq.m}^{-2}$ .

Cette estimation des retombées est nettement plus faible que celle que les auteurs ont eux-mêmes établie à partir de la relation de Mitchell [Renaud.04.C, Renaud 05], relation fondée sur un modèle pluie dépôt utilisant la pluviométrie annuelle moyenne. Pour les stations de la zone atelier (voir Annexe 1), cette relation conduit à des dépôts de  $2600 \pm 200 \text{ Bq.m}^{-2}$ . La valeur retenue par les auteurs ( $986 \text{ Bq.m}^{-2}$ ) sous-estime ces retombées d'un facteur qui va de 2 à 3.

La relation de Mitchell reste cependant une approximation et l'influence des retombées des essais nucléaires sur l'estimation des paramètres du modèle (en particulier le coefficient de lessivage) n'a pas été analysée. Dans [Renaud 05], les données de la relation de Mitchell sont confrontées à des valeurs estimées par la CRII-RAD en Alsace et dans les Vosges à partir de mesures de  $^{134}\text{Cs}$ . Cette confrontation montre un écart le plus souvent très important entre modèle et calculs effectués à partir de vraies mesures :

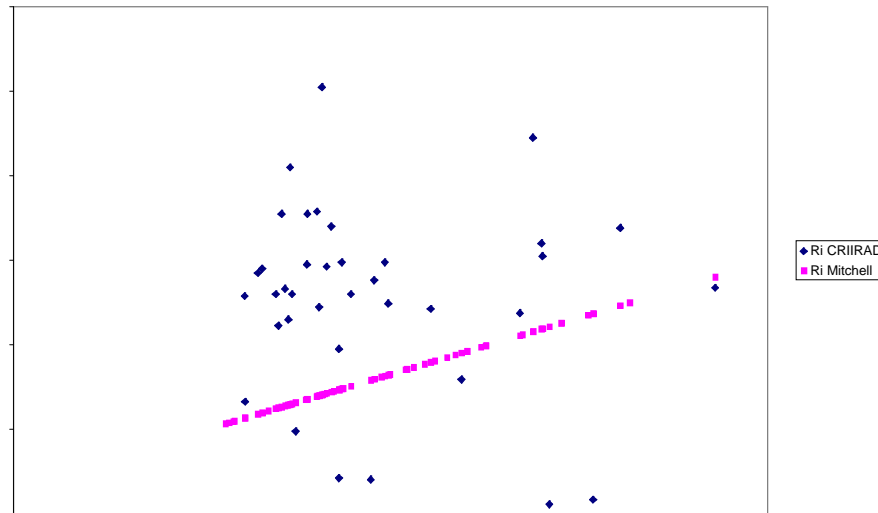


Figure 13 de [Renaud 05] - Confrontation de  $R_i$  estimés par la relation empirique de Mitchell (1990) avec  $R_i$  estimés par la CRII-RAD à partir de mesures de  $^{134}\text{Cs}$  (communes d'Alsace et des Vosges)

Les auteurs concluent que le modèle de Mitchell a raison contre les mesures, celles-ci ayant été faites 7 à 9 ans après l'accident, et la mesure du  $^{134}\text{Cs}$  (période 2 ans) ayant une incertitude d'au moins 30%. Cette conclusion est étonnante, le rapport mesure/modèle pouvant dépasser 3,6 (différence de 270 %).

Comme le signale [Renaud.05], les dépôts des essais nucléaires sur les zones très pluvieuses de France dépassent  $5000 \text{ Bq.m}^{-2}$ , soit cinq fois la valeur retenue par le modèle IRSN-2003.

### 3.5 Estimation du coefficient de lessivage

Le coefficient de lessivage  $l$  a été estimé dans [Renaud.03] à partir de la pente de la régression  $L = l \times C^{3-4}(ZA)$  et de la concentration moyenne du  $^{137}\text{Cs}$  dans l'air les 3 et 4 mai 1986 :  $C^{3-4}(ZA) \approx [0,65 - 0,75] \text{ Bq.m}^{-3}$ . La valeur obtenue est  $l \approx [750 \times 10^3 - 860 \times 10^3]$

Limiter le calcul aux 3 et 4 mai est une approximation raisonnable (mais qui aurait pu être facilement évitée), la pluviométrie des 1, 2 et 5 mai ayant été effectivement très faible dans la zone atelier où elle ne représente qu'environ 9% de la pluie totale pendant les 5 jours de passage du nuage (mais atteint, nous l'avons vu, 17% à Nyons ou 29% à Mollans-sur-Ouvèze).

Cependant, pour les stations de mesure de la zone atelier, la contamination moyenne de l'air, calculée jour après jour par l'IRSN à partir de filtres [IRSN.05] est notablement différente le 3 mai ( $0,6 \text{ Bq.m}^{-3}$ ) et le 4 mai ( $0,27 \text{ Bq.m}^{-3}$ ), et sa moyenne n'est pas de  $0,7 \text{ Bq.m}^{-3}$  comme l'écrivent les auteurs mais d'environ  $0,44 \text{ Bq.m}^{-3}$ .

Le calcul du coefficient de lessivage est donc erroné et aurait dû être conduit de deux manières :

Soit, de façon approximative, en utilisant la même méthode que les auteurs, mais en prenant une valeur de  $C^{1-4}(ZA)$  non pas d'environ 0,7 mais plus conforme à la réalité, d'environ  $0,45 \text{ Bq.m}^{-3}$ . On trouve alors  $l \approx 1270 \times 10^3$ . Cette valeur est conforme à la contamination de l'air, mais est beaucoup plus élevée que les valeurs trouvées par la plupart des auteurs :

- dans l'est de la France par l'IPSN et le SCPRI :  $520 \times 10^3$  à  $720 \times 10^3$  dans le sud-est de la France ;  $640 \times 10^3$  à  $710 \times 10^3$  dans le nord-est ;
- à Paris par Thomas [Thomas 86] :  $750 \times 10^3$  ;
- au Royaume-Uni, dans Nature, par Clark [Clark.88] qui indique : *These data yield a value of  $590 \times 10^3$  for  $w_r$ , in the case of  $^{137}\text{Cs}$ , and similar analyses at other locations where measurements were available [3 références] give an average close to  $650 \times 10^3$ .*

Cette méthode reste très approximative car elle ne tient pas compte du fait que la concentration de l'air

a varié du simple au double entre le 3 et le 4 mai. Elle néglige aussi les pluies tombées en dehors des 3 et 4 mai, qui ne représentent en moyenne que 9 % du total (1 au 5 mai) mais atteint 17% à Nyons (5 mesures) ou 29% à Mollans-sur-Ouvèze (4 mesures).

- Soit, de manière plus précise, en détaillant les retombées jour après jour. En limitant leurs calculs aux 3 et 4 mai, les auteurs identifient leur modèle d'une manière différente de l'utilisation qu'ils en font, et admettent implicitement qu'un calcul jour après jour est préférable à un calcul sur plusieurs jours. Mais leur méthode multiplie la pluie du 3 mai par la concentration moyenne du nuage le même jour et le lendemain, et la pluie du 4 par celle du nuage le même jour et la veille.

Comme le font Clark et Smith [Nature 332 p 247, 1988] quand ils disposent des données nécessaires, et comme l'ont confirmé des spécialistes des contaminations environnementales de Météo-France, l'estimation du coefficient de lessivage devrait prendre en compte les valeurs de la contamination de l'air  $C(j,i)$  et de la pluviométrie  $P(j,i)$  le même jour  $i$  au point  $j$ , en écrivant les retombées de Tchernobyl dans la zone atelier sous la forme :

$$D_{Total} = \left( l \times \sum_{i=1-5} C(j,i) \times P(j,i) \right) + \left( s \times \sum_{i=1-5} C(j,i) \right)$$

Et donc pour les dépôts mesurés  $M(j)$ , en ajoutant les retombées des essais nucléaires  $E(j)$  :

$$M(j) = \left( l \times \sum_{i=1-5} C(j,i) \times P(j,i) \right) + \left( s \times \sum_{i=1-5} C(j,i) \right) + E(j)$$

Cette manière d'écrire les dépôts rend plus difficile l'estimation des paramètres  $l$  et  $s$  qui ne sont plus obtenus par une simple régression linéaire. Nous verrons plus loin à quelle valeur du coefficient de lessivage ce calcul conduit.

### 3.7 Conclusion sur les données de la zone atelier

En conclusion, l'identification de la relation pluie-dépôt dans la zone atelier présente de graves erreurs méthodologiques et quant aux valeurs retenues :

- L'identification des paramètres ne tient pas compte de la variance très différente des différentes mesures et utilise une méthode de régression linéaire inadaptée.
- L'estimation des retombées des essais nucléaires est considérée comme uniforme et de  $986 \text{ Bq.m}^{-2}$  alors que les auteurs du modèle ont par ailleurs calculé des valeurs de  $2600 \pm 200 \text{ Bq.m}^{-2}$ .
- La valeur moyenne de la concentration du  $^{137}\text{Cs}$  dans l'air retenue pour le calcul du coefficient de lessivage est erronée, ce qui conduit les auteurs à ne pas s'apercevoir que le coefficient de lessivage qu'ils ont en réalité utilisé a une valeur de 70 % plus élevée (au moins) que celles données par les autres auteurs. En utilisant la relation :

$$D_{Total}(j) = 560 \times P^{1-5}(j) + 1000 \text{ Bq.m}^{-2}$$

avec une contamination moyenne de l'air de  $C^{1-4}(ZA) \approx 0,7 \text{ Bq.m}^{-3}$ , cette relation est équivalente à :

$$D_{Total}(j) \approx (800 \times P^{1-5}(j) + 1430) \times 0,7 \text{ Bq.m}^{-2}$$

ce qui conduit à un coefficient de lessivage #  $800 \times 10^3$ , plus élevé mais assez proche des valeurs données par les autres auteurs.

Mais en réalité, pour tenir compte, même de manière approximative, de la contamination moyenne de l'air les 3 et 4 mai, qui était de  $0,44 \text{ Bq.m}^{-3}$ , on devrait l'écrire :

$$D_{Total}(j) \approx (1270 \times P^{1-5}(j) + 2270) \times 0,44 \text{ Bq.m}^{-2}$$

ce qui signifie que le coefficient de lessivage réellement utilisé par le modèle est  $1270 \times 10^3$ , valeur beaucoup plus élevée que ce qui est admis de manière concordante par d'autres auteurs. Par rapport à l'estimation de Clark (Nature 88) qui était fondée sur des mesures contemporaines de l'accident au Royaume Uni, l'écart est de + 115%.

En nous limitant aux données fournies par les auteurs et en reprenant la formulation initiale du modèle, on peut recalculer plus rigoureusement la relation pluie-dépôt dans la zone atelier, par une méthode de maximum de vraisemblance, en minimisant l'écart quadratique moyen entre :

- le logarithme des mesures  $\ln(M(j))$ ,
- le logarithme du modèle  $\ln\left(E(j) + \sum_{i=1-5} (l \times P(j,i) \times C(j,i) + s \times C(j,i))\right)$

on obtient :  $l = 929$  et  $s = 757$ .

Cette formulation rétablit des valeurs plus réalistes des dépôts liés aux essais nucléaires et affecte à toutes les pluies la meilleure estimation disponible de la concentration radioactive de l'air du jour correspondant. La valeur du coefficient de lessivage ( $929 \times 10^3$ ) est plus proche de celles communément admises que celle utilisée en réalité par les auteurs ( $1270 \times 10^3$ ).

Même avec cette correction, le coefficient de lessivage garde une valeur sensiblement supérieure à ce qui a été trouvé de manière concordante par les divers auteurs que nous avons cités :  $520 \times 10^3$  à  $720 \times 10^3$ ,  $640 \times 10^3$  à  $710 \times 10^3$ ,  $750 \times 10^3$ ,  $590 \times 10^3$ ,  $650 \times 10^3$ . Par rapport à l'estimation de Clark, l'écart est encore de + 57%.

Cet écart peut avoir plusieurs origines :

- variations locales du coefficient de lessivage,
- variations locales de la contamination de l'air,
- variations locales de la pluviométrie,
- biais de sélection des points de prélèvement,
- modification secondaire des dépôts du fait de migrations du césium,
- mauvaise estimation des retombées des essais nucléaires.

Les deux dernières causes sont probablement prépondérantes.

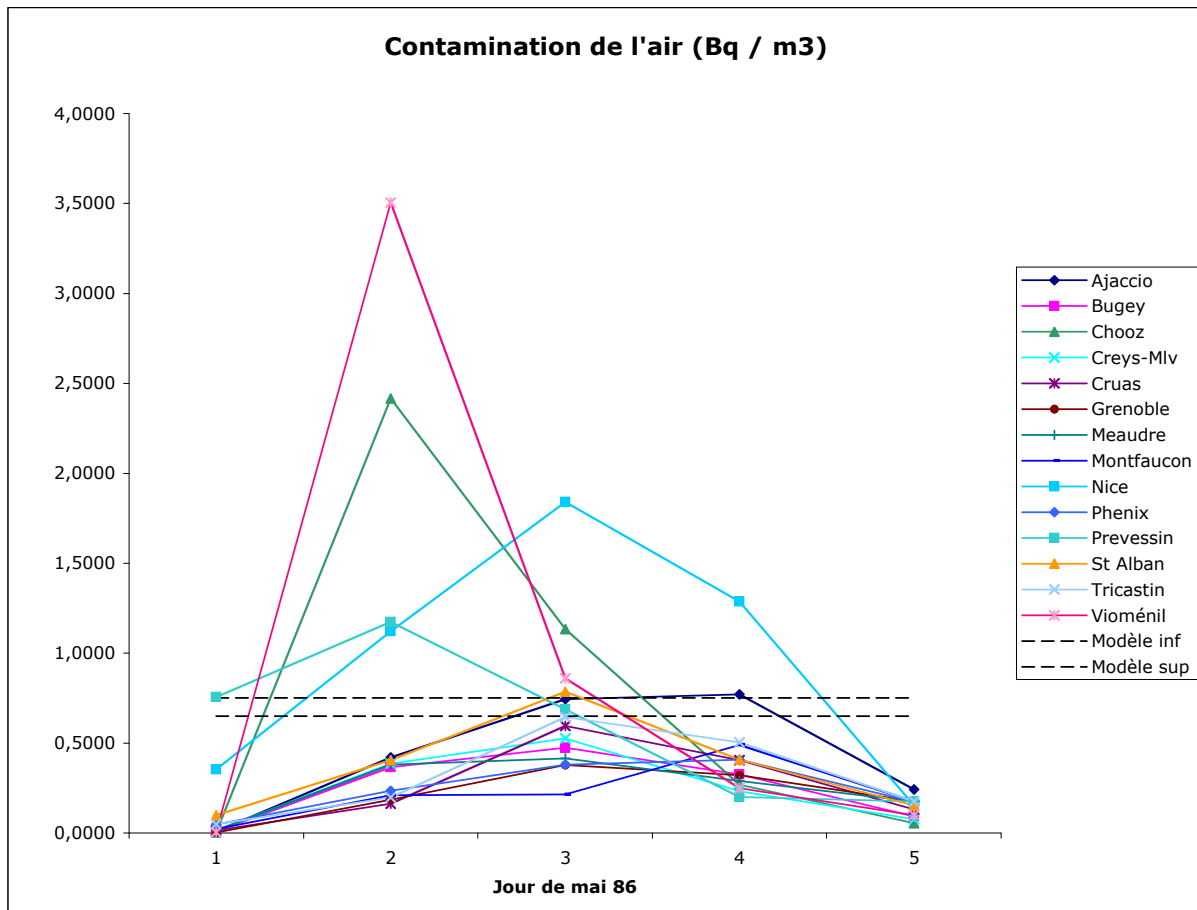
## 4 Modélisation de la contamination de l'air à l'est du méridien 4°

Les auteurs ont simplement considéré que la concentration radioactive de l'air, à l'est du méridien 4° était constante du 1<sup>er</sup> au 5 mai et uniforme sur tout le territoire français correspondant, qui est le plus « critique » en ce qui concerne la contamination secondaire à Tchernobyl. La valeur commune retenue est celle de la contamination de l'air supposée dans la zone atelier  $C^{1-4}(ZA) \approx [0,65 - 0,75] \text{ Bq.m}^{-3}$  que pour simplifier nous prendrons dans la suite égale à  $0,7 \text{ Bq.m}^{-3}$ .

En suivant ce que les auteurs donnent pour contamination de l'air dans cette zone, nous avons donc mis le modèle utilisé dans cette zone sous la forme :

$$D_{Total}(j) = 560 \times P^{1-5}(j) + 1000 \approx (800 \times P^{1-5}(j) + 1430) \times 0,7 \text{ Bq.m}^{-2}$$

Multiplier les pluies des 1, 2 et 5 mai par la contamination de l'air les 3 et 4 ne conduit pas, dans la zone atelier elle-même, à une erreur importante par rapport à celle faite sur la valeur de la contamination de l'air (dont la moyenne est en réalité  $0,44 \text{ Bq.m}^{-2}$ ), puisque les pluies des 1,2 et 3 mai y étaient effectivement faibles, à quelques exceptions près. Il n'en va pas de même en revanche sur le reste du territoire où les pluies des 1, 2 et 5 ne sont pas toujours négligeables, avec une contamination de l'air souvent beaucoup plus faible que les 3 et 4 mai.



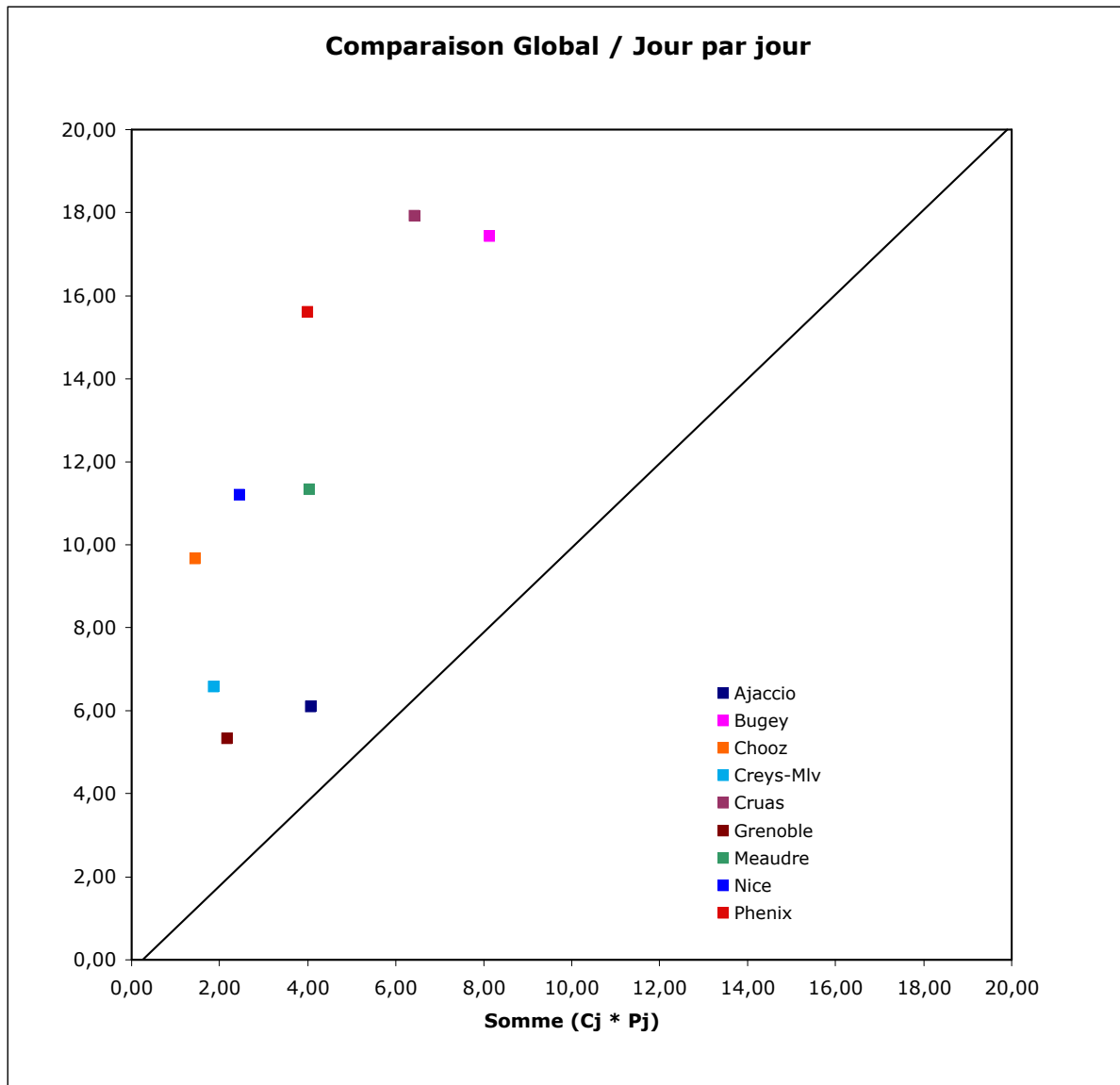
Le graphique ci-dessus reproduit les valeurs de la contamination de l'air mesurées du 1<sup>er</sup> au 5 mai sur les filtres à air dépouillés par l'IPSN, en 13 points du territoire à l'est du méridien 4°. Les lignes noires en traits discontinus représentent les valeurs minimale (0,65) et maximale (0,75) de cette contamination retenues par le modèle. Les valeurs sont données en Annexe 3.

On constate que la valeur utilisée par le modèle comme contamination de l'air sous-estime cette contamination à Vioménil en Lorraine, Chooz dans les Ardennes, Prévessin près de Genève et Nice ; elle la surestime aux 9 autres points de mesure. On constate surtout que l'estimation constante et uniforme retenue par le modèle est très imprécise.

Cette imprécision se répercute sur la valeur des retombées calculées avec le modèle, la pluie de chaque

jour et chaque lieu étant multipliée par une contamination de l'air de  $0,7 \text{ Bq.m}^{-3}$ .

Le graphique suivant montre pour 9 des stations ci-dessus pour lesquelles la pluviométrie est disponible, la comparaison entre cette estimation « globale » ( $P^{1-5}(j) \times 0,7$  portée en ordonnées) et une estimation utilisant les données mesurées de contamination de l'air et de pluviométrie, jour après jour ( $\sum_{i=1-5} P(j,i) \times C(j,i)$  portée en abscisses). La diagonale d'égalité des deux valeurs est tracée pour la clarté du schéma.



Les valeurs sont données en Annexe 4. On constate, dans tous les cas, une surestimation du fait de la technique de calcul globale utilisée par le modèle, dans un rapport qui va de 1,5 à 6,6.

Dans le cas de Nice par exemple, la contamination de l'air était effectivement supérieure à  $0,7 \text{ Bq.m}^{-3}$  les 2, 3 et 4 mai, mais il n'a plu que du 4 au 6 mai, à une période où la contamination de l'air était seulement de 0,15 et 0,19  $\text{Bq.m}^{-3}$ .

En conclusion de ce paragraphe, une modélisation de la contamination de l'air à l'est de  $4^\circ$ , par une valeur supposée uniforme et constante du 1<sup>er</sup> au 5 mai est à l'évidence trop fruste pour rendre compte de ce que l'on sait du passage du nuage de Tchernobyl, en deux vagues est  $\Rightarrow$  ouest puis sud-est  $\Rightarrow$  nord-ouest. Les valeurs mesurées sur les filtres à air confirment qu'il s'agit là d'une imprécision majeure.

Le calcul utilisant la pluie globale du 1<sup>er</sup> au 5, sans tenir compte des variations réelles de la contamination de l'air conduit à des facteurs d'incertitude supérieurs à la « correction » que les auteurs prétendent apporter aux cartes antérieures.

## 5 Modélisation de la contamination de l'air à l'ouest du méridien 4°

À l'ouest du méridien 4°, la contamination de l'air a également été supposée constante en chaque point du 1<sup>er</sup> au 5 mai. Elle est supposée uniforme pour une même longitude et donnée, pour la longitude  $j$ , par une formule de décroissance exponentielle :

$$C(j) = C^{3-4}(ZA) \times e^{0,44(\ln(j)-4,5)} = 0,7 \times e^{0,44(\ln(j)-4,5)}$$

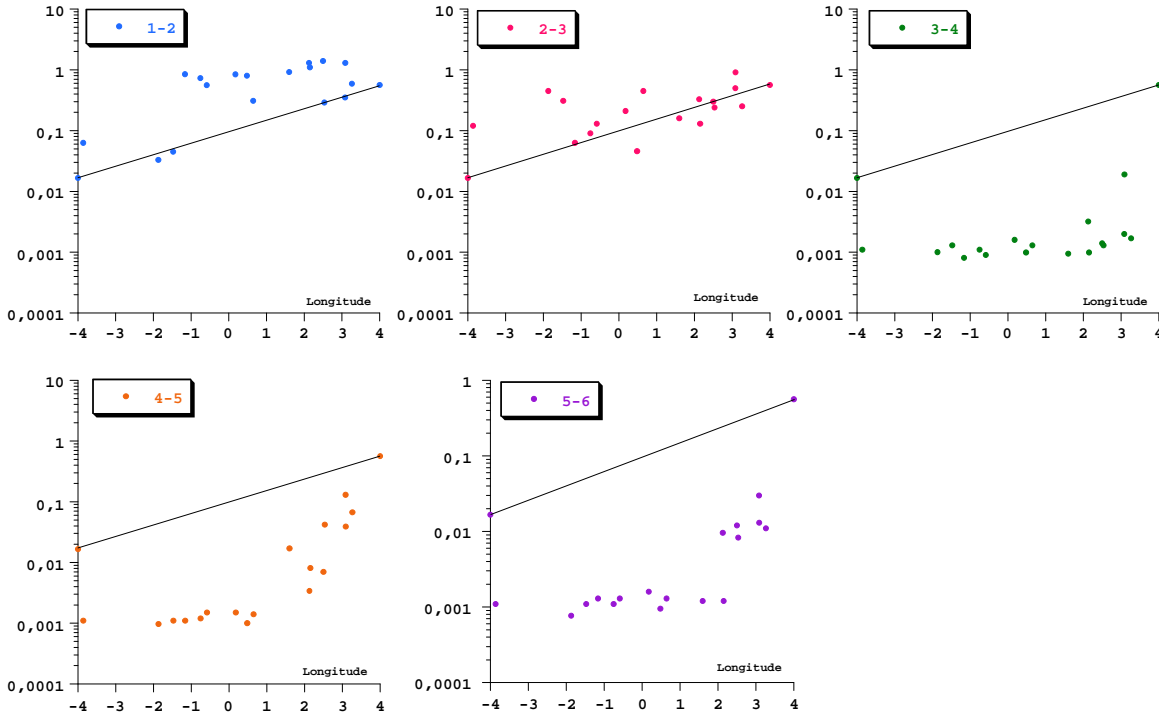
où  $C^{3-4}(ZA)$ , rappelons-le, est la contamination retenue par les auteurs les 3 et 4 mai dans la zone atelier, avec  $C^{3-4}(ZA) \approx [0,65 - 0,75]$  Bq.m<sup>-3</sup>, et pour laquelle nous avons pris la valeur moyenne 0,7 Bq.m<sup>-3</sup>.

Cette formulation introduit une discontinuité dans la contamination de l'air qui chute de 20% au passage vers l'ouest du méridien 4°.

Le coefficient 0,44 de l'exponentielle a été obtenu à partir de données de contamination en <sup>137</sup>Cs et en <sup>131</sup>I, aérienne (10 mesures du 1<sup>er</sup> au 3 mai 86) et de l'eau de pluie (20 mesures du 1<sup>er</sup> au 7 mai) et fait la moyenne des quatre constantes radioactives obtenues [Renaud.04.B]. Cette manière de procéder est étonnante pour plusieurs raisons :

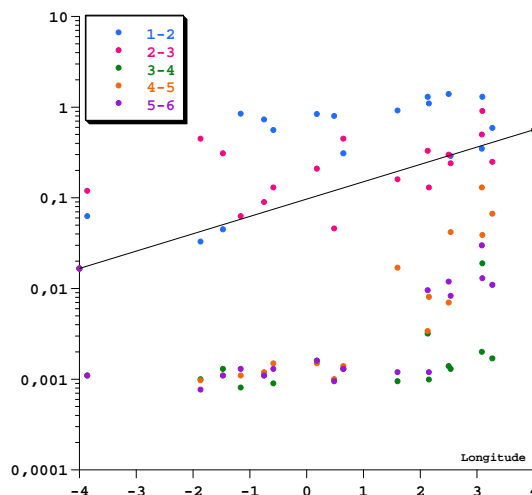
- les données des mesures des filtres aérosols présents sur 31 stations réparties sur le territoire français étaient disponibles dès février 2002 ; ils permettaient une estimation beaucoup plus précise de la contamination, jour après jour ;
- le comportement de l'iode (essentiellement volatile) est différent de celui du césium (essentiellement sous forme d'aérosols) et la décroissance de l'iode avec la distance est connue [Muck 2002] pour être plus rapide que celle du césium (ce que les données utilisées par les auteurs confirment) ; faire la moyenne des deux n'est donc pas justifié ;
- les mesures sur la pluie ont un statut très variable dans les publications des auteurs : considérées comme faisant partie des « *principales données exploitables pour établir les conséquences radioécologiques et dosimétriques en France* » dans [Renaud 1997], utilisées ici pour établir la contamination de l'air à l'ouest du méridien 4°, mais écartées pour « *incohérence* » entre elles et/ou avec la concentration mesurée dans l'air au même lieu quand il s'agit de répondre à la critique qui les invoque pour montrer l'imprécision du modèle [Renaud.04.D].

La comparaison entre les valeurs de contamination de l'air mesurée jour après jour sur les filtres à air dépouillés par l'IPSN, en 31 points du territoire (18 de longitude  $< 4^\circ$  et 13 de longitude  $\geq 4^\circ$ ) et la valeur (identique en chaque point pour chaque jour) est donnée dans les graphiques ci-dessous en coordonnées semi-logarithmiques. Le modèle IRSN 2003 correspond à la ligne ; les données aux points colorés (les points situés aux extrémités de la ligne ne correspondent pas à une donnée, ils ont été tracés pour réaliser le graphique) ; et les jours aux valeurs encadrées.



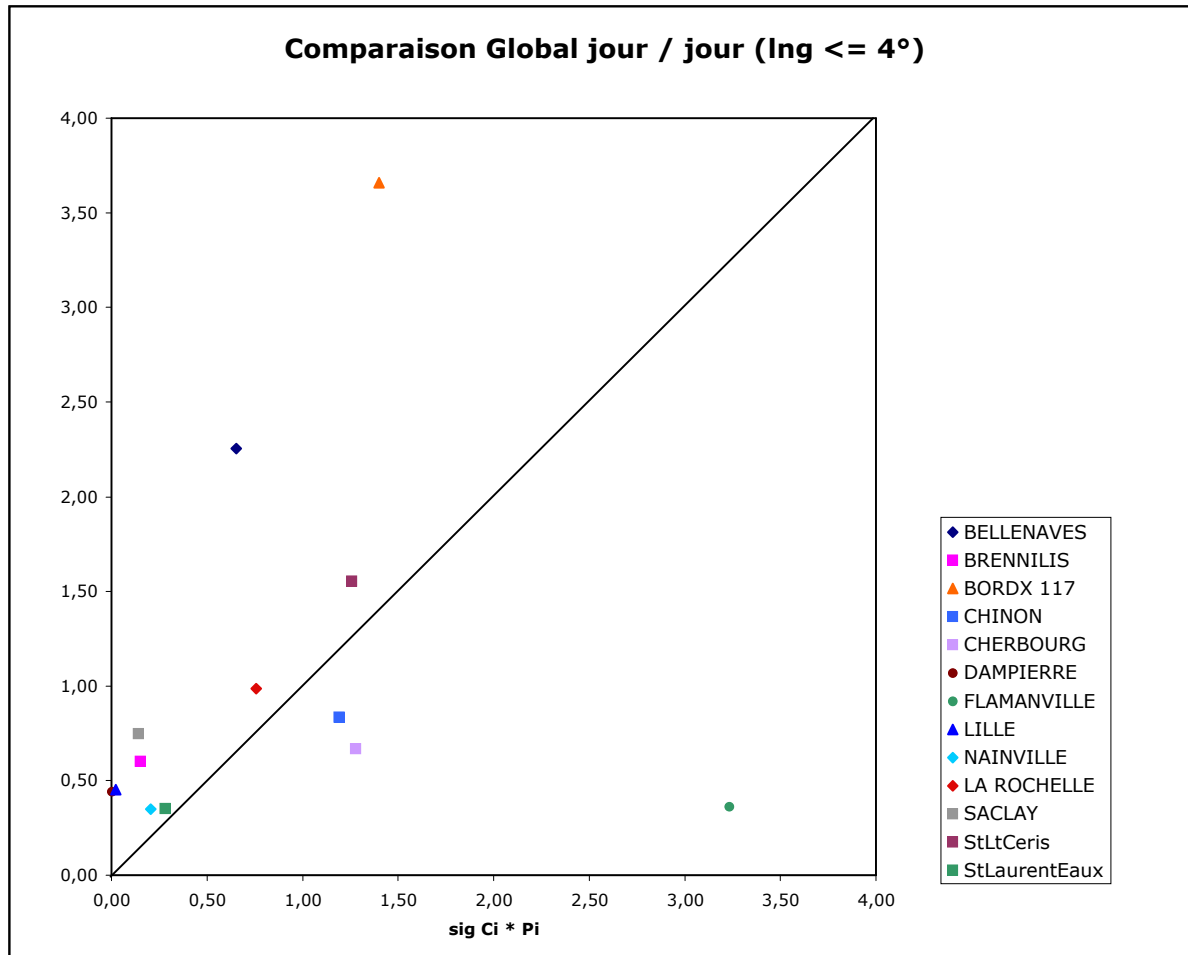
On constate que le modèle donne une assez bonne approximation les 2-3 mai ; sous-estime un peu les données réelles les 1-2 mai et surestime fortement les données les trois autres jours.

Quand on reporte l'ensemble des données sur le même graphe, on constate que le modèle exponentiel est une approximation grossière de la réalité, et que celle-ci n'obéit à aucune loi simple.





Le graphique suivant montre pour 13 des stations ci-dessus dont la pluviométrie est disponible, la comparaison entre l'estimation « globale » ( $P^{1-5}(j) \times 0,7$  portée en ordonnées) et une estimation utilisant les données mesurées de contamination de l'air et de pluviométrie, jour après jour ( $\sum_{i=1-5} P(j,i) \times C(j,i)$  portée en abscisses). Comme pour les lieux à l'est du méridien  $4^\circ$ , on constate une importante dispersion des résultats (dans un sens ou l'autre) pour certains points de forte pluviosité.



## 6 Validation du modèle

Il n'a pas été fait de validation du modèle au sens où on l'entend habituellement (sélection de données, identification du modèle sur une partie d'entre elles et test sur les autres ; ou encore part de variance des données expliquée par le modèle...).

### 6.1 Pour les retombées à l'est du méridien $4^\circ$

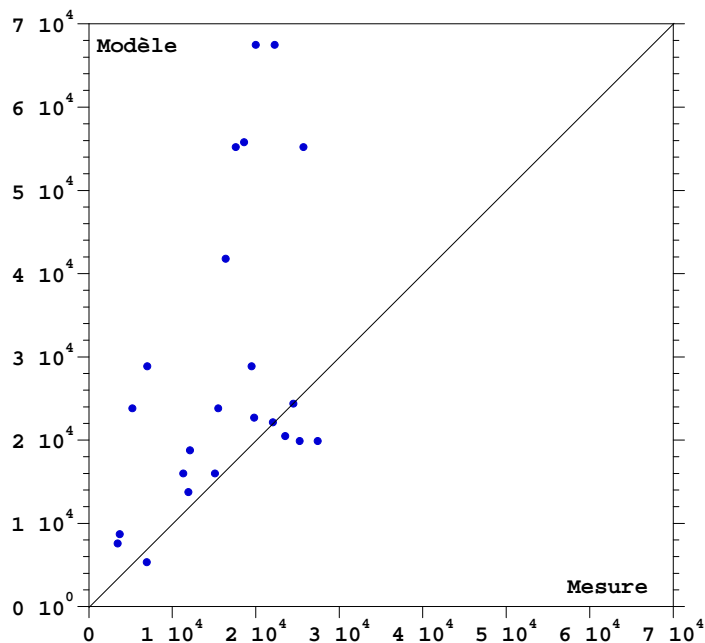
La justification du modèle dans [Renaud.03] est triple :

- 1) La valeur du coefficient de lessivage trouvée par les auteurs [ $750 \times 10^3 - 860 \times 10^3$ ] est comparée à celles trouvées à partir de mesures dans l'eau de pluie (valeur non précisée), et à celles estimées :
  - Dans l'est de la France par l'IPSN et le SCPRI :  $520 \times 10^3$  à  $720 \times 10^3$  dans le sud-est ;  $640 \times 10^3$  à  $710 \times 10^3$  dans le nord-est ;
  - À Paris par Thomas [Thomas 86] :  $750 \times 10^3$  ;
  - Au Royaume Uni par Clark [Clark.88] qui indique : *These data yield a value of  $590 \times 10^3$  for  $w_r$  in the case of  $^{137}\text{Cs}$ , and similar analyses at other locations where measurements*

were available [3 références] give an average close to  $650 \times 10^3$ .

Nous avons vu (§ 3.5) qu'en réalité les données de la zone atelier conduisent à une estimation du coefficient de lessivage :

- de  $1270 \times 10^3$  en suivant la méthode des auteurs mais avec une estimation plus précise de la contamination de l'air ;
  - de  $929 \times 10^3$  avec un calcul (§ 3.7) prenant mieux en compte les variations de la contamination de l'air, la pluviométrie des 1, 2 et 5 mai ainsi que les retombées des essais nucléaires (qui restent cependant très approximatives comme nous le montrons au § 3.4).
- 2) Les valeurs données par le modèle sont comparées (p. 263) à celles mesurées dans les vallées du Var, de la Moselle et de Tavignano (Corse) en 1986, en Corse en 2001 ainsi qu'à La Roche-de-Glun et Sisteron. Les valeurs sont données en Annexe 5. Cette comparaison est illustrée par le graphique ci-dessous (moyenne des mesures en abscisse ; modèle en ordonnée). Il apparaît clairement que le modèle surestime la plupart des valeurs, dans un rapport qui va jusqu'à 3,3 en Corse.



Les auteurs concluent eux mêmes « ... *the regression model may be inaccurate for rainfall amounts exceeding 40 mm* », ce qui ne les a pas empêchés d'utiliser les valeurs calculées en Corse dans la plaine d'Aléria pour des calculs dosimétriques très alarmants pour les populations et présentés lors de la réunion publique tenue à Ajaccio en janvier 2002.

- 3) Les valeurs sont comparées à celles de l'atlas publié par la Commission Européenne en 1998 avec la conclusion « *The current model indicates greater estimated depositions, namely in the eastern part of France. However, in terms of activity levels and sizes of homogeneous activity surfaces, the resulting map is comparable to those obtained for countries neighbouring France* ».

Cette conclusion est étonnante quand on compare les valeurs obtenues par le modèle en France et chez nos voisins :

- Au niveau de la Belgique, au sud de Charleroi, les dépôts vont de  $2\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$  à  $4\,000$  côté belge et de  $4\,000$  à  $20\,000$  côté français (modèle IRSN). Les auteurs attribuent ces différences à la « *faible représentativité des mesures effectuées en Belgique* » et « *au lissage résultant de l'interpolation spatiale côté français*. ». Cette remarque est en contradiction avec les données belges (presque 6 fois plus denses qu'en France) qui font état d'une contamination de  $900$  à  $3\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$ .

- Avec l'Allemagne, sur le Rhin, les dépôts sont estimés à 1 000-4 000 Bq.m<sup>-2</sup> côté allemand, et à 4 000-10 000 côté français.
- Avec la Suisse, les auteurs considèrent que les estimations sont concordantes tout au long de la frontière, ce qui est exact au nord du Lac Léman, mais inexact du Léman à la frontière italienne où le modèle donne des valeurs nettement plus faibles qu'en Suisse.
- Avec l'Italie, de la Suisse au tunnel du Fréjus les estimations italiennes sont supérieures aux françaises (4 000 – 10 000 Bq.m<sup>-2</sup> contre < 4 000) au sud du tunnel, la situation s'inverse (< 4 000 Bq.m<sup>-2</sup> contre 4 000-10 000).

## 6.2 Pour les retombées à l'ouest du méridien 4°

La justification du modèle dans [Renaud.04.B] reprend l'argumentaire précédent pour le coefficient de lessivage et considère que « *les discontinuités transfrontalières sont dues à un montage cartographique* ». Les auteurs ne font aucune comparaison avec des données contemporaines de l'accident, en particulier avec celles sur l'eau de pluie dont eux-mêmes considéraient en 1997 qu'elles étaient les plus fiables<sup>9</sup> ou celles des prélèvements sol+végétation, jugés suffisamment fiables en 1997 pour valider les résultats du modèle Astral<sup>10</sup>.

---

## 7 Utilisation du modèle pour des estimations dosimétriques

---

L'importance de ce paragraphe tient à deux raisons :

- les estimations dosimétriques sont au cœur de la polémique et de l'action judiciaire sur les éventuelles conséquences thyroïdiennes des retombées d'iode 131 en France, lors de l'accident de Tchernobyl. Dans ce débat, la position de l'IRSN, institut officiel d'expertise de la France, est essentielle ;
- il y a une discordance entre :
  - la position officielle de l'Institut qui considère que le modèle IRSN-2003 ne peut pas être utilisé pour des estimations dosimétriques et que les seules cartes valables pour ces estimations sont celles publiées en 1997, validées par un faisceau de données indépendantes (voir Annexe 6) et en particulier utilisées par l'IPSN et l'InVS pour évaluer les conséquences sanitaires de l'accident en France [Verger.00] ;
  - l'utilisation du modèle pour des estimations dosimétriques lors de la Conférence d'Ajaccio du 31 janvier 2002 [Ajaccio.02].

Il est donc nécessaire de discuter la validité scientifique de cette présentation.

La « journée d'information scientifique sur les conséquences sanitaires de l'accident de Tchernobyl » s'est tenue à Ajaccio le 31 janvier 2002 [Ajaccio.02]. Deux interventions ont été directement en rapport avec les cartes des retombées.

### 7.1 Intervention de Mr POURCELOT, IPSN : Campagne de mesure du césium 137 en Corse. Etat de la radioactivité des sols corses, de la situation de mai 86 à la situation de mai 2001.

Cette intervention présente la relation « pluie-dépôt » observée dans la zone atelier de la basse vallée du Rhône et l'applique directement au cas de la Corse.

---

<sup>9</sup> Il apparaît finalement que les principales données exploitables pour établir les conséquences radioécologiques et dosimétriques en France de l'accident de Tchernobyl sont les concentrations en <sup>137</sup>Cs et en <sup>131</sup>I mesurées dans le lait et les légumes-feuilles auxquelles s'ajoutent les résultats des analyses réalisées sur l'air et l'eau de pluie. Ces mesures ont été principalement effectuées par l'OPRI, la DGCCRF et l'IPSN. Ponctuellement, elles sont complétées par des données provenant d'autres organismes, notamment la CRII-RAD. [IPSN-1997 p.59]

<sup>10</sup> Les activités surfaciques moyennes ont été ensuite confrontées aux estimations établies sur la base de mesures d'échantillons de « sol + végétation » effectuées par l'OPRI sur l'ensemble du territoire et par la CRII-RAD sur une trentaine de départements situés dans l'est du pays. Il s'agissait d'une part de valider les activités surfaciques moyennes, et d'autre part d'étudier les hétérogénéités constatées, avec notamment la localisation des endroits les plus touchés par les retombées de Tchernobyl et l'explication des plus fortes valeurs observées. [IPSN-1997 p. 70]

Cette version initiale du « modèle pluie-dépôt » de l'IRSN utilise la relation que nous avons analysée au § 1. Elle ne comportait pas de modélisation de la contamination de l'air au niveau du sol, supposée identique à celle de la basse vallée du Rhône dans tout l'est de la France et en particulier en Corse. L'examen des cartes de la contamination de l'air jour après jour obtenue par kriegerage en 2003-2005 montre que cette hypothèse est approximativement vérifiée.

Cette relation conduit, pour la Corse, à distinguer trois zones de retombées croissantes en raison des différences dans le cumul des précipitations du 1<sup>er</sup> au 5 mai : A (nord), B (sud-ouest) et C (sud-est).

Cette présentation étend à l'iode les résultats obtenus pour le césium :

*De ces données émane une relation qui lie l'activité du césium 137 à la quantité de pluie. Ce qui signifie que, sur la France, à partir des données des stations Météo-France, il est possible d'évaluer l'activité du césium 137 et de l'iode 131 qui se sont déposés à l'époque. Voici les retombées principales de ce travail : c'est la cartographie des dépôts estimés en mai 1986 pour le césium 137 et l'iode 131. On passe du césium 137 à l'iode 131 en multipliant par 7,5. Et on voit ici que ce rapport est entaché d'une forte incertitude puisque ce rapport peut atteindre 10.*

Il ne s'agit ici que de l'iode déposé (en non pas présent en définitive dans les aliments consommés par les animaux ou les humains), mais cette extension du césium à l'iode est en contradiction avec des données radioécologiques bien connues. En effet [Clark 88, Smith 05], le césium dans le nuage de Tchernobyl était sous forme d'aérosols, ce qui explique son dépôt essentiellement sous forme humide entraîné par la pluie (vélocité de dépôt sec #  $2,7 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ ), en revanche l'iode est à 50-75 % sous forme gazeuse, et son dépôt sec est prépondérant (vélocité de dépôt sec #  $5,1 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ ).

Il en résulte que sur les zones de fortes pluies, les dépôts de césium sont proportionnellement plus grands que les dépôts d'iode et qu'il n'est pas licite de déduire l'un de l'autre par un rapport constant. Dans les zones de fortes pluies, Clark et Smith donnent un rapport iode/césium de 5/1 dans les dépôts herbe+sol.

On commet une erreur encore plus grande en postulant que la contamination de l'herbe par l'iode (essentielle pour estimer celle du lait) est proportionnelle aux dépôts de césium. Dans l'herbe ce rapport a des variations importantes mais est, en moyenne, de 18 dans les zones de pluies faibles ou nulles, de 3,8 dans les zones de pluies modérées et de 1,8 dans les zones de fortes pluies. Cette décroissance s'explique par le lavage de l'iode déposé par la pluie.

## **7.2 Intervention de Mr RENAUD, IPSN : Transfert de la radioactivité dans les chaînes alimentaires en Corse ; de la situation de mai 86 à la situation de mai 2001 et dose associée**

Cette intervention utilise la relation pluie-dépôt présentée par Mr Pourcelot pour estimer, à partir de la contamination des aliments (mesurée) et de la dose à la thyroïde d'un enfant (calculée) en Balagne (nord, zone A), la contamination alimentaire et la dose thyroïdienne possible dans la région Ajaccio-Propriano (sud-ouest, Zone B) et la région d'Aléria (sud-est, zone C).

La contamination des aliments en Balagne est documentée par des mesures d'iode 131 dans le lait de chèvre et de brebis fin mai-début juin 86 ( $150 \text{ Bq.L}^{-1}$ ). L'auteur déduit l'activité du lait en mai 86 en utilisant un modèle de décroissance radioactive de la contamination, puis il calcule que les retombées en  $^{131}\text{I}$  devaient être de l'ordre de  $35\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$ . Ce résultat est en bon accord avec les cartes du rapport IPSN-1997 ( $30\,000$  à  $60\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$ ).

La contamination dans les deux autres zones a été calculée<sup>11</sup>. La méthode de calcul utilisée n'est pas précisée. Je l'ai demandée à deux reprises à Didier Champion (IRSN), par mails des 25 septembre et 8 décembre 2005 sans obtenir de réponse.

D'après les résultats présentés, la contamination du lait par l'iode 131 à Solenzara semble avoir été calculée par une règle de trois entre la contamination du lait mesurée puis extrapolée en Balagne et les dépôts d'iode 131, supposés proportionnels aux dépôts de césium 137, eux-mêmes calculés par la relation

<sup>11</sup> Le modèle radioécologique, testé précédemment en Balagne, permet alors, à partir du dépôt établi sur la base des précipitations, de reconstituer quelles pouvaient être les activités du lait de chèvre. On s'aperçoit alors que dans la région de Solenzara, des laits de chèvre ont pu présenter des teneurs en iode 131 supérieures à  $20\,000 \text{ Bq/l}$  et qui ont pu peut-être atteindre  $100\,000 \text{ Bq/l}$ ... Avec une certaine incertitude figurée par la zone hachurée, on voit que le lait de vache a pu dépasser  $1000 \text{ Bq/l}$  en iode 131 dans la zone de Solenzara (CR journée d'Ajaccio p. 37).

pluie-dépôt. L'auteur en déduit que la contamination du lait de Solenzara a pu dépasser 1 000 Bq.L<sup>-1</sup>.

Si c'est bien le cas, cette approche multiplie les approximations :

- les auteurs utilisent des estimations fondées sur le modèle pluie-dépôt du césium, alors qu'ils ont conclu [Renaud.03] qu'il n'était probablement pas adapté aux pluies supérieures à 40 mm. La pluviométrie était de 96 mm à Solenzara. L'inadaptation du modèle est confirmée par les auteurs eux-mêmes qui y ont mesuré en 2001 des dépôts moyens de 18 600 Bq.m<sup>-2</sup>, alors que le modèle prévoyait des dépôts de 55 800 Bq.m<sup>-2</sup> ;
- le rapport des contaminations de l'herbe par <sup>131</sup>I et <sup>137</sup>Cs n'est pas constant mais diminue avec la pluviométrie (donc avec les dépôts de Cs) ; ce rapport est pris égal à 7,5 alors qu'il devrait être proche de 2 dans la zone de Solenzara [Clark 1988] ;
- cette approche est contradictoire avec ce que les auteurs écrivent dans le rapport IPSN-1997, sur l'absence de proportionnalité entre les dépôts au sol et la contamination des végétaux (§ 1.3 et Fig 2.5 page 27) ;

La dernière partie de l'intervention de Mr Renaud porte sur les conséquences dosimétriques. Pour un jeune garçon de Vallica dont l'activité en iode 131 a été mesurée en juillet 1986, par anthropogammamétrie, à 45 Bq, un calcul conduit à une dose de 10 à 30 mSv à la thyroïde. À partir de ce cas, la même règle de proportionnalité conduit à une dose ≤ 150 mSv à la thyroïde, voire à des doses supérieures, pour un enfant hypothétique de Solenzara qui aurait eu le même régime.

Mes demandes répétées, auprès de Didier Champion, de précisions quant à la méthode utilisée pour ce calcul de dose étant restées sans réponse, il est impossible de me prononcer sur la validité de ce calcul dosimétrique, faute de détails quant aux paramètres pertinents (taux de captage de l'iode ingéré, masse de la thyroïde, période effective de l'iode organifié dans la thyroïde) dont j'ignore s'ils ont été recueillis.

Compte tenu de toutes ces imprécisions, s'ajoutant à celles que nous avons montrées pour le modèle lui-même, l'estimation de la dose à la thyroïde pour une personne « équivalente » résidant dans la région de Solenzara est une spéculation sans validité scientifique.

---

## 8 Travaux complémentaires 2004-2005

---

### 8.1 Eléments de réponse sur les représentations cartographiques des retombées de l'accident de Tchernobyl en France [Renaud.04.D]

En réponse à mes premières réserves contre le modèle IRSN-2003, ce rapport de 2004 comporte plusieurs parties : justification de l'écart important existant entre les cartes IPSN-1997 et celles du modèle IRSN-2003, justification de la relation pluie-dépôts, justification du modèle de contamination de l'air, évaluation des incertitudes sur la modélisation des dépôts. Nous en détaillons les principaux points.

Le rapport IPSN-1997 insistait déjà sur l'hétérogénéité des dépôts en fonction de la pluviométrie et de conditions locales et les données cartographiques y sont clairement présentées comme des moyennes des dépôts sur les surfaces cultivées. Ce moyennage résulte de la diversité de la provenance des légumes feuilles et, pour le lait, de la divagation des vaches et du mélange des laits de diverses provenances au niveau des coopératives (d'où provenaient les échantillons mesurés par le SCPRI).

Dans « Eléments de réponse... », l'écart entre les cartes IPSN-1997 et celles du modèle IRSN-2003 est attribué à deux sources d'hétérogénéité déjà exposées dans IPSN-1997 : la pluviométrie <sup>12</sup> et la végétation forestière <sup>13</sup>.

Ces deux sources d'hétérogénéité sont très différentes.

Toutes choses égales par ailleurs (pluviométrie et contamination des masses d'air traversées par la

---

<sup>12</sup> L'intensité des dépôts a été étroitement liée aux pluies durant le passage des masses d'air contaminées. Ainsi, aux endroits où les précipitations ont dépassé 20 mm (...), les activités surfaciques déposées peuvent être jusqu'à deux fois plus élevées que les moyennes départementales. (IPSN-97 p 86 ; IRSN-04 p 6)

<sup>13</sup> Des activités moyennes d'environ 10 000 à 25 000 Bq/m<sup>2</sup> peuvent être attendues sur l'ensemble des forêts des massifs de l'est de la France (Vosges, Jura, Alpes). (IPSN-97 p 85 ; IRSN-04 p 6)

pluie) les retombées initiales sous forme de pluie sont identiques, qu'il s'agisse d'une forêt, d'une clairière, de terres cultivables ou de zones urbaines. Seule varie la part filtrée par la végétation, plus élevée dans le cas d'une forêt, mais sa participation relative aux retombées totales est d'autant plus faible que la pluviométrie est plus importante.

Comme l'explique le rapport IPSN-1997 (p 83), les valeurs plus élevées trouvées en forêt bien après l'accident ne sont pas liées à des dépôts initiaux plus importants, mais au fait que les surfaces agricoles sont périodiquement remaniées par le labour, et que la végétation y est en grande partie enlevée lors des récoltes. Il s'ensuit, année après année, une différence croissante entre les mesures effectuées en forêt et celles effectuées sur les terres cultivées (d'où l'intérêt des mesures sol+végétation et dans les aliments contemporaines de l'accident).

Contrairement à ce que l'on peut mesurer des années plus tard, les moyennes des retombées initiales sur les terres cultivables d'un département « arrosé » devraient donc être proches des moyennes de ces retombées sur l'ensemble du département. En particulier, les valeurs moyennes des retombées sur les terres cultivables données par ASTRAL (à partir des contaminations des légumes-feuilles et du lait) devraient être proches des valeurs moyennes fournies par le modèle pluie-dépôt sur le même territoire. Le modèle pluie-dépôt peut révéler les hétérogénéités locales liées aux différences locales de pluviométrie (ce que ne peut faire ASTRAL), mais ne devrait pas changer les valeurs moyennes.

Si en revanche les paramètres du modèle pluie-dépôts sont identifiés à partir de prélèvements faits à distance de l'accident sans une technique rigoureuse de prévention des biais, en sous-estimant la part des essais nucléaires, et en prenant mal en compte le niveau et la chronologie de la contamination de l'air, on peut s'attendre à des écarts importants entre les valeurs moyennes fournies par ce modèle et celles fournies par ASTRAL.

Les incertitudes sur l'estimation des dépôts par le modèle IRSN-03 sont discutées.

D'une manière générale, les modèles présentés ont été ramenés à des régressions linéaires ; leur validité est quantifiée par le coefficient de corrélation observé ; aucun critère quantitatif d'ajustement permettant la comparaison de différentes approches (par exemple la part de variance des données expliquée par un modèle) n'est calculé. Les points suivants sont détaillés :

L'extrapolation de la relation pluie-dépôt à l'est de la France est étudiée en comparant les valeurs calculées par le modèle et les valeurs mesurées sur 20 sites.

Le rapport mesure/modèle varie entre 0,4 et 1,3. Dans le Var, le modèle surestime les données mesurées 6 fois sur 9 ; il sous-estime les 2 données obtenues en Moselle et surestime de 50 % les deux données recueillies en Corse (Corte et Aléria).

Le modèle de représentation de la contamination de l'air est étudié pour les stations de mesure des aérosols déjà présentées.

Les résultats sont détaillés jour après jour, confirmant le 2 et le 3 mai des écarts importants entre le modèle et la mesure. La droite représentant le modèle n'est tracée que pour les valeurs moyennes du 1 au 3 mai, ainsi que pour la journée du 2 mai. Les 3 et 4 mai, elle passe nettement au dessus des données comme nous l'avons montré. Les auteurs expliquent qu'une étude plus précise des trajectoires des masses d'air pourrait *a priori* permettre une meilleure description du gradient est-ouest de l'activité de l'air, mais que « *les enjeux liés à cette étude complémentaire restent faibles* ». Ils expliquent cette position par le fait que de toute manière, à l'ouest les dépôts sont faibles quel que soit le modèle appliqué, et que « *l'utilisation d'un modèle mieux ajusté pour retracer le parcours des masses d'air resterait entaché d'incertitudes liées à l'interpolation entre les points de mesure, assez dispersées, ayant servi à caler le modèle* ».

Cette position est très étonnante compte tenu des écarts très importants entre la contamination réelle de l'air et celle retenue par le modèle. Dans l'est, les mesures sur les aérosols sont évidemment entachées d'incertitudes, mais elles sont beaucoup plus précises que de prendre en tout point, chaque jour, une contamination identique. Quant aux « enjeux » il est encore plus étonnant de les minimiser.

De cette étude des incertitudes, les auteurs concluent que l'estimation des dépôts par le modèle IRSN-04

est « *fiable en ce qui concerne leur ordre de grandeur, approximative en ce qui concerne la valeur en un point précis* » et que « *À cette échelle (1/1 000 000 ou au maximum 1/50000) l'estimation apparaît acceptable pour l'est de la France, qui est la zone où les dépôts ont été les plus importants* ».

Nous avons vu ce qu'il n'en était rien et présenté la comparaison, faite par les auteurs eux mêmes entre modèle et mesure (§ 6.1).

Le rapport étudie ensuite la confrontation des dépôts calculés avec d'autres sources d'estimation des dépôts en France ou à l'étranger.

Le rapport établit, sur le site de 20 centrales nucléaires, une comparaison entre les retombées totales calculées par le modèle pluie-dépôt pour la partie Tchernobyl et par le modèle de Mitchell pour la partie essais nucléaires et les activités surfaciques extrapolées en 1986, à partir de mesures régulières conduites sur ces sites de 1991 à 2001.

Les valeurs obtenues sont assez voisines, le rapport entre les deux estimations ne dépassant pas 2. Cette validation est cependant la comparaison de deux modèles qui reposent chacun sur des hypothèses fortes 1) quant à la migration, après l'accident, du césium déposé ; 2) quant aux dépôts des essais nucléaires.

Le rapport discute la comparaison avec les valeurs obtenues sur l'eau de pluie sur 11 stations de l'est de la France en 1986. Ces valeurs sont écartées pour « *incohérence* » entre elles et/ou avec la concentration mesurée dans l'air au même lieu sur les filtres déjà mentionnés.

À l'exception de Phénix-Codolet, ces données étaient déjà présentes dans le rapport IPSN-1997 (p 75), converties en retombées surfaciques, avec 14 autres non examinées dans le rapport « *Eléments de réponse...* ». Certaines de ces données sont manifestement aberrantes, par exemple à Fessenheim (140 Bq.m<sup>-2</sup>) ou à Creys (150 Bq.m<sup>-2</sup>), mais une vingtaine sont en bon accord avec les dépôts calculés par ASTRAL. Aucune de ces données n'a été confrontée au modèle.

Le rapport discute la comparaison avec les valeurs obtenues au niveau des sols en 1986. Seules les 9 stations « *de référence* » du SCPRI sont considérées. Les très nombreuses valeurs mesurées sur les prélèvements sol-végétation sont écartés au double motif qu'ils n'ont été prélevés qu'en juin 1986 et que les mesures auraient été réalisées sans préparation préalable en laboratoire contrairement à celles des stations de référence : « *elles avaient pour objectif une évaluation globale des dépôts radioactifs consécutifs au passage du nuage, mais ne permettaient pas une quantification des dépôts suffisamment précise pour des fins d'expertise* ».

Les informations que j'ai obtenues auprès des personnes qui faisaient elles-mêmes ces mesures sont que ces échantillons faisaient l'objet d'un compactage sous une forme standardisée, puis de mesures globale gamma avec un cristal d'iodure de sodium, puis des mesures spectrométriques gamma avec des diodes à jonction calées sur les différents radioéléments analysés. Cette procédure n'avait pas la précision de celle mise en œuvre pour les stations de référence, mais elle fournissait des résultats quantitativement très acceptables. L'incertitude devait être de l'ordre de 20 à 25 %, très inférieure aux multiples incertitudes et erreurs du modèle IRSN-2003.

Le « *statut* » de ces prélèvements change selon leur adéquation aux modèles successifs mis en œuvre par les mêmes auteurs : au temps d'ASTRAL, le rapport IPSN-1997 indique page 78 : *la carte relative aux activités surfaciques déposées de <sup>137</sup>Cs établie dans cette étude avec le logiciel ASTRAL est en bon accord avec la carte de dépôts établie par l'OPRI, sur la base de résultats de mesures d'échantillons de « sol + végétation »* ; dans les « *Eléments de réponse* » ces mesures sol+végétation, nettement différentes des valeurs données par le modèle IRSN-2003, ne « *permettaient pas une quantification des dépôts suffisamment précise pour des fins d'expertise* » ; dans le dernier rapport [Renaud 05] de novembre 2005 qui fait pourtant l'inventaire des données disponibles, elles ne sont même plus mentionnées. On observe une dégradation parallèle du statut des mesures sur l'eau de pluie.

Sur les 9 stations de référence, les données sont soit assez proches des valeurs du modèle (Anglade, Bellenave, Nainville, Le Vésinet) soit sensiblement différentes : Bussy (donnée 2070 Bq.m<sup>-2</sup> / modèle 3700 Bq.m<sup>-2</sup>) ; Méaudre (donnée 8600 Bq.m<sup>-2</sup> / modèle 5700 Bq.m<sup>-2</sup>) ; Montfaucon (donnée 4095 Bq.m<sup>-2</sup> / modèle 8900 Bq.m<sup>-2</sup>) ; Vioménil (donnée 2650 Bq.m<sup>-2</sup> /

modèle 7200 Bq.m<sup>-2</sup>).

Aucune comparaison n'a été faite avec l'estimation des retombées moyennes en <sup>137</sup>Cs fournies par ASTRAL. Les valeurs moyennes données par le modèle IRSN-2003 (dont il faudrait disposer plus précisément) sont 2 à 4 fois plus élevées que celles d'ASTRAL.

Le rapport compare les valeurs obtenues par le modèle IRSN et celles obtenues dans les pays frontaliers ; nous avons examiné cette comparaison au § 6.4.

Enfin ce rapport rappelle que le modèle IPSN-1997 peut être considéré comme satisfaisant pour estimer l'impact dosimétrique des retombées de l'accident de Tchernobyl pour une large majorité de la population (p 6).

## **8.2 Interprétation phénoménologique et analytique de la relation pluie-dépôts utilisée pour la reconstitution des dépôts de <sup>137</sup>Cs en France consécutifs à l'accident de Tchernobyl [Renaud 05]**

Ce rapport, dont j'ai pu avoir une version provisoire en août 2005 et la version définitive (légèrement différente) fin novembre 2005, a pour objectif de tester certaines voies d'amélioration possibles du modèle IRSN-2003 :

- meilleure prise en compte des retombées des essais nucléaires ;
- modélisation de la contamination de l'air en utilisant les données des filtres à air du SCPRI, et une interpolation par krigeage ou pondération barycentrique par l'inverse de la distance ;
- calcul des dépôts fondé sur le produit jour par jour de la pluviométrie par la contamination de l'air (au lieu d'un calcul global) ;
- identification du modèle sur un jeu de données plus étendu que la seule zone atelier de la basse vallée du Rhône.

Ce rapport appelle les commentaires suivants :

- Les données disponibles ont été choisies de manière très étonnante : sur les très nombreuses mesures effectuées par le SCPRI (qui permettent grâce au <sup>134</sup>Cs de faire la part des retombées des essais nucléaires) seules celles des 9 stations de référence ont été retenues. Leur qualité est considérée comme douteuse : « *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* ». Les données mesurées sur la pluie et les données sol+végétation ne sont pas mentionnées.
- Le choix des données retenues n'est pas clairement explicité. Les données de la zone atelier (voir plus loin) sont massivement représentées, mais elle ne sont qu'une sélection des données disponibles dans cette zone, même en ne retenant que les sites où plusieurs mesures étaient disponibles. Comment ces données ont-elles été sélectionnées ?
- Le choix d'écartier les sites sur lesquels une seule donnée était disponible (d'ailleurs imparfaitement respecté : par exemple Mollans-sur-Ouvèze éliminé) n'est pas justifiable pour des raisons techniques car l'identification d'un modèle prend intrinsèquement en compte la variabilité des mesures si on prend correctement en compte l'hétéroscédasticité. Ce choix qui fait passer le nombre de données de 237 (après la sélection évoquée) à 139 réparties sur 58 sites, conduit à une sous-estimation de la variabilité des retombées et à une sous-représentation de certaines zones du territoire (par exemple aucun point en Corse).
- D'une manière générale, comme le notent les auteurs : « *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 86 et de la rémanence des essais nucléaires, eu égard aux pertes en césium* ». L'utilisation de ces données repose sur des estimations difficiles à vérifier.
- Les données de la « zone atelier » de la basse vallée du Rhône (utilisées pour identifier la relation pluie-dépôts) sont massivement surreprésentées : 72 mesures sur 129 (56 %) dans un territoire de



7800 km<sup>2</sup> (1,5% du territoire métropolitain), ce qui explique en grande partie que les résultats de ces nouveaux calculs ne soient pas significativement différents de ceux du modèle initial.

- Les résultats obtenus par ASTRAL ne sont pas utilisés (par exemple pour la validation des résultats).
- L'estimation des retombées des essais nucléaires, nécessaire compte tenu de la nature de la plupart des données retenues (très postérieures à l'accident) a utilisé la relation de Mitchell (proportionnalité à la pluviométrie moyenne) validée sur 4 points en France [Renaud.04.C]. Les résultats sont très approximatifs, comme nous l'avons vu. Ces données ont été utilisées de manière anormale dans le cadre de l'identification d'un modèle (soustraites avant de faire l'identification) ;
- Comme dans la zone atelier, il n'a été tenu aucun compte de l'hétéroscédasticité des données et une régression linéaire simple (inadaptée) a été utilisée.
- L'interpolation des contaminations de l'air par krigeage n'est peut-être pas la meilleure méthode, le krigeage reposant sur des hypothèses de structure statistique des données qui n'ont pas été vérifiées ici. C'est pour cette raison que par exemple les cartes européennes des dépôts ont été établies par une méthode barycentrique (les avantages comparatifs du krigeage et de l'interpolation barycentrique pondérée en  $1/d^2$  sont discutés dans [Dubois.01]).

Les auteurs concluent :

*Les nouveaux ajustements ne sont pas différents de la relation de 2003. En effet, bien que les prédictions soient numériquement différentes, elles ne sont pas distinguables statistiquement.*

...

*Malgré la sophistication de l'approche et la prise en compte d'un nombre de données plus important, ce résultat montre qu'aucune information nouvelle n'a vraiment été apportée pour comprendre la genèse du dépôt. La valeur ajoutée potentielle des nouveaux ajustements a certainement été masquée par la mauvaise qualité des nouvelles données introduites (par ailleurs largement discutée dans les différentes parties de ce rapport).*

Cette étude a permis de vérifier les points suivants, déjà évoqués :

- le caractère non négligeable des retombées des essais nucléaires ;
- l'écart entre le modèle de contamination de l'air du modèle IRSN-2003 et les données mesurées sur les filtres à air du SCPRI ;

Elle a montré également la variabilité du coefficient de lessivage, supposé constant et uniforme dans le modèle IRSN-2003. Ce coefficient varie d'un jour à l'autre, par exemple de  $929 \pm 117$  le 3 mai, à  $2034 \pm 332$  le 4 mai. Il varie également d'une région à l'autre, par exemple de  $951 \pm 85$  dans le nord-est à  $1572 \pm 139$  dans le sud-est.

L'identification du nouveau modèle dans le sud-est, où prédominent largement les données de la zone atelier, conduit à une valeur du coefficient de lessivage de  $1572 \pm 139$ , beaucoup plus élevée que celle trouvée, nous l'avons vu, par la plupart des auteurs (# 500 à 750).

Ces éléments conduisent à s'interroger sur la validité du modèle et sur sa réelle capacité à estimer quantitativement les retombées de Tchernobyl. De telles variations du coefficient de lessivage (dont le caractère constant et uniforme est à la base du modèle pluie-dépôts) ne peuvent en effet s'expliquer que par une mauvaise qualité des données (notamment concernant les retombées des essais nucléaires) possiblement biaisées et/ou par de réelles et massives fluctuations du coefficient de lessivage qui réduiraient à néant la possibilité de quantifier de manière fiable les retombées de Tchernobyl par un modèle aussi simple que IRSN-2003.

---

## Conclusion

---

En conclusion, l'ensemble de ces imprécisions méthodologiques, l'écart parfois considérable entre les hypothèses très simplificatrices retenues et les données disponibles (en particulier pour la contamination de l'air et les retombées des essais nucléaires), l'écart entre les résultats du modèle et les mesures, ses résultats incompatibles avec ceux exposés et dûment validés dans le rapport IPSN-1997, conduisent à considérer que le modèle IRSN-2003 ne permet pas une estimation quantitative fiable des retombées de Tchernobyl et encore moins les estimations dosimétriques pour lesquelles il a été utilisé.

---

## Références

---

- [Ajaccio.02] Actes de la « Journée d'information scientifique sur les conséquences sanitaires de l'accident de Tchernobyl en Corse » organisée à Ajaccio 31 janvier 2002 par la Préfecture de Corse.
- [Clark.88] Clark MJ, Smith FB. Wet and dry deposition of Chernobyl releases. *Nature* 332, 245-249, 1988
- [Dubois.01] Dubois G, De Coort M. Mapping  $^{137}\text{Cs}$  deposition : data validation methods and data interpretation. *J Envir Radioactivity* 53, 271-289, 2001
- [Renaud.97] Renaud P, Beaugelin K, Maubert H, Ledenvic P. Les retombées en France de l'accident de Tchernobyl. Conséquences radioécologiques et dosimétriques. IPSN. EDP Sciences 1997
- [IRSN.03] Rapport IRSN « Tchernobyl 17 ans après » publié fin avril 2003
- [Muck 2002] Muck K, Prohl G, Likhtarev I, Kovgan L, Meckbach R, Golikov V. A consistent radionuclide vector after the Chernobyl accident. *Health Physics*. 82(2):141-156, 2002
- [Renaud.03] Renaud P, Pourcelot L, Métivier JM, Morello M. Mapping of  $^{137}\text{Cs}$  deposition over eastern France 16 years after the Chernobyl accident. *The Science of Total Environment* 309 : 257-264 ; 2003
- [Renaud.04.A] Renaud P, Louvat D. Les retombées de l'accident de Tchernobyl en France : analyse critique des mesures effectuées à l'époque sur le territoire national et enseignements pour le gestion de crise. *Radioprotection*, 38, 529-542 ; 2004
- [Renaud.04.B] Renaud P, Métivier JM, Castelier E, Pourcelot L, Louvat D. Cartographie des dépôts de  $^{137}\text{Cs}$  en mai 1986 sur l'ensemble du territoire français métropolitain . *Radioprotection*, 39, 257-264, 2004
- [Renaud.04.C] Renaud P, Louvat D. Magnitude of fission product deposition from atmospheric nuclear weapon test fallout in France. *Health Phys*. 86(4) : 353-358 ; 2004
- [Renaud.04.D] Renaud R, Leprieur F, Métivier JM, Pourcelot L, Duffa C, Lemaitre N, Linden G, Champion D. Rapport IRSN « Eléments de réponse sur les représentations cartographiques des retombées de l'accident de Tchernobyl en France » DEI n° 04-02. Mars 2004
- [Renaud 05] Renaud P, Garcia-Sanchez L, Métivier JM, Pourcelot L, Champion D. Interprétation phénoménologique et analytique de la relation pluie-dépôts utilisée pour la reconstitution des dépôts de  $^{137}\text{Cs}$  en France consécutifs à l'accident de Tchernobyl. Rapport IRSN DEI 2005-03. Novembre 2005
- [Smith 05] Smith J, Beresford N.A. Chernobyl. Catastrophe and consequences. Springer. 2005
- [Thomas 86] Thomas AJ, Martin JM. First assessment of Chernobyl radioactive plume over Paris. *Nature* 321 : 817-819 ; 1986
- [Verger 00] Verger P, Chérié-Challine L. Evaluation des conséquences sanitaires de l'accident de Tchernobyl en France. Rapport conjoint IPSN-InVS. Décembre 2000.

## Annexe1

Estimation des retombées des essais nucléaires dans la zone atelier, selon la méthode préconisée par les auteurs du modèle.

Station	Précipitations moyennes annuelles (mm)	Retombées des essais nucléaires (Bq.m <sup>-2</sup> )
Albaron	553	2109
Avignon	683	2455
Barjac	889	3005
Caderousse	729	2578
Cavillargues	844	2886
Chateauneuf-du-Pape	711	2530
Chusclan	770	2688
Codolet	744	2616
Fourques	627	2306
Malaucene	783	2722
Mas d'Asport	587	2198
Mirabel-aux-Baronnies	806	2784
Mollans-sur-Ouveze	791	2744
Montfaucon	728	2575
Noves	666	2408
Nyons	846	2890
Orange	723	2560
Palus	796	2757
Piolenc	751	2637
Pont-Saint-Esprit	803	2775
Pujaut	719	2550
Roquemaure	726	2570
Saint Pierre de Vassols	675	2434
Sarrians	670	2420
Sauveterre	702	2506
Seguret	765	2672
Tavel	766	2676
Tresques	784	2724
Uzes	816	2811
Vaison-la-Romaine	759	2658
Vallabrègues	673	2428
Venejan	788	2736
Vinsobres	826	2837
	Moyenne	2613,48
	Ecart-type	198,69

## Annexe 2

Comparaison entre les valeurs du produit (pluviométrie x contamination de l'air) obtenues soit par un calcul global (pluviométrie totale sur 5 jours x contamination moyenne de l'air) soit par un calcul jour par jour.

Station	Somme pluie x Moyenne ( $^{137}\text{Cs}$ )	Somme jour par jour (pluie du jour x $^{137}\text{Cs}$ du jour)	Rapport
Ajaccio	6,20	4,83	1,28
Bellenaves	1,21	0,74	1,65
Brennilis	1,63	0,22	7,45
Bordx 117	8,56	1,42	6,05
Bugey	6,77	8,38	0,81
Chinon	1,96	1,20	1,64
Cherbourg	0,94	1,28	0,74
Chooz	10,88	1,51	7,22
Creys-Mlv	2,51	2,24	1,12
Cruas	7,27	6,60	1,10
Dampierre	0,29	0,07	3,92
Grenoble	1,97	2,33	0,85
Lille	0,55	0,04	12,65
Meaudre	4,27	4,07	1,05
Nice	15,98	2,72	5,87
Nainville	0,60	0,22	2,75
Phenix	6,02	4,19	1,44
La Rochelle	4,77	0,78	6,11
Saclay	0,77	0,14	5,31
StLtCeris	2,54	1,28	1,99
StLaurentEaux	0,39	0,29	1,34

## Annexe 3

Valeurs, en  $\text{Bq.m}^{-3}$ , de la contamination de l'air mesurées du 1<sup>er</sup> au 5 mai sur les filtres à air dépouillés par l'IRSN, en 13 points du territoire de longitude supérieure ou égale à 4°. L'extension à l'est de la France du modèle estimé dans la zone atelier fait l'hypothèse que toutes ces valeurs sont comprises dans l'intervalle  $[0,65-0,75] \text{Bq.m}^{-3}$ .

Ville	30/04 - 01/05	01/05 - 02/05	02/05 - 03/05	03/05 - 04/05	04/05 - 05/05
Ajaccio	0,01	0,42	0,74	0,77	0,24
Bugey	0,01	0,36	0,47	0,33	0,09
Chooz	0,00	2,42	1,13	0,27	0,06
Creys-Mlv	0,01	0,39	0,53	0,23	0,08
Cruas	0,02	0,16	0,60	0,41	0,13
Grenoble	0,00	0,18	0,38	0,32	0,18
Meaudre	0,01	0,38	0,41	0,29	0,18
Montfaucon	0,02	0,21	0,21	0,49	0,17
Nice	0,35	1,12	1,84	1,29	0,15
Phenix	0,05	0,23	0,38	0,41	0,17
Prevessin	0,76	1,17	0,69	0,20	0,17
St Alban	0,10	0,41	0,79	0,41	0,15
Tricastin	0,05	0,20	0,64	0,50	0,18
Vioménil	0,01	3,51	0,86	0,25	0,10

### Annexe 4

Comparaison, pour 9 stations pour lesquelles les précipitations sont disponibles, entre une estimation « globale »  $P^{1-5}(j) \times 0,7$  et une estimation utilisant les données de contamination de l'air et de pluviométrie, jour après jour  $\sum_{i=1-5} P(j,i) \times C(j,i)$ . Le rapport est celui de la première valeur à la seconde.

	$P^{1-5}(j) \times 0,7$	$\sum_{i=1-5} P(j,i) \times C(j,i)$	Rapport
Ajaccio	6,09	4,07	1,50
Bugey	17,43	8,14	2,14
Chooz	9,66	1,45	6,66
Creys-Mlv	6,58	1,87	3,51
Cruas	17,92	6,42	2,79
Grenoble	5,32	2,18	2,44
Meaudre	11,34	4,04	2,81
Nice	11,20	2,46	4,56
Phenix	15,61	4,01	3,89

## Annexe 5

Comparaison des contaminations du sol estimées par le modèle pluie-dépôt et mesurées à l'est du méridien 4°

Station	Année de la mesure	Pluie mm 1-5/5/86	Modèle Bq.m <sup>-2</sup>	Mesure (moyenne) Bq.m <sup>-2</sup>	Modèle/mesure
Entraunes	1986	6	5344	6939	0.770
Puget	1986	10	7584	3438	2.21
Mallaussène	1986	12	8705	3685	2.36
Madonne Utel	1986	21	13744	11910	1.15
Valdebore	1986	25	15984	11295	1.42
St Auban	1986	25	15984	15100	1.06
Isola 2000	1986	30	18764	12109	1.55
Boreon	1986	32	19904	25250	0.79
Esteng	1986	36	22144	22047	1.00
Sj Jean d'O	1986	33	20464	23500	0.87
Gerardmer	1986	323	19904	27400	0.73
Corte	1986	39	23824	15500	1.54
Aleria	1986	48	28864	19500	1.48
Corte	2001	39	23824	5200	4.58
Aleria	2001	48	28864	7000	4.12
Ghisonnacia	2001	71	41800	16400	2.55
Mignataja	2001	117	67500	20000	3.37
Pediquarcio	2001	117	67500	22250	3.03
Travo	2001	95	55200	17600	3.14
Solaro	2001	95	55200	25700	2.15
Solenzara	2001	96	55800	18600	3.00
La Roche de G.	2000-2001	37	22704	19800	1.15
Sisteron	2000-2001	40	24384	24500	0.99

## Annexe 6

### Le rapport IPSN-1997

En 1997, le rapport de l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire « Les retombées en France de l'accident de Tchernobyl » (IPSN-1997) présente les conséquences radioécologiques et dosimétriques de l'accident sur le territoire français. Ce rapport comporte :

- une analyse des méthodes d'évaluation des bilans écologiques et dosimétriques qui détaille en particulier les fonctions du logiciel ASTRAL qui a servi de base à ces évaluations. ASTRAL permet, dans un sens ou dans l'autre, de passer de l'activité surfacique à l'activité massique des sols et des productions agricoles et d'élevage et enfin aux doses reçues par la population ;
- une cartographie des dépôts moyens de  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{131}\text{I}$ , calculés au moyen d'ASTRAL à partir des nombreuses mesures de contamination effectuées sur les aliments, les mesures sur le sol et l'eau de pluie étant trop peu nombreuses pour établir une carte détaillée. La carte des dépôts de  $^{137}\text{Cs}$  permet de définir de l'ouest à l'est, quatre zones de contamination croissante ;
- une estimation dosimétrique (dose efficace et dose à la thyroïde) pour les adultes et les enfants résidant dans chacune des quatre zones.

Le rapport IPSN-1997 recense de manière précise les données disponibles et il est important d'en reprendre quelques extraits qui montrent la fiabilité accordée à certaines mesures :

- les principales données exploitables sont les concentrations en  $^{137}\text{Cs}$  et en  $^{131}\text{I}$  mesurées dans le lait et les légumes-feuilles et les analyses réalisées sur l'air et l'eau de pluie<sup>14</sup>
- les mesures d'activité de l'air et l'eau de pluie sont utilisées pour estimer la contribution respective des dépôts secs et humides. À partir de cette estimation et des données de contamination des aliments, ASTRAL calcule une estimation des retombées surfaciques sur les terres agricoles.<sup>15</sup>
- les échantillons de « sol + végétation » ont été utilisés pour valider ces estimations et d'étudier les hétérogénéités constatées<sup>16</sup>.
- le tableau 5.I, page 75, donne les valeurs de la contamination mesurée dans l'eau de pluie entre le 1<sup>er</sup> et le 5 mai 86, au niveau de 32 stations réparties sur tout le territoire.

Concernant les endroits du territoire les plus touchés, le rapport les explique par les conditions de dépôt, la couverture du sol, l'orographie et leur géomorphologie (p. 71).

Le rapport IPSN-1997 insiste sur la cohérence de l'ensemble des résultats cartographiques et dosimétriques obtenus avec ASTRAL avec d'autres types de données :

- avec les cartes du SCPRI fondées sur des mesures directes des dépôts « sol + végétation »<sup>17</sup>
- avec la cinétique de décroissance des contamination des aliments mesurée et calculée (§ 2.1.1 p 77) ;
- avec les données de la CRII-RAD<sup>18</sup>

<sup>14</sup> Il apparaît finalement que les principales données exploitables pour établir les conséquences radioécologiques et dosimétriques en France de l'accident de Tchernobyl sont les concentrations en  $^{137}\text{Cs}$  et en  $^{131}\text{I}$  mesurées dans le lait et les légumes-feuilles auxquelles s'ajoutent les résultats des analyses réalisées sur l'air et l'eau de pluie. Ces mesures ont été principalement effectuées par l'OPRI<sup>14</sup>, la DGCCRF et l'IPSN. Ponctuellement, elles sont complétées par des données provenant d'autres organismes, notamment la CRII-RAD. (IPSN-1997 p.59)

<sup>15</sup> Les mesures d'activité de l'air et de l'eau de pluie faites par l'OPRI, le CEA et l'IPSN disponibles sur certains sites, ont permis d'évaluer les contributions respectives des dépôts secs et humides à l'activité totale moyenne déposée pour de grandes zones. (IPSN-1997 p. 70).

<sup>16</sup> Les activités surfaciques moyennes ont été ensuite confrontées aux estimations établies sur la base de mesures d'échantillons de « sol + végétation » effectuées par l'OPRI sur l'ensemble du territoire et par la CRII-RAD sur une trentaine de départements situés dans l'est du pays. Il s'agissait d'une part de valider les activités surfaciques moyennes, et d'autre part d'étudier les hétérogénéités constatées, avec notamment la localisation des endroits les plus touchés par les retombées de Tchernobyl et l'explication des plus fortes valeurs observées. (IPSN-1997 p. 70)

<sup>17</sup> La figure 5.5 montre que la carte relative aux activités surfaciques déposées de  $^{137}\text{Cs}$  établie dans cette étude avec le logiciel ASTRAL est en bon accord avec la carte de dépôts établie par l'OPRI, sur la base de résultats de mesures d'échantillons de « sol + végétation » (IPSN-1997 p.78)

- avec les estimations faites en Allemagne par la Commission de protection radiologique allemande<sup>19</sup>
- avec les estimations faites en ex-URSS par l'AIEA (p. 124)
- en confrontant aux 2200 mesures faites en 1986 sur les personnels du CEA, de la COGEMA et d'EDF, ce qui montre un accord satisfaisant compte tenu de la dispersion des résultats et de l'origine très variable des aliments consommés<sup>20</sup>

Le rapport souligne les limites des résultats présentés, qui tiennent essentiellement à la dispersion des mesures et aux hétérogénéités locales (cette dispersion ne devant pas être surestimée quand il s'agit de productions « moyennées » par le recueil, comme le lait de vache distribué par les coopératives). Des écarts d'un facteur 2 ou 3 sont observés, par exemple en Bourgogne (l'estimation du SCPRI est de 1000 Bq.m<sup>-2</sup>, contre 1500-2000 pour ASTRAL), ce qui est considéré comme une bonne concordance en radioécologie.

Les cartes des activités surfaciques en césium 137 ou en iode 131 ne représentent la contamination moyenne que des surfaces agricoles, la contamination des surfaces boisées pouvant, des années après l'accident, être 2 à 3 fois supérieure.

Concernant les mesures de la CRII-RAD, le rapport explique l'origine possible de discordances, et n'exclue pas un biais de sélection des mesures<sup>21</sup>.

Le rapport IPSN-1997 expose une méthodologie dont les résultats sont globalement d'une bonne qualité et en cohérence avec l'ensemble des données disponibles ainsi qu'avec les résultats obtenus par d'autres équipes nationales et internationales.

Ce rapport considère que les mesures sur l'eau de pluie, le lait et les légumes-feuilles font partie des plus fiables disponibles ; les mesures sur l'eau de pluie ont été utilisées pour estimer la contribution respective des dépôts secs et humides, nécessaire à l'utilisation d'ASTRAL.

Les 80 mesures d'échantillons « sol+végétation » sont utilisées pour valider l'approche cartographique retenue et elles sont en bon accord avec cette cartographie. Leur validité n'est pas remise en cause ; la raison pour laquelle elles ne sont pas directement utilisées pour établir une cartographie tient à leur rareté mais non à leur qualité.

---

<sup>18</sup> Les estimations d'activités de surface proposées par la CRII-RAD concordent avec celles présentées dans cette étude, et soulignent également l'effet des précipitations. (IPSN-1997 p. 86)

<sup>19</sup> Ces estimations sont en parfait accord avec celles faites pour l'Allemagne par la Commission de protection radiologique allemande (IPSN-1997 p 123)

<sup>20</sup> Les plages de mesures, délimitées par les valeurs minimales et maximales enregistrées sont « enveloppées » de manière satisfaisante par les valeurs théoriques moyennes estimées par les modèles... (IPSN-1997 p 128)

<sup>21</sup> La dispersion importante et des valeurs plus élevées peuvent s'expliquer par le fait que certains échantillons sont issus de surfaces agricoles et d'autres de surfaces boisées. Par ailleurs, le document d'origine indique que seules les valeurs les plus fortes mesurées sur un même site ont été retenues. (IPSN-1997 p. 86)