

**IRSN**INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

**Analyse de cohérence  
des différentes approches  
de reconstitution  
des dépôts de  $^{137}\text{Cs}$  en France  
consécutifs à l'accident  
de Tchernobyl**

Didier CHAMPION, Philippe RENAUD,  
Jean-Michel METIVIER

Rapport DEI 2006-01  
14 mars 2006

DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT  
ET DE L'INTERVENTION

|   |   |                              |                                 |                     |                                   |
|---|---|------------------------------|---------------------------------|---------------------|-----------------------------------|
| Demandeur   |   | Direction générale de l'IRSN |                                 |                     |                                   |
| Référence de la demande   |   |                              |                                 |                     |                                   |
| Numéro de la fiche programme  |   |                              |                                 |                     |                                   |
| <p><b>ANALYSE DE COHÉRENCE ET DE SENSIBILITÉ DES<br/>DIFFÉRENTES APPROCHES DE RECONSTITUTION DES<br/>DÉPÔTS DE <sup>137</sup>Cs EN FRANCE CONSÉCUTIFS À L'ACCIDENT<br/>DE TCHERNOBYL</b></p> <p>Didier CHAMPION, Philippe RENAUD, Jean-Michel METIVIER</p> <p>Direction de l'environnement et de l'intervention</p> <p>Rapport Direction/DEI n° 2006-01</p> |   |                              |                                 |                     |                                   |
|   | Réservé à l'unité   |                              | Visas pour diffusion            |                     |                                   |
|   | Auteur(s)   | Vérificateur*                | Chef du SESURE<br>Chef du SECRE | Directeur de la DEI | Directeur<br>Général<br>de l'IRSN |
| Noms  | Philippe Renaud<br>Didier Champion<br>Jean-Michel<br>Métivier | C. Mercat<br><br>P. Calmon   | N. Lemaitre<br><br>J.C. Gariel  | Didier Champion     | J. REPUSSARD                      |
| Dates   | 10/03/06  | 10/03/06                     | 10/03/06                        | 14/03/06            | 15/03/06                          |
| Signatures  |   |                              |                                 |                     |                                   |

\* rapport sous assurance de la qualité

---

---

## HISTORIQUE DES MODIFICATIONS

| Version | Date                     | Auteur                   | Pages ou paragraphes modifiés | Description ou commentaires                                       |
|---------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|---|
| 2       | 07/02/2006               | Ph Renaud                | Ensemble du texte             | Prise en compte des remarques de C. Mercat                        |
| 3       | 08/02/2006               | Ph Renaud                | Ensemble du texte             | Prise en compte partielle des remarques de P Calmon               |
| 4       | 09/03/2006<br>14/03/2006 | Ph Renaud<br>D. Champion | Ensemble du texte             | Corrections supplémentaires de D Boulaud, D Champion, N. Lemaitre |
|         |                          |                          |                               |   |

---

---

## LISTE DES PARTICIPANTS

| Nom | Organisme |
|-----|-----------|
|     |           |

---

---

## LISTE DE DIFFUSION

| Nom | Organisme |
|-----|-----------|
|     |           |

## TABLE DES MATIERES

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUCTION.....</b>   | <b>2</b>  |
| <b>2. INTERPRETATION DE LA CONTAMINATION DES PRODUCTIONS AGRICOLES<br/>EFFECTUEE EN 1997.....</b>   | <b>3</b>  |
| 2.1. DESCRIPTION DE LA METHODE ET CHOIX DES PARAMETRES .....  | 4         |
| 2.2. RESULTATS OBTENUS.....   | 6         |
| <b>3. EVALUATION DES DEPOTS MOYENS DEPARTEMENTAUX A PARTIR DES MODELES<br/>2003 ET 2005 .....</b>   | <b>7</b>  |
| 3.1. RAPPEL SUR LES CARTOGRAPHIES DES DEPOTS DE <sup>137</sup> CS ETABLIES EN 2003 ET 2005 .....  | 7         |
| 3.2. COMPARAISON DES DEPOTS MOYENS DEPARTEMENTAUX ESTIMES EN 1997 ET ISSUS DES CARTOGRAPHIES<br>DE 2003 ET DE 2005 .....                            | 8         |
| <b>4. EVALUATION DES COMPOSANTES SECHES ET HUMIDES DANS LES RETOMBEES<br/>EN FRANCE DE L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL .....</b>                           | <b>10</b> |
| 4.1. GENERALITES SUR LES COMPOSANTES DU DEPOT ATMOSPHERIQUE.....  | 10        |
| 4.2. ESTIMATION DE LA PROPORTION DE DEPOT HUMIDE DANS LES RETOMBEES EN FRANCE DE L'ACCIDENT DE<br>TCHERNOBYL .....                                  | 13        |
| 4.2.1 METHODE DE CALCUL ET RESULTATS ASSOCIES .....   | 13        |
| 4.3. ANALYSE DE LA VARIABILITE DE LA PROPORTION DE DEPOT HUMIDE AU REGARD DE L'HYPOTHESE<br>UNIFORME DE 80% RETENUE POUR L'ETUDE IPSN DE 1997 ..... | 15        |
| <b>5. INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES DU DEPOT ATMOSPHERIQUE SUR LA<br/>CONTAMINATION DES VEGETAUX.....</b>  | <b>17</b> |
| 5.1. INTERCEPTION DU DEPOT SEC PAR LES VEGETAUX .....   | 17        |
| 5.2. INTERCEPTION DU DEPOT HUMIDE PAR LES VEGETAUX .....  | 18        |
| 5.3. CONTAMINATION DES VEGETAUX PAR UN DEPOT MIXTE (SEC + HUMIDE).....  | 20        |
| 5.4. ACTUALISATION DE L'INTERPRETATION DES MESURES SUR LES PRODUCTIONS AGRICOLES DANS L'EST DE<br>LA FRANCE .....                                   | 22        |
| 5.5. INCIDENCE SUR L'ESTIMATION DES DOSES.....  | 24        |
| <b>6. CONCLUSION .....</b>  | <b>26</b> |
| <b>7. BIBLIOGRAPHIE.....</b>  | <b>27</b> |

# 1. INTRODUCTION

Depuis 1997, l'IPSN puis l'IRSN ont mené des travaux de reconstitution des dépôts de  $^{137}\text{Cs}$  consécutifs à l'accident de Tchernobyl à l'échelle de la France entière, selon plusieurs approches successives, visant des objectifs différents.

La première approche, ayant conduit à une cartographie des activités surfaciques moyennes des dépôts sur les surfaces agricoles (1997), est fondée sur l'exploitation des mesures de  $^{137}\text{Cs}$  et de  $^{131}\text{I}$  réalisées en 1986 sur les produits végétaux (légumes à feuilles) et le lait, à l'aide du code ASTRAL (Renaud et al, 1997). Cette approche vise principalement à estimer les doses reçues en moyenne par la population en 1986.

La seconde approche retenue consiste à interpréter les activités rémanentes de  $^{137}\text{Cs}$  mesurées dans les sols au regard des pluies tombées entre le 1<sup>er</sup> et le 5 mai 1986, et d'en déduire une relation permettant de reconstituer les retombées atmosphériques consécutives à l'accident de Tchernobyl au niveau de près de 3700 stations météorologiques où les hauteurs de pluie ont été mesurées en mai 1986. Deux types de relations pluie-dépôt ont ainsi été établies, la première, empirique, ayant conduit en 2003 à une reconstitution cartographique des dépôts à l'échelle de la France (Renaud et al., 2003 ; Renaud et al., 2004), la seconde, interprétant plus en détail les phénomènes à l'origine des dépôts, ayant servi à éprouver l'approche empirique et à déterminer les incertitudes attachées à ce type d'approche. Cette approche vise principalement à mieux décrire et expliquer les variations des dépôts.

Ces deux approches successives donnent une information différente mais complémentaire sur la répartition spatiale et l'ampleur des dépôts de  $^{137}\text{Cs}$  après l'accident de Tchernobyl et, sur certains aspects, la question de la cohérence de ces approches est soulevée, en particulier dans l'Est de la France, zone la plus touchée. Ainsi, la carte élaborée en 1997 montre une zone 1 (Est de la France) où les dépôts départementaux moyens de  $^{137}\text{Cs}$  sur les surfaces agricoles seraient compris entre 3000 et 6000 Bq.m<sup>-2</sup> ; dans la même zone, la carte élaborée en 2003 montre des portions significatives de territoire ayant pu recevoir des dépôts supérieurs à 10000 Bq.m<sup>-2</sup>, voire, sur des territoires plus limités, supérieurs à 20000 Bq.m<sup>-2</sup>.

L'objet du présent rapport est d'étudier la cohérence des résultats obtenus à l'aide de ces deux approches, de montrer que les écarts entre les activités totales déposées sur certains départements résultent de l'hypothèse faite en 1997 sur la proportion de dépôt humide et que ces écarts ont peu d'influence sur les transferts dans la chaîne alimentaire. Sur cette base, ce rapport explique pourquoi les doses moyennes engagées par ingestion en 1986, telles qu'évaluées en 1997, ne sont pas remises en cause par les cartographies de 2003 et 2005. L'incidence de la nouvelle carte sur les autres voies d'exposition (irradiation externe due aux dépôts, contamination interne par ingestion au cours des années postérieures à 1986) est ensuite étudiée.

Ce rapport aborde successivement les points suivants :

- un rappel synthétique de la démarche de reconstitution des retombées sur les surfaces agricoles par l'interprétation des mesures faites sur le lait et les légumes à feuilles (étude IPSN de 1997) ;
- l'analyse comparative des évaluations des retombées moyennes de  $^{137}\text{Cs}$  au niveau départemental selon les différentes approches ;

- l'analyse de la variabilité spatiale des composantes sèches et humides du dépôt et la confrontation de cette variabilité à l'hypothèse de l'étude IPSN de 1997 ;
- l'analyse de l'influence de la proportion de dépôt humide dans le dépôt total sur la contamination des productions végétales et de la chaîne alimentaire qui en découle et l'incidence sur l'évaluation des conséquences dosimétriques, notamment pour la zone 1 (zone la plus touchée en termes de retombées totales).

## **2. INTERPRETATION DE LA CONTAMINATION DES PRODUCTIONS AGRICOLES EFFECTUEE EN 1997**

La contamination des végétaux en France au cours des premières semaines suivant l'accident de Tchernobyl est due principalement à l'interception, par les parties aériennes des plantes (principalement les feuilles), des aérosols contenant les substances radioactives rejetées par l'accident (notamment les césiums 134 et 137 et l'iode 131) ; il s'agit du transfert foliaire. La contamination des plantes par le transfert racinaire des radionucléides retenus dans les sols (activité rémanente dans les sols) n'est intervenue que plus tard (délai de transfert jusqu'aux horizons racinaires) et avec une efficacité beaucoup plus faible.

Ainsi, comprendre les niveaux d'activité mesurés dans les productions agricoles (végétales, mais aussi le lait via la nourriture du bétail) après l'accident de Tchernobyl revient à interpréter le processus d'interception par les feuilles des substances radioactives présentes dans l'air, en tenant compte de la dynamique de croissance des végétaux (dilution de la contamination du végétal au cours du temps par augmentation de la biomasse). Pour réaliser cette interprétation, l'IRSN dispose du modèle ASTRAL (modèle dynamique adapté au calcul de la contamination des productions agricoles et des produits des forêts à la suite d'un dépôt atmosphérique de radionucléides), développé au cours des années 1990, et utilisé notamment pour la reconstitution des dépôts correspondant aux mesures de radioactivité dans les productions agricoles (Renaud et al, 1997).

Dans cette étude, l'objectif était de reconstituer les doses moyennes reçues par la population après l'accident de Tchernobyl en interprétant les activités mesurées en 1986 par le SCPRI dans le lait et les légumes à feuilles.

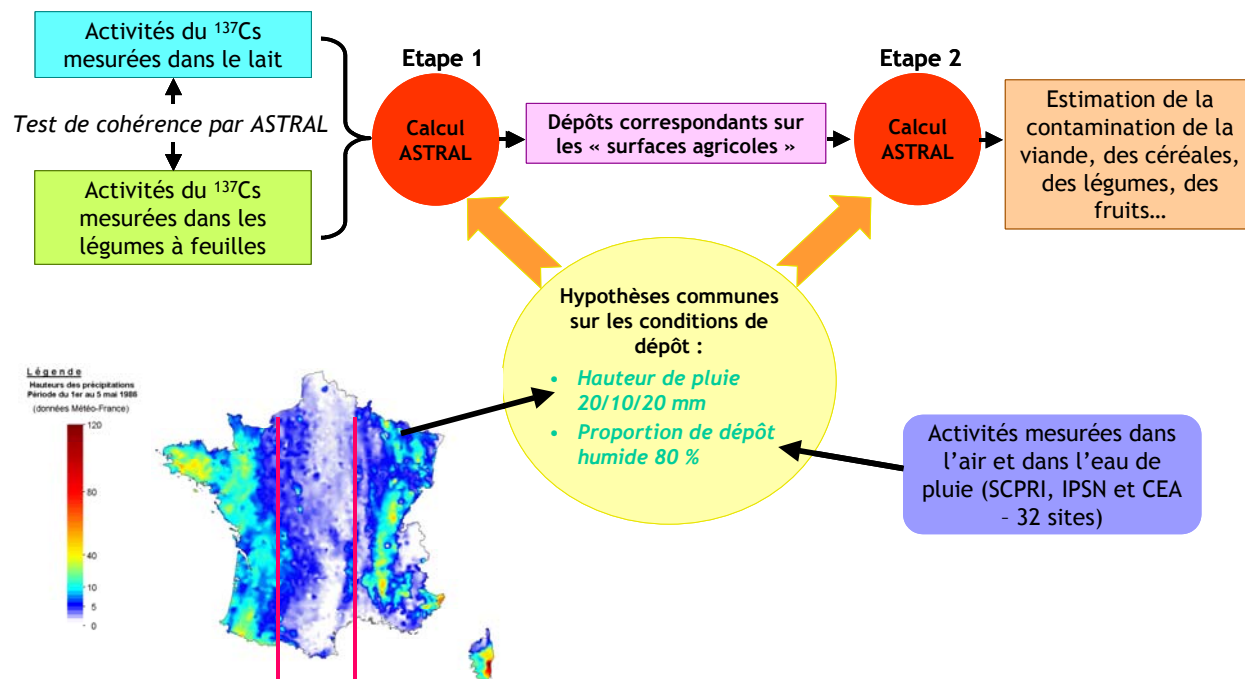
Ces mesures ne permettaient pas de reconstituer la contamination de l'ensemble de la chaîne alimentaire ; en particulier, il existait très peu de données sur la viande, les céréales et les autres légumes. De même, l'évaluation de l'exposition par irradiation externe due aux dépôts au sol nécessitait de connaître les dépôts radioactifs induits par cet accident.

Ainsi, le modèle ASTRAL a été utilisé pour combler ces manques d'information, selon deux étapes décrites dans le schéma de la figure 1 :

- 1) évaluer les dépôts atmosphériques à l'origine des activités mesurées dans le lait et les légumes à feuilles, en fixant par hypothèse les valeurs des paramètres des conditions de dépôt ;
- 2) à partir de ces dépôts reconstitués, évaluer la contamination de toutes les autres productions en utilisant les mêmes paramètres sur les conditions de dépôt.

Par ce moyen, il était possible de s'affranchir des incertitudes sur les dépôts réels, dont la distribution territoriale était mal quantifiée à l'époque.

Cette approche revenait à évaluer la contamination de l'ensemble de la chaîne alimentaire en 1986 par analogie avec les mesures les plus nombreuses disponibles : celles relatives au lait (plus de 700 mesures) et aux légumes à feuilles (une centaine de mesures).



**Figure 1 - Schéma de principe de la reconstitution de la contamination des produits végétaux et animaux consommés en 1986 après l'accident de Tchernobyl, à partir des mesures faites en 1986 sur les légumes à feuilles et le lait et l'emploi du modèle ASTRAL (Renaud et al, 1997). [ASTRAL Etape 1] : ajustement des séries de mesures d'activités dans le lait et les légumes par des courbes d'évolution calculées par le modèle, [ASTRAL Etape 2] : calcul de la contamination de l'ensemble de la chaîne alimentaire directement à partir des dépôts ainsi déterminés**

## 2.1. DESCRIPTION DE LA METHODE ET CHOIX DES PARAMETRES

Dans la première étape décrite précédemment, l'IPSN a utilisé ASTRAL en fixant les conditions initiales présumées du dépôt (typiquement l'activité totale déposée, la fraction humide de ce dépôt et la hauteur de pluie à l'origine du dépôt humide ; cf. § 4.1) susceptibles d'expliquer les niveaux de contamination du lait et des légumes à feuilles mesurés dans chaque département. L'intérêt d'ASTRAL est de prendre en compte la dynamique de dilution de l'activité initiale interceptée par le végétal en fonction de la croissance de la biomasse, ainsi que la décroissance radioactive des radionucléides à vie courte ; il est ainsi possible d'exploiter des mesures faites plusieurs jours, voire plusieurs semaines après la formation du dépôt. C'est ce qui a été fait en 1997 à l'aide des mesures de  $^{137}\text{Cs}$  et de  $^{131}\text{I}$  acquises par le SCPRI en 1986.

Le graphe de la figure 2 montre une série chronologique des mesures de  $^{137}\text{Cs}$  réalisées dans le lait de vache provenant de 7 départements de l'Est de la France. Les valeurs se répartissent autour d'une ligne de tendance découlant du modèle ASTRAL et traduisant plusieurs pratiques d'élevage successives :

- début mai 1986, le bétail est en pâture : l'évolution de l'activité du lait traduit l'évolution moyenne de l'activité de l'herbe poussant dans les départements considérés. Du fait de la croissance continue de l'herbe en période estivale, l'activité initiale du  $^{137}\text{Cs}$  déposé début mai 1986 sur les pâtures diminue fortement de mai à juillet par dilution dans la biomasse végétale. A partir d'août 1986, les mesures dépassant la limite de détection deviennent rares, voire absentes ;

- au cours de l'hiver 1986-87, le bétail est nourri par du foin récolté au printemps ou à l'automne 1986, ayant conservé l'activité en césium 137 qu'il présentait au moment de la coupe (NB : il n'en va pas de même pour l'iode 131, qui disparaît rapidement par décroissance radioactive). C'est ainsi qu'on observe une contamination mesurable dans le lait jusqu'en avril 1987 ;
- au printemps 1987, le bétail est remis en pâture où le renouvellement de l'herbe a conduit à une forte diminution de l'activité massique résultant du transfert foliaire initial (la contamination due au transfert racinaire étant par ailleurs faible). En conséquence, la contamination du lait n'est pratiquement plus détectable (seules des mesures à plus bas niveau auraient permis de déceler des traces de  $^{137}\text{Cs}$ ).

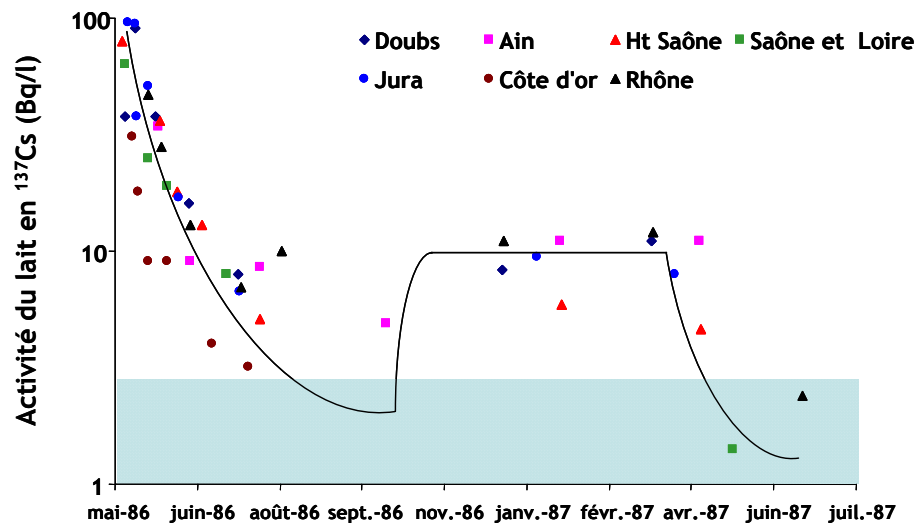


Figure 2 - Evolution de l'activité du  $^{137}\text{Cs}$  dans le lait de vache provenant de grands centres de collecte de sept départements de l'Est de la France. Le domaine en bleu définit la zone en dessous de la limite de détection dans le lait habituellement obtenue par le SCPRI ( $4 \text{ Bq.l}^{-1}$ ).

Ainsi, l'évolution de la contamination du lait peut être décrite de façon cohérente à l'aide du modèle ASTRAL. Il en va de même pour les mesures disponibles dans les légumes à feuilles.

La quantification par ASTRAL de la valeur initiale du dépôt atmosphérique pouvant correspondre aux valeurs mesurées dans le lait ou les légumes à feuilles nécessite de fixer la proportion de dépôt humide et la hauteur de pluie associée. Dans l'étude de 1997, la proportion de dépôt humide a été évaluée par l'interprétation des mesures d'activité de l'eau de pluie disponibles sur plusieurs stations du SCPRI, pour la période de début mai 1986. Il apparaît que cette proportion estimée au niveau de ces stations variait de 66 à 88%. Par la suite, l'IPSN a retenu une valeur uniforme de 80% pour l'ensemble du territoire. En ce qui concerne la hauteur de pluie à l'origine des dépôts, l'IPSN a découpé la France en 3 zones au sein desquelles la hauteur de pluie était supposée uniforme, en se fondant sur les relevés pluviométriques de Météo-France pour la période du 1<sup>er</sup> au 5 mai 1986 : une zone ouest à 20 mm (ouest d'une ligne Calais - Toulouse) ; une zone centrale à 10 mm ; une zone est à 20 mm (est d'une ligne Charleville-Mézières - Montpellier) (cf. figure 1).

A partir de ces hypothèses, l'IPSN a pu estimer la gamme de dépôt initial de  $^{137}\text{Cs}$  (ainsi que de  $^{131}\text{I}$ ) à l'origine des valeurs mesurées dans le lait et les légumes à feuilles pour des ensembles de départements présentant des niveaux analogues de contamination de ces produits. A titre d'illustration, la figure 3 montre l'ajustement obtenu pour 3 ensembles de départements représentatifs de l'est, du centre et de l'ouest de la France.



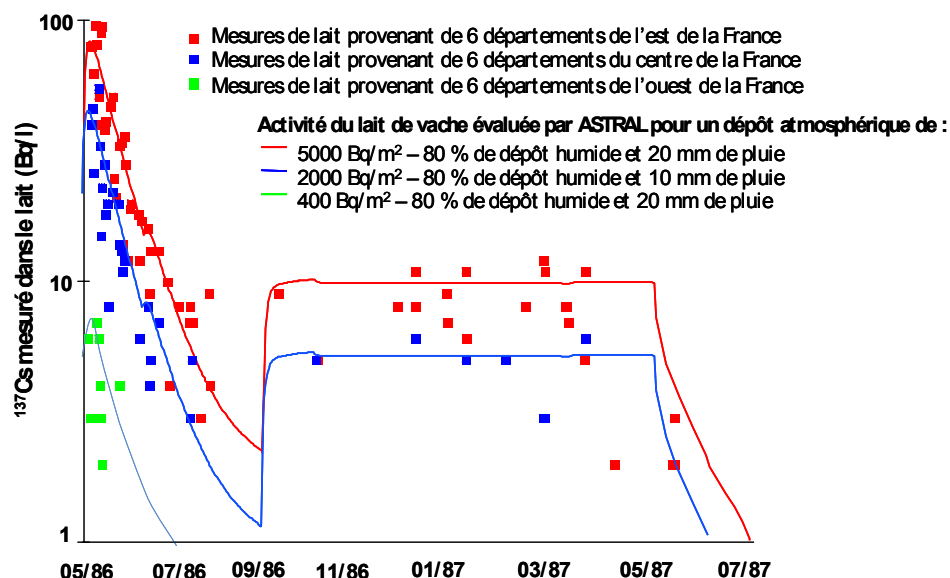


Figure 3 - Calcul à l'aide d'ASTRAL de l'activité du  $^{137}\text{Cs}$  dans le lait de vache, par ajustement du dépôt atmosphérique initial aux résultats de mesures obtenus par le SCPRI dans 3 groupes de départements représentatifs de l'est, du centre et de l'ouest de la France (cf. rapport IPSN-97-03).

## 2.2. RESULTATS OBTENUS

Cette méthode appliquée à toutes les mesures départementales disponibles a conduit à répartir les départements selon 4 classes de valeurs de dépôt moyen de césium 137 (3 pour l'iode 131), conduisant au découpage du territoire français en autant de zones (figure 4).

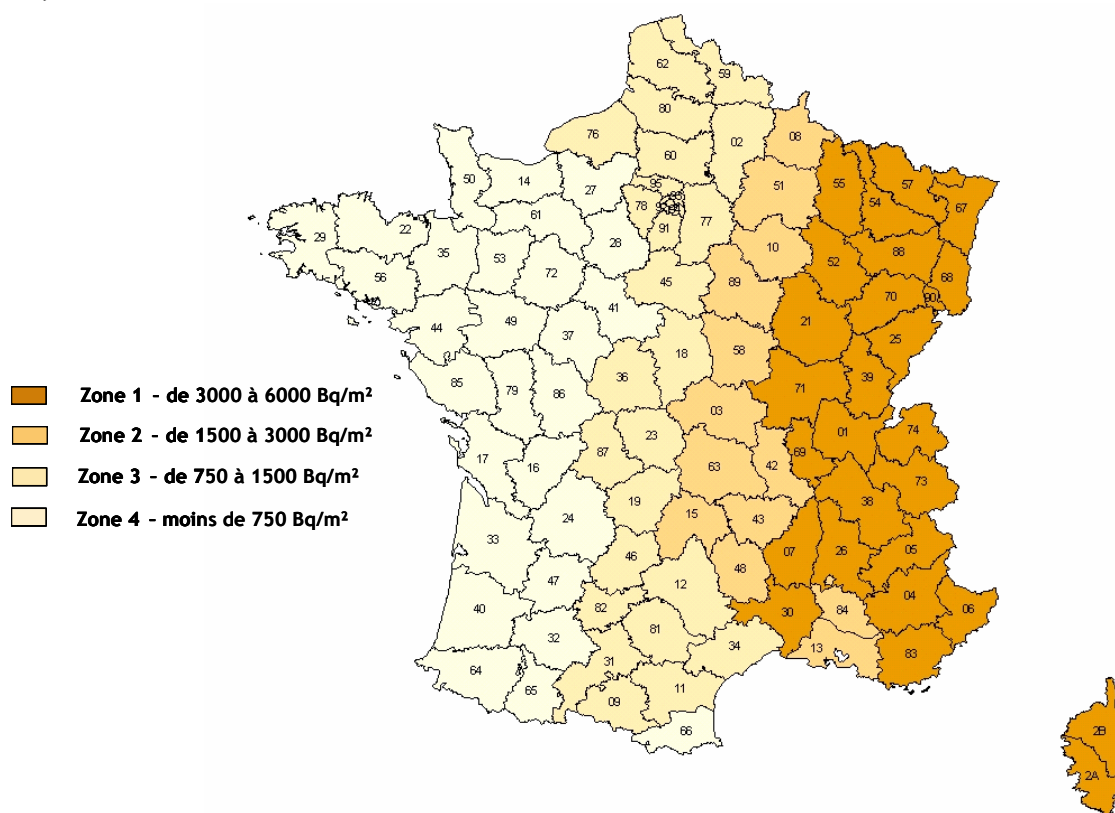


Figure 4- Carte des retombées départementales moyennes en  $^{137}\text{Cs}$  sur les surfaces agricoles, consécutives à l'accident de Tchernobyl, établie en 1997 par l'IPSN par l'interprétation des mesures dans le lait et les légumes à feuilles à l'aide du modèle ASTRAL.

Avec les mêmes hypothèses sur les conditions de dépôt (proportion de dépôt humide et hauteur de pluie), le code ASTRAL a ensuite été utilisé pour calculer la contamination moyenne en 1986 des autres produits agricoles originaires de chacune des 4 zones et pour estimer les doses reçues par les résidents de ces zones (dose efficace et dose à la thyroïde) selon les différentes voies d'atteinte (inhalation des radionucléides dans l'air, irradiation externe due aux radionucléides dans l'air et déposés au sol, contamination interne par ingestion des produits issus des différentes zones). S'agissant des doses à la thyroïde reçues par les enfants présents en 1986 dans la zone 1 (population la plus sensible du point de vue du risque de cancers thyroïdiens radioinduits), cette même approche a été utilisée dans le cadre du travail mené en 2000 avec l'Institut de Veille Sanitaire (Verger et al, 2000).

Cette approche, fournissant une estimation moyenne, conduit à masquer le contraste local des dépôts dû aux effets des surfaces boisées, de l'altitude et de la pluviosité, comme le souligne déjà le rapport IPSN 97-03 : sans pouvoir les délimiter géographiquement, ce rapport décrit l'existence de valeurs d'activité surfacique du  $^{137}\text{Cs}$  dans les sols de plusieurs dizaines de milliers de  $\text{Bq.m}^{-2}$ , dépassant parfois  $30\,000\ \text{Bq.m}^{-2}$  dans certains territoires de l'est de la France, soit 5 fois plus élevées que la limite haute ayant servi à définir la zone 1. Outre le caractère localisé de ces dépôts plus élevés, une des causes de cet écart est la valeur de la contribution du dépôt humide fixée à 80 % pour l'ensemble du territoire. En pratique, comme l'indique explicitement le rapport IPSN 97-03, ce choix conduit à sous-estimer l'activité surfacique déposée là où la proportion de dépôt humide a dépassé 80%, c'est-à-dire dans les zones sur lesquelles les pluies tombées début mai 1986 dépassaient 20 mm, et à sur-estimer le dépôt là où cette proportion était plus faible. C'est ce que va confirmer la suite de la présente étude : dans un premier temps, avec l'étude de la cohérence entre les dépôts moyens départementaux fournis par les deux approches (chapitre 3), dans un deuxième temps, par l'étude de l'influence des dépôts sec et humide sur la contamination de la chaîne alimentaire (chapitre 4). Nous verrons notamment que le dépôt humide n'a pas une grande influence sur la contamination de la chaîne alimentaire car les transferts aux végétaux sont moins efficaces par temps de pluie.

### **3. EVALUATION DES DEPOTS MOYENS DEPARTEMENTAUX A PARTIR DES MODELES 2003 ET 2005**

#### **3.1. RAPPEL SUR LES CARTOGRAPHIES DES DEPOTS DE $^{137}\text{Cs}$ ETABLIES EN 2003 ET 2005**

Suite au constat, effectué dès 1997, de l'existence d'activités dans les sols très supérieures aux activités moyennes départementales proposées, une étude sur la répartition spatiale du  $^{137}\text{Cs}$  à l'échelle de la basse vallée du Rhône a débuté en 1999, dans le cadre d'un projet de l'IRSN nommé CAROL (Renaud et al, 2004). A partir de données existantes, puis de données acquises spécifiquement en 1999-2000 dans une zone atelier couvrant quelques communes des environs de Vaison-la-Romaine, les activités mesurées dans les sols ont été corrélées aux hauteurs de précipitation enregistrées par Météo-France entre le 1<sup>er</sup> et le 5 mai 1986 (Renaud et al 2001). Après confrontation avec des mesures disponibles sur d'autres régions de l'Est de la France, la relation « pluie-dépôt » a été appliquée en 2001 pour cartographier les dépôts de  $^{137}\text{Cs}$  dans le tiers Est du pays (Renaud et al 2003). L'extension de cette relation au reste du territoire a nécessité la prise en compte de la diminution de la contamination atmosphérique d'Est en Ouest. Les données disponibles sur ce sujet étaient assez peu nombreuses et l'IRSN a retenu une loi empirique de décroissance ne dépendant que de la longitude et calée sur des mesures d'activités volumiques moyennes des aérosols entre le 1<sup>er</sup>

et le 3 mai 1986 effectuées par le SCPRI. Cette extension a abouti à une cartographie des dépôts de  $^{137}\text{Cs}$  sur l'ensemble du pays (Renaud et al 2004). Fin 2004, l'IRSN a entrepris une étude sur l'interprétation phénoménologique et analytique de la relation « pluie-dépôt » de 2003. Il s'agissait :

- de mieux prendre en compte les fluctuations dans l'espace et dans le temps de l'activité volumique du  $^{137}\text{Cs}$  dans l'air, notamment grâce aux résultats du re-mesurage par spectrométrie gamma des filtres collectés jour par jour par le SCPRI durant le passage des masses d'air contaminées ;
- d'intégrer les connaissances acquises par l'IRSN sur la rémanence des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires dans les sols français ; et ceci à partir de l'ensemble des données disponibles sur la radioactivité des sols acquises depuis 1986 et jugées exploitables dans cet objectif.

Cette étude, menée en 2005 (Renaud et al 2005), a confirmé le caractère prépondérant du phénomène de dépôt humide à la suite de l'accident de Tchernobyl, dans l'explication des activités surfaciques du  $^{137}\text{Cs}$  observées sur l'ensemble du territoire. Bien que des valeurs différentes aient été obtenues entre ce modèle analytique (et ses variantes) et la relation empirique pluie-dépôt utilisée pour la carte de 2003, l'écart entre ces valeurs n'est pas statistiquement significatif. La comparaison aux valeurs mesurées ne permet pas de discriminer les différents modèles. Ainsi, l'approche analytique adoptée en 2005 n'a pas permis d'améliorer la reconstitution des retombées de l'accident de Tchernobyl en France au regard de ce qui avait été obtenu en 2003. Elle précise cependant les limites et les incertitudes associées à ces cartographies. Ainsi, il n'est pas possible d'obtenir une estimation précise du dépôt dans les zones où les retombées de l'accident de Tchernobyl ont été de faible importance (à l'Ouest ou pour des pluies faibles). Sur les territoires où les activités surfaciques étaient plus élevées (au-dessus de  $10000 \text{ Bq.m}^{-2}$ ), l'estimation peut être considérée comme significative avec une incertitude de  $\pm 5000 \text{ Bq.m}^{-2}$  à un niveau de confiance de 80%. En l'occurrence, les cartographies obtenues en 2003 et 2005, à lire à l'échelle minimale du 1/1 000 000<sup>ième</sup>, présentent les grandes tendances de l'intensité des dépôts de mai 1986 : des dépôts beaucoup plus faibles à l'ouest qu'à l'est, assez homogènes sur les 2/3 ouest du pays ( $< 4000 \text{ Bq.m}^{-2}$ ), et avec une hétérogénéité à l'est liée à l'importance des pluies ; des dépôts qui ont atteint  $10000 \text{ Bq.m}^{-2}$  là où les pluies cumulées dépassaient 20 mm et qui ont dépassé  $20000 \text{ Bq.m}^{-2}$  sur les zones les plus arrosées (plus de 35 mm).

### **3.2. COMPARAISON DES DEPOTS MOYENS DEPARTEMENTAUX ESTIMES EN 1997 ET ISSUS DES CARTOGRAPHIES DE 2003 ET DE 2005**

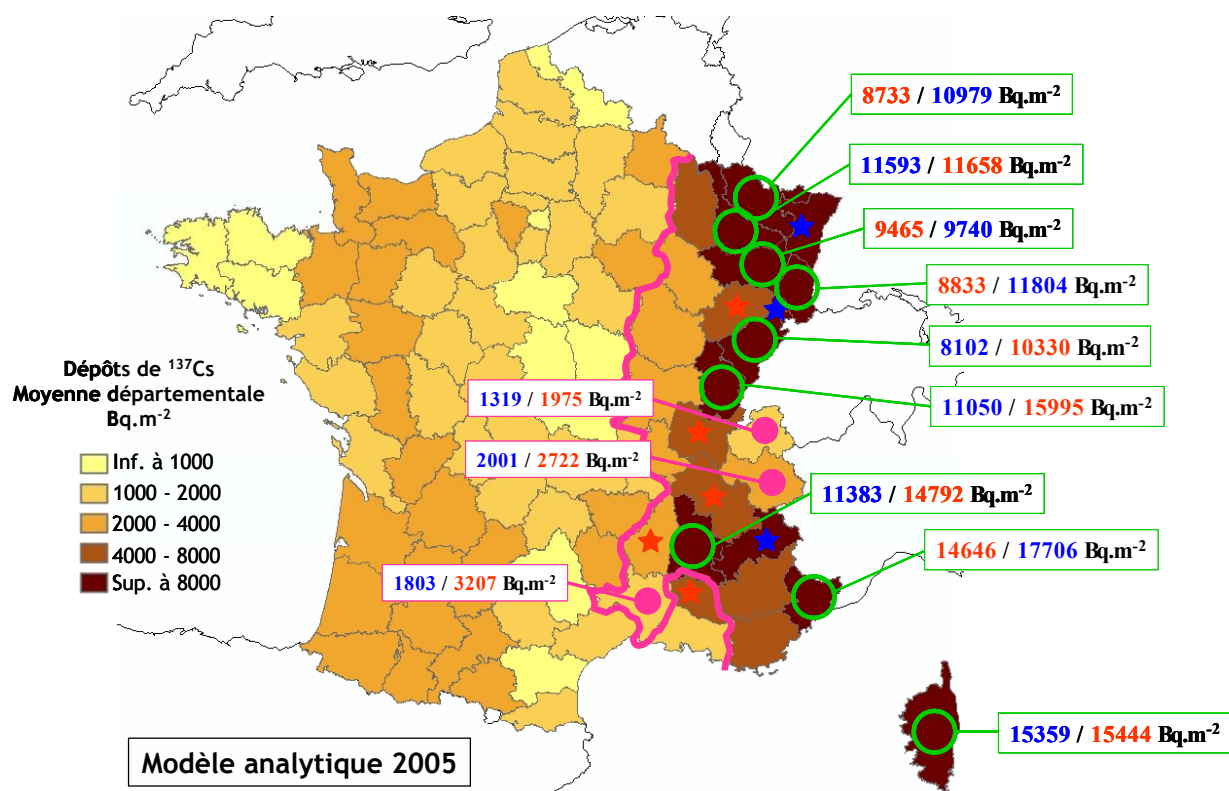
L'application des modèles pluie-dépôt de 2003 et 2005 aux 3657 stations ayant relevé les hauteurs de pluie début 1986 permet de calculer deux valeurs estimées du dépôt atmosphérique total en  $^{137}\text{Cs}$  en ces points, conduisant à environ une cinquantaine de couples de valeurs par département. Outre l'incertitude sur ces estimations (cf. discussion dans le rapport Renaud et al, 2005), il se pose également la question de la représentativité de ces valeurs à l'échelle du département, compte tenu de la variabilité à courte distance de l'intensité des précipitations et donc des dépôts humides. Ainsi, il est observé un fort contraste des dépôts estimés dans certains départements ; à titre d'exemple : en Corse, où l'amplitude des dépôts apparaît la plus importante, les dépôts estimés au niveau des stations de Météo France vont de  $1600 \text{ Bq.m}^{-2}$  (modèle 2003 : 1560 ; modèle 2005 : 1646) à environ  $70000 \text{ Bq.m}^{-2}$  (modèle 2003 : 67808 ; modèle 2005 : 71416), soit un rapport de plus de 40 ; même dans les départements où les dépôts ont été très faibles, tels que le Finistère, une amplitude de l'ordre d'un facteur 10 peut être observée (de 113

à 1435 Bq.m<sup>-2</sup>). Dans de nombreux départements, un facteur de 5 à 15 existe entre les dépôts les plus faibles et les plus élevés.

Afin de tenir compte de la représentativité territoriale de chaque station de Météo France, le dépôt moyen par département a été calculé en utilisant une méthode d'interpolation consistant à estimer des valeurs aux nœuds d'une grille régulière superposée au domaine d'étude, sur la base des valeurs ponctuelles disponibles au niveau des stations météorologiques. Compte tenu de la forte densité et de la répartition homogène de ces stations sur le territoire français métropolitain (3657 stations), l'algorithme d'interpolation utilisé est celui d'une méthode déterministe dite de « triangulation ». Cette méthode consiste à diviser le champ en triangles disjoints échantillonnés (triangulation de Delaunay), puis à interpoler à l'intérieur de chaque triangle ; un pas de 500 mètres d'interpolation a été choisi.

En raison de la forte variabilité des dépôts au sein de chaque département, les valeurs moyennes calculées selon cette approche ne sont qu'indicatives et demeurent imprécises. Toutefois, dans le cadre de cette étude, elles permettent une comparaison avec les dépôts estimés en 1997.

Ce calcul a été réalisé successivement avec les modèles 2003 et 2005. La figure 5 illustre de manière cartographique le résultat obtenu à l'aide de ce dernier modèle et identifie, pour la zone 1, les concordances et principaux écarts par rapport aux moyennes obtenues à l'aide du modèle 2003.



**Figure 5 - Carte des dépôts moyens départementaux en <sup>137</sup>Cs déduite des calculs d'activité déposée à l'aide du modèle pluie-dépôt de 2005. Dans la zone 1 (à l'est de la ligne rose), sont identifiés les 9 départements (cercles verts) où les deux modèles estiment la moyenne départementale au-dessus de 8000 Bq.m<sup>-2</sup> (les valeurs en rouge se réfèrent au modèle 2003, celles en bleu au modèle 2005). Les départements marqués d'une étoile rouge ou bleue sont ceux où seul un des deux modèles (respectivement 2003 ou 2005) conduit à une moyenne dépassant 8000 Bq.m<sup>-2</sup>. Enfin, les 3 départements indiqués par une pastille rose sont ceux où le dépôt moyen est estimé en dessous de 3000 Bq.m<sup>-2</sup> (limite basse de la zone 1 de la carte de 1997).**

Pour neuf départements, les modèles 2003 et 2005 donnent une estimation du dépôt moyen de  $^{137}\text{Cs}$  dépassant  $8000 \text{ Bq.m}^{-2}$  (Corse, Alpes-Maritimes, Jura, Drôme, Meurthe-et-Moselle, Haut-Rhin, Vosges, Moselle, Doubs).

Pour 8 autres départements, seul un des deux modèles conduit à une estimation du dépôt moyen dépassant  $8000 \text{ Bq.m}^{-2}$  : Ain ( $11665 \text{ Bq.m}^{-2}$ , Modèle 2003), Bas-Rhin ( $11120 \text{ Bq.m}^{-2}$ , Modèle 2005), Haute-Saône ( $9269 \text{ Bq.m}^{-2}$ , Modèle 2003), Vaucluse ( $8928 \text{ Bq.m}^{-2}$ , Modèle 2003), Isère ( $8831 \text{ Bq.m}^{-2}$ , Modèle 2003), Ardèche ( $8388 \text{ Bq.m}^{-2}$ , Modèle 2003), Territoire de Belfort ( $8420 \text{ Bq.m}^{-2}$ , Modèle 2005), Hautes-Alpes ( $8114 \text{ Bq.m}^{-2}$ , Modèle 2005). A l'exception du Vaucluse, ce sont tous des départements de la zone 1.

## **4. EVALUATION DES COMPOSANTES SECHES ET HUMIDES DANS LES RETOMBEES EN FRANCE DE L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL**

Les estimations de dépôts de  $^{137}\text{Cs}$  obtenues par l'IRSN en appliquant les modèles pluie-dépôt de 2003 et 2005 aux 3657 stations météorologiques ayant relevé les hauteurs de pluie au début de mai 1986 permettent de mieux cerner les composantes de ces dépôts et leur variation spatiale.

### **4.1. GENERALITES SUR LES COMPOSANTES DU DEPOT ATMOSPHERIQUE**

D'une manière générale, le dépôt d'un aérosol (dépôt atmosphérique total) est l'addition de deux composantes (voir également le rapport IRSN/DEI 2005-03) :

- le dépôt dit « sec » ( $D_s$ ), dont l'importance dépend principalement de la concentration du radionucléide dans l'air à proximité du sol, de la taille des aérosols portant le radionucléide, de la vitesse du vent et de l'état de surface (interception plus forte des polluants par le couvert forestier, effets du relief) ;
- le dépôt dit « humide » ( $D_h$ ), formé lors des précipitations pluvieuses par chargement des gouttes de pluie en radionucléides présents sur leur trajet dans l'atmosphère. À concentration atmosphérique égale, ce mécanisme provoque des dépôts beaucoup plus intenses que les dépôts secs.

Le dépôt sec d'un radionucléide est directement lié à la concentration de ce radionucléide dans l'air au niveau du sol ( $C_a$  en  $\text{Bq.m}^{-3}$ ) intégrée sur la durée ( $d$  en s) et à la vitesse de dépôt sec ( $V$  en  $\text{m.s}^{-1}$ ), selon la relation simple suivante :

$$D_s = V \times C_a \times d$$

La vitesse de dépôt sec, des aérosols de dimension micronique, dans l'environnement se situe habituellement dans la gamme de  $10^{-3}$  à  $5.10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ . La valeur estimée par l'interprétation phénoménologique et analytique de la relation pluie-dépôt applicable aux retombées de  $^{137}\text{Cs}$  consécutives à l'accident de Tchernobyl en France, bien qu'entachée d'une forte incertitude, est de  $2,8.10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$  (cf. Renaud et al, 2005). A titre d'illustration, en retenant la gamme de vitesse de dépôt, le dépôt sec de  $^{137}\text{Cs}$  correspondant à une activité volumique moyenne de l'air de  $0,5 \text{ Bq.m}^{-3}$  pendant 5 jours (valeur proche de celles observées au niveau des stations de mesure de l'Est de la France, comme le montre la figure 6) serait ainsi compris entre 200 et  $1100 \text{ Bq.m}^{-2}$  ( $600 \text{ Bq.m}^{-2}$  en utilisant la vitesse de dépôt estimée dans l'étude présentée dans le rapport Renaud et al, 2005).

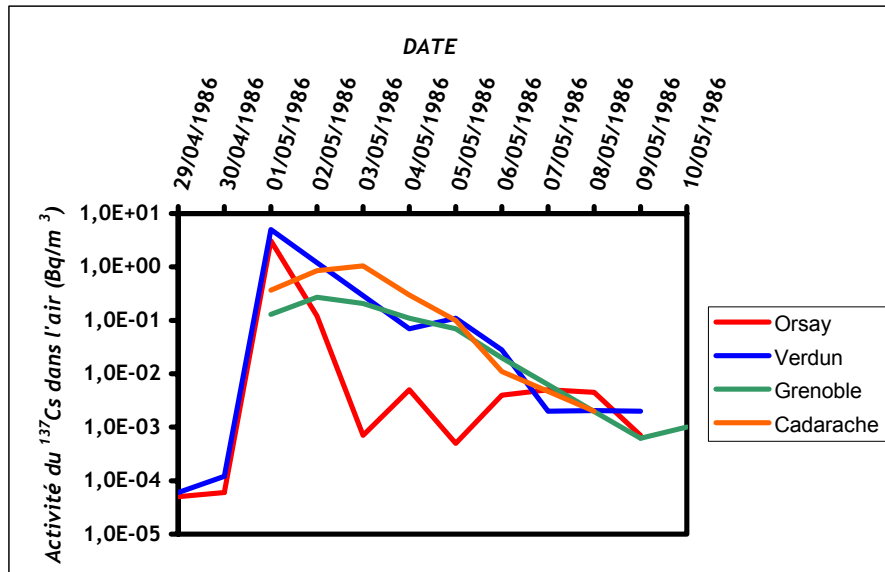


Figure 6 - Evolution de l'activité volumique du  $^{137}\text{Cs}$  dans l'air au niveau de 4 stations de prélèvement d'aérosols exploitées par le CEA en 1986 [Rapport IPSN 2/86 rev3 d'octobre 1986]

Le dépôt humide est directement lié à la quantité de précipitation ( $H_p$  en  $\text{l.m}^{-2}$  ou mm) et à l'activité volumique de l'eau de pluie ( $C_p$  en  $\text{Bq.l}^{-1}$ ), selon la relation simple suivante :

$$D_h = H_p \times C_p$$

L'activité volumique d'un radionucléide dans l'eau de pluie récoltée au niveau du sol est le résultat de la combinaison de nombreux facteurs d'interaction entre les gouttes d'eau et les aérosols sur tout le volume d'atmosphère concerné. En pratique, le lien entre l'activité de l'eau de pluie collectée sur une période donnée et l'activité moyenne de l'air sur la même période est décrit, de façon globale, par un rapport de lessivage (« wash out ratio », désigné par  $w$ ) exprimé en  $\text{m}^3.\text{l}^{-1}$  (équivalent à  $\text{Bq.l}^{-1}$  dans l'eau de pluie/ $\text{Bq.m}^{-3}$  dans l'air) (voir rapport IRSN/DEI/2005-03). Dans le détail, l'efficacité du lessivage des aérosols par la pluie peut être très variable d'un moment à l'autre ou d'un lieu à l'autre, pouvant entraîner une variation du rapport de lessivage dans une gamme large (entre 230 et 6600  $\text{m}^3.\text{l}^{-1}$  selon Garland et Playford, 1991). De son côté, l'IRSN a pu reconstituer les variations du rapport de lessivage observé pendant 22 ans au niveau de 2 stations de son réseau OPERA (figure 7).

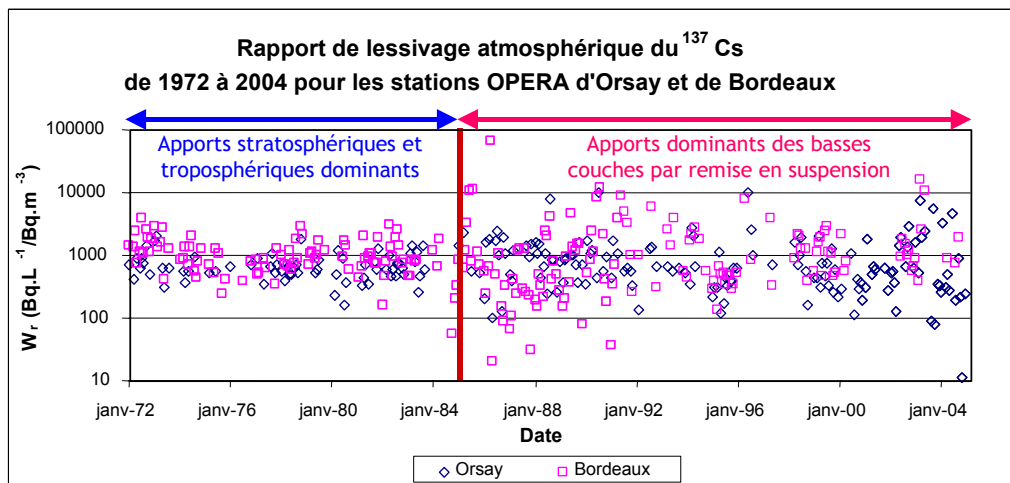


Figure 7 - Rapports de lessivage déduits des mesures d'activité de l'air et de l'eau de pluie sur les stations d'Orsay et de Bordeaux du réseau d'observatoire OPERA de l'IRSN de 1972 à 2004 (Masson et al, 2006)

Ainsi, la moyenne des 220 valeurs du rapport établi mensuellement entre les activités mesurées dans l'air et celles mesurées dans l'eau de pluie à la station OPERA d'Orsay est de  $980 \text{ m}^3 \cdot \text{l}^{-1}$ . A partir du milieu des années 80, on note une tendance à l'augmentation et à la dispersion de cette valeur, avec la diminution des activités de  $^{137}\text{Cs}$  dans l'air après le dernier essai nucléaire chinois ; sur les autres stations OPERA, les moyennes de la période 1998-2004 vont de  $1300 \text{ m}^3 \cdot \text{l}^{-1}$  à  $3800 \text{ m}^3 \cdot \text{l}^{-1}$ . A titre d'illustration, en prenant la valeur de  $w = 1000 \text{ m}^3 \cdot \text{l}^{-1}$ , l'activité du  $^{137}\text{Cs}$  dans l'eau d'une pluie traversant une atmosphère contenant  $0,5 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  de  $^{137}\text{Cs}$ , est de  $500 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ .

Lorsqu'il se produit, le dépôt humide devient rapidement plus important que le dépôt sec formé au même lieu. En effet, le rapport du dépôt humide sur le dépôt total (désigné par la suite par  $1-K$ ,  $K$  étant la proportion de dépôt sec) évolue en fonction de la hauteur de pluie selon la relation suivante, représentée dans le graphique de la figure 8 pour un épisode de dépôt durant 5 jours et avec les valeurs de  $w$  et  $V$  déduites de l'étude décrite dans le rapport IRSN/DEI/2005-03 (respectivement  $1190 \text{ m}^3 \cdot \text{l}^{-1}$  et  $2,8 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) :

$$K = \frac{1}{1 + \frac{w}{V \times d} \times H_p} \quad , d \text{ étant la durée du dépôt exprimée en s.}$$

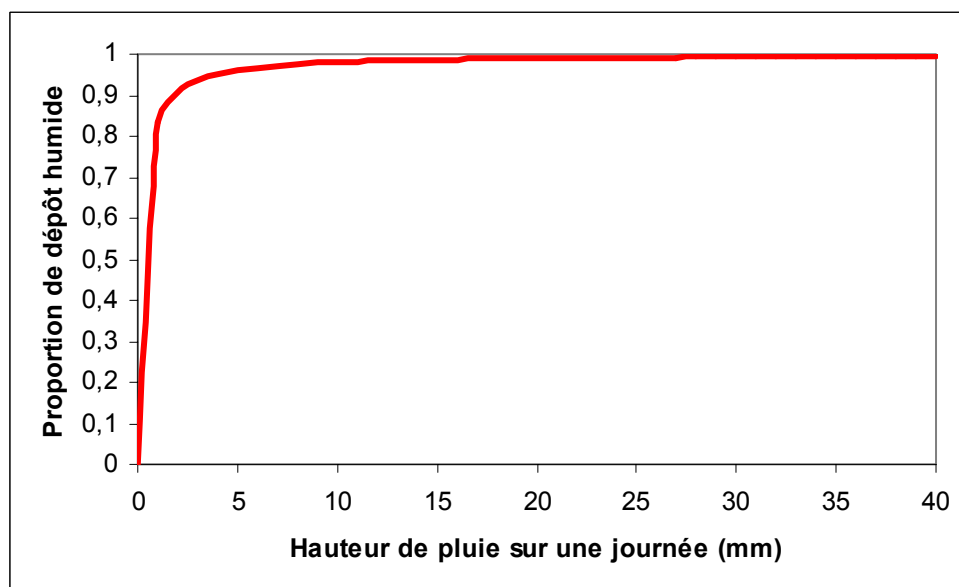


Figure 8 - Évolution de la proportion de dépôt humide dans le dépôt total ( $1-K$ ) en fonction de la hauteur de pluie à l'origine du dépôt, cumulée sur 5 jours ( $w=1190 \text{ m}^3 \cdot \text{l}^{-1}$  et  $V=2,83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Cette illustration montre que même avec une pluie d'intensité modérée, le dépôt humide devient rapidement prépondérant en termes d'activités déposées. En complément de cette observation, la figure 9 ci-après illustre comment évolue le dépôt total en fonction de la proportion de dépôt humide.

En dessous d'une valeur d'environ 70 %, le dépôt total varie peu en fonction de la proportion de dépôt humide et reste du même ordre de grandeur que le dépôt sec. Au-delà, on observe, du fait de la définition de  $K$ , une inflexion forte et une faible augmentation de la proportion de dépôt humide entraîne une forte augmentation du dépôt total. Un dépôt constitué à 90 % sous forme humide peut ainsi approcher  $10000 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ , et à 95% dépasser  $20000 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ .

Ainsi, la proportion de dépôt humide est un paramètre très sensible pour la connaissance des retombées totales.

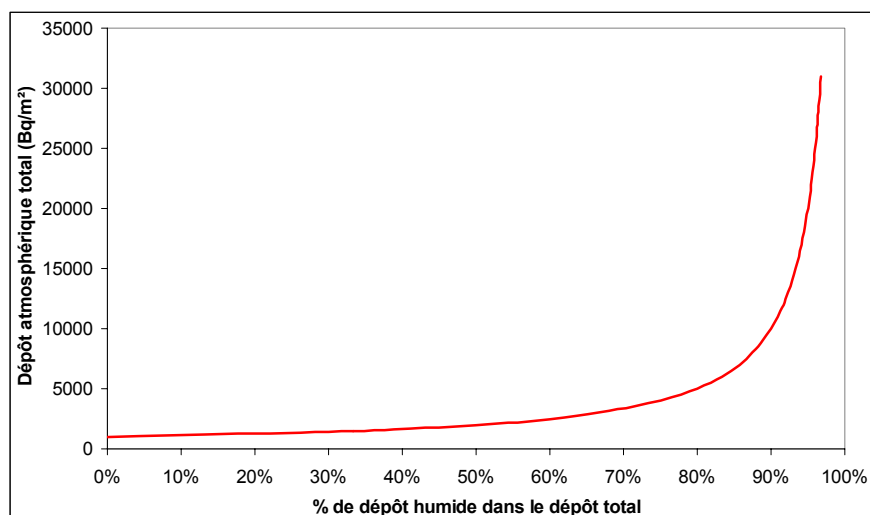


Figure 9 - Evolution du dépôt atmosphérique total en fonction de la proportion de dépôt humide (1-K), pour un dépôt sec de 1000 Bq.m<sup>2</sup>.

## 4.2. ESTIMATION DE LA PROPORTION DE DEPOT HUMIDE DANS LES RETOMBES EN FRANCE DE L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL

La reconstitution des dépôts de <sup>137</sup>Cs à l'aide d'une relation pluie-dépôt, qu'il s'agisse de la relation empirique ayant conduit à la carte de 2003 ou celle établie dans l'étude de 2005, permet d'accéder à une estimation de la proportion de dépôt humide.

### 4.2.1 METHODE DE CALCUL ET RESULTATS ASSOCIES

En désignant la proportion de dépôt humide par (1-K) (K étant le rapport [dépôt sec]/[dépôt total] tel que défini ci-dessus), ce paramètre peut être calculé en tout point *i* du territoire à partir des équations présentées dans le rapport IRSN/DEI/2005-03 pour le modèle empirique de 2003 et le modèle analytique de 2005

- Modèle 2003 : 
$$(1 - K_i) = \frac{560 \times \sum_j P_i(j)}{560 \times \sum_j P_i(j) + 1000} \quad (1)$$

- Modèle 2005 : 
$$(1 - K_i) = \frac{\alpha \times \sum_j (C_i(j) \times P_i(j))}{\alpha \times \sum_j (C_i(j) \times P_i(j)) + \beta \times \sum_j C_i(j)} \quad (2),$$

avec :

$\alpha$  : constante pour les dépôts humides, assimilable à un « washout ratio », valant 1190 m<sup>3</sup>/l ;

$\beta$  : constante pour les dépôts secs, valant 240 m ;

$C_i(j)$  : activité volumique de l'air le jour *j* au point *i* (Bq.m<sup>-3</sup>) ;

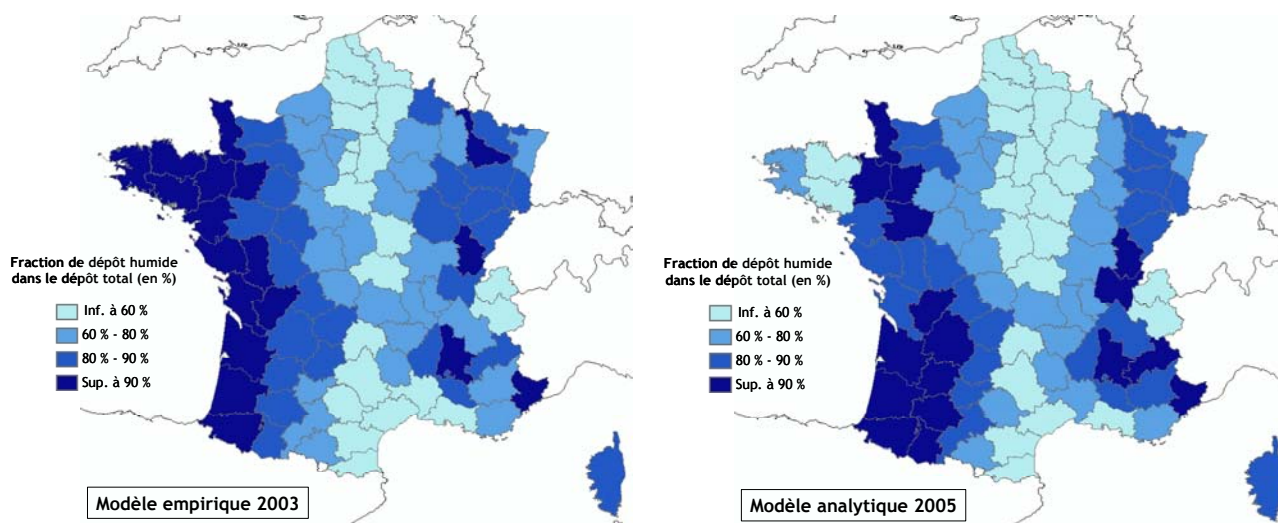
$P_i(j)$  : hauteur de pluie le jour *j* au point *i* (en mm ou en l.m<sup>-2</sup>).



L'application des relations (1) et (2) aux 3657 points du territoire où les hauteurs de pluies  $P_i(j)$  sont connues permet de déterminer deux valeurs de la proportion de dépôt humide en ces points.

Les valeurs ainsi calculées varient entre 0 % sur les communes où il n'a pas plu au cours des 5 premiers jours de mai 1986 (par exemple certaines communes de la région parisienne) à près de 99 % en Corse (Ventiseri).

En général, chaque département est caractérisé par plusieurs dizaines de stations. Selon la même méthode que celle présentée précédemment pour les dépôts moyens départementaux, il est possible de calculer la proportion moyenne de dépôt humide dans chaque département, puis de représenter ces résultats sous forme cartographique (figure 10).



**Figure 10 - Carte des moyennes départementales du rapport [dépôt humide]/[dépôt total] pour le  $^{137}\text{Cs}$  déposé après l'accident de Tchernobyl, calculé à l'aide des relations pluie-dépôt des modèles 2003 et 2005.**

Quel que soit le modèle employé, on observe un fort contraste de la proportion de dépôt humide au sein de chaque département, qui est à relier à la forte variabilité de l'intensité des pluies déjà décrite dans les travaux antérieurs (rapport IRSN/DEI/2005-03 notamment). Certains départements présentent même une variation sur la totalité de la gamme, tels que celui des Alpes-de-Haute-Provence (0 % à 98 %) ou le Bas-Rhin (0 % à 98 %). Mais dans la majorité des cas, l'écart entre les valeurs moyennes départementales de la proportion de dépôt humide calculées avec les 2 modèles est faible au regard de la variabilité départementale (de l'ordre de 10% à 20%) .

### 4.3. ANALYSE DE LA VARIABILITE DE LA PROPORTION DE DEPOT HUMIDE AU REGARD DE L'HYPOTHESE UNIFORME DE 80% RETENUE POUR L'ETUDE IPSN DE 1997

Malgré les écarts d'estimation constatés précédemment, des enseignements globaux peuvent être retirés des résultats obtenus sur la contribution relative des dépôts humides :

- quel que soit le modèle utilisé, 37 départements ont reçu des dépôts formés à plus de 80 % sous forme humide. Il s'agit de départements situés, d'une part à l'est de la France, essentiellement dans la zone 1, d'autre part à l'ouest de la France (zone 4). Pour 12 de ces départements, la proportion de dépôt humide déduite des deux modèles dépasse 90 %. Ils sont listés dans le tableau 1 ci-dessous. Pour 14 autres départements, seul un des deux modèles donne une estimation de (1-K) dépassant 90%. Pour ces départements, l'hypothèse d'une valeur uniforme de 80% pour la proportion de dépôt humide, telle que retenue dans l'étude IPSN de 1997, doit conduire à une sous-estimation significative du dépôt à l'origine de la contamination du lait et des légumes à feuilles mesurée dans ces départements, compte tenu de la perte d'efficacité de l'interception des dépôts humides par les feuilles dans de telles conditions (cf. § 5.2).

**Tableau 1 - Liste des départements pour lesquels la proportion moyenne de dépôt humide calculée avec les modèles 2003 et 2005 dépasse 90 %**

| Département          | Zone (carte fig. 9) | % moyen de dépôt humide dans le dépôt total |             |
|----------------------|---------------------|---|-------------|
|                      |                     | Modèle 2003                                 | Modèle 2005 |
| Ain                  | 1                   | 90 %  | 92 %        |
| Alpes-Maritimes      | 1                   | 91 %  | 92 %        |
| Drôme                | 1                   | 91 %  | 95 %        |
| Jura                 | 1                   | 93 %  | 92 %        |
| Gironde              | 4                   | 90 %  | 93 %        |
| Hautes-Pyrénées      | 4                   | 90 %  | 94 %        |
| Charente             | 4                   | 91 %  | 91 %        |
| Landes               | 4                   | 91 %  | 94 %        |
| Manche               | 4                   | 91 %  | 95 %        |
| Mayenne              | 4                   | 92 %  | 91 %        |
| Ille-et-Vilaine      | 4                   | 92 %  | 92 %        |
| Pyrénées-Atlantiques | 4                   | 93 %  | 95 %        |

- Pour 41 départements, la proportion de dépôt humide fournie par au moins un des deux modèles se situe dans une fourchette allant de 70 % à 85 %, c'est-à-dire des conditions pouvant être considérées comme proches de celles retenues dans l'étude IPSN de 1997. Toutefois, seuls 32 de ces départements présentent des écarts d'estimation par les deux modèles inférieurs à 10 %.
- Enfin, pour 19 départements, les deux modèles estiment la proportion de dépôt humide en dessous de 60 %. Pour 9 autres départements, la proportion est en dessous de ce seuil avec l'un des deux modèles. Ce sont des départements où les pluies ont été très faibles au début de mai 1986. Compte tenu des hypothèses retenues dans l'étude IPSN de 1997, le dépôt atmosphérique correspondant au niveau de contamination du lait et des

légumes à feuilles mesurée dans ces départements devrait être en dessous de la valeur estimée en 1997. En particulier, dans la zone 1, 3 départements (Savoie, Haute-Savoie et Gard) sont dans cette situation.

La figure 11 permet d'illustrer cette analyse de manière quantitative, en ce qui concerne la zone 1, où l'effet de la variabilité de la proportion de dépôt humide est très sensible dans l'absolu. Elle présente, pour cette zone, la distribution des valeurs moyennes des dépôts calculées à l'aide des modèles 2003 et 2005 en fonction de la proportion de dépôt humide à l'origine de ces dépôts. Deux aspects de la distribution sont à noter :

- la façon dont augmente le dépôt en fonction de la proportion de dépôt humide, selon une allure générale qui est conforme à celle décrite plus haut, dans la figure 9 ;
- la position des départements vis-à-vis des hypothèses et résultats de l'étude de l'IPSN de 1997 fondée sur les mesures dans les légumes à feuilles et le lait.

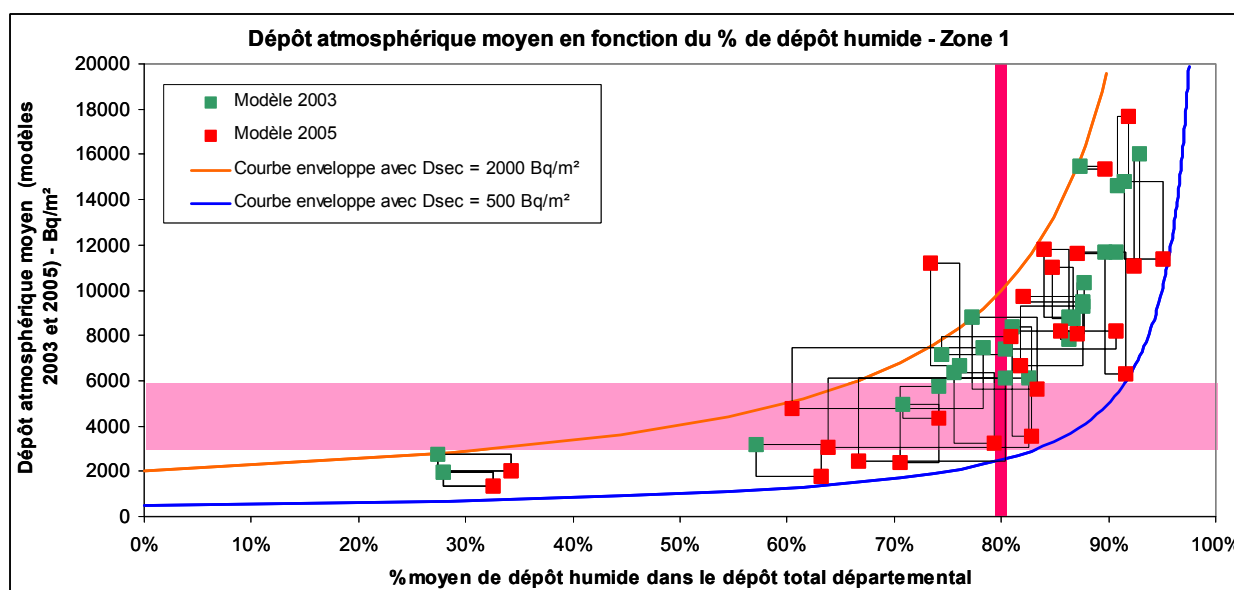


Figure 11 - Distribution des moyennes départementales des dépôts atmosphériques de <sup>137</sup>Cs en fonction de la proportion moyenne de dépôt humide, pour les 26 départements de la zone 1, déduites du calcul des retombées aux stations météorologiques présentes dans ces départements, à l'aide des modèles 2003 et 2005. Chaque rectangle décrit la gamme des valeurs déterminées pour un département avec ces deux modèles. La bande rose correspond à la gamme des dépôts (3000-6000 Bq/m<sup>2</sup>) estimée pour la zone 1 à partir de l'interprétation des mesures de <sup>137</sup>Cs dans les légumes à feuilles et le lait (Renaud et al., 1997), avec l'hypothèse d'une proportion de dépôt humide de 80% (droite rouge).

Pour les 26 départements de cette zone, l'évolution des dépôts moyens estimés par les modèles 2003 et 2005 en fonction de la proportion de dépôt humide estimée avec ces mêmes modèles est globalement cohérente et s'inscrit dans une enveloppe délimitée par deux courbes calculées avec un dépôt sec respectivement de 500 et 2000 Bq.m<sup>-2</sup>, conforme aux résultats obtenus dans la zone 1.

Les départements ayant des dépôts nettement supérieurs à 6000 Bq.m<sup>-2</sup> (limite supérieure de la zone 1) correspondent à ceux qui ont une proportion de dépôt humide dépassant 85 % ; cette observation est cohérente avec ce qui était annoncé dans l'étude de l'IPSN de 1997 et rappelé ci-dessus.

Pour les départements où la proportion de dépôt humide est proche de 80 %, les dépôts moyens estimés par au moins un des deux modèles se trouvent dans ou à proximité de la gamme 3000-6000 Bq.m<sup>-2</sup> caractéristique de la zone 1. Il y a donc une cohérence satisfaisante avec les hypothèses retenues dans l'étude de 1997.

Enfin, pour trois départements (Gard, Savoie et Haute-Savoie) où la proportion de dépôt humide est nettement inférieure à 80 %, les dépôts moyens estimés sont en dessous de la gamme caractéristique de la zone 1.

En conclusion, il apparaît qu'environ la moitié des départements aurait reçu des retombées de césium 137 selon des conditions de dépôt humide qui se rapprochent de l'hypothèse uniforme de 80 % retenue en 1997 pour l'interprétation des mesures sur des produits agricoles. Compte tenu de la variabilité de la proportion de dépôt humide et du dépôt moyen de  $^{137}\text{Cs}$ , les résultats obtenus à l'aide des modèles 2003 et 2005 peuvent être considérés comme cohérents avec ceux de 1997 sur ces départements : notamment le dépôt moyen estimé est inclus ou proche de la gamme caractéristique de la zone 1.

De l'ordre de 26 départements sont susceptibles d'avoir reçu des dépôts humides significativement plus élevés, dépassant 90 % du dépôt total ; pour ces départements, la carte établie dans l'étude IPSN de 1997, reprise en figure 4, sous-estime vraisemblablement les retombées atmosphériques de  $^{137}\text{Cs}$  consécutives à l'accident de Tchernobyl à l'origine de la contamination des productions agricoles ; il s'agit de départements des zones 1 et 4. A l'opposé, une vingtaine de départements aurait reçu moins de 60 % de dépôt sous forme humide. Sur ces départements, la carte de la figure 4 pourrait surévaluer les retombées totales, en particulier dans les 3 départements concernés de la zone 1.

En ce qui concerne les dépôts secs, à l'hypothèse simplificatrice faite en 1997 correspond une gamme de dépôts secs de 600 à 1200  $\text{Bq.m}^{-2}$  (20% d'un dépôt total de 3000 à 6000  $\text{Bq.m}^{-2}$ ), ce qui est cohérent avec la valeur uniforme de 1000  $\text{Bq.m}^{-2}$  du modèle empirique 2003 pour l'Est de la France, ainsi qu'avec la moyenne des valeurs calculées dans cette même zone avec le modèle de 2005 (724  $\text{Bq.m}^{-2}$ ).

## **5. INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES DU DEPOT ATMOSPHERIQUE SUR LA CONTAMINATION DES VEGETAUX**

### **5.1. INTERCEPTION DU DEPOT SEC PAR LES VEGETAUX**

Le dépôt sec se répartit entre le végétal et le sol, l'interception par les feuilles étant particulièrement efficace pour ce type de dépôt, jusqu'à plus de 80% du dépôt sec total.

Afin de rendre compte globalement de l'interception des radionucléides de l'air par les parties aériennes des végétaux, leur rétention sur la surface foliaire et leur translocation vers la partie consommée (notamment dans le contexte des productions agricoles), il est défini un *facteur de transfert foliaire pour dépôt sec* ( $FT_{ds}$ ), exprimé en  $\text{Bq.kg}^{-1}$  dans le végétal (produit frais) par  $\text{Bq.m}^{-2}$  de radionucléide déposé, c'est-à-dire en  $\text{m}^2.\text{kg}^{-1}$  (voir rapport IRSN/DEI/SECRE/2005-19). Ce facteur dépend principalement du radionucléide, du produit végétal et de son état de croissance au moment du dépôt (feuilles plus ou moins développées). Ainsi, l'activité massique du végétal ( $C_v$ , en  $\text{Bq.kg}^{-1}$ ) immédiatement après le dépôt est déterminée à partir de l'activité surfacique déposée sous forme sèche ( $D_s$ ) par la relation simple suivante :

$$C_v = D_s \times FT_{ds}$$

Les valeurs de ce facteur sont prédéfinies en distinguant les classes de productions agricoles, les groupes de radionucléides et, pour certaines productions, le délai entre le moment du dépôt et la récolte (traduisant l'état de développement végétatif au moment du dépôt). Pour les légumes à feuilles et l'herbe, on suppose la production

continue tout au long de l'année. Le transfert foliaire et donc la contamination sont maximaux le jour même du dépôt. La contamination décroît ensuite exponentiellement pour rendre compte notamment de la dilution du contaminant lors de la croissance du végétal dans les jours suivant le dépôt.

Pour les légumes à feuilles (salade, épinards, etc.), dont les activités de plusieurs centaines d'échantillons ont été mesurées dans l'Est de la France entre mai et juillet 1986, la valeur de  $FT_{ds}$  pour le jour du dépôt est fixée à  $0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ .

Dans le cas du lait, produit pour lequel on dispose également de nombreuses mesures de contamination après l'accident, l'activité mesurée dépend directement de l'activité ingérée quotidiennement par la vache, donc, dans le cas de vaches en pâture (ce qui fut le cas en mai 1986), de l'activité de l'herbe. Pour l'herbe, la valeur de  $FT_{ds}$  pour le jour du dépôt est fixée à  $0,8 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$  de début mai à fin octobre.

Quel que soit le végétal, le facteur de transfert foliaire pour le dépôt sec n'est pas influencé par l'intensité du dépôt ; il en résulte qu'un dépôt sec 10 fois plus important entraînera une augmentation dans la même proportion de la contamination du végétal.

## 5.2. INTERCEPTION DU DEPOT HUMIDE PAR LES VEGETAUX

De la même façon, dans le cas d'un dépôt radioactif pluvieux, le facteur de transfert foliaire humide, ( $FT_{dh}$ ), exprimé lui aussi en  $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ , détermine l'activité massique du végétal ( $C_v$ , en  $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) immédiatement après le dépôt à partir de l'activité surfacique déposée sous forme humide ( $D_h$ ) par la relation simple suivante :

$$C_v = D_h \times FT_{dh}$$

Comme pour le dépôt sec, le facteur de transfert foliaire pour dépôt humide dépend principalement du radionucléide, du produit végétal et de son état de croissance au moment du dépôt (feuilles plus ou moins développées), mais à la différence du dépôt sec, il dépend également de la hauteur de pluie tombée (autrement dit, de l'activité déposée sous forme humide). En effet, le végétal ne peut retenir qu'une faible partie de l'eau qu'il reçoit et donc des polluants radioactifs qu'elle contient : le reste ruisselle des feuilles vers le sol. Pour un végétal et un radionucléide donné, les valeurs de  $FT_{dh}$  sont toujours plus faibles que celles de  $FT_{ds}$  (cf. figure 12). Par ailleurs, l'efficacité de l'interception-rétention des polluants précipités diminue quand la hauteur d'eau augmente.

Les modèles simulant l'interception des dépôts humides par le couvert végétal prennent en compte ce phénomène, selon des lois de décroissance différentes :

- dans le cas du modèle ASTRAL actuellement utilisé à l'IRSN pour la gestion des situations post-accidentelles, les valeurs de  $FT_{dh}$  sont fixées pour des hauteurs de pluie de 0 mm (dans ce cas,  $FT_{dh} = FT_{ds}$ , soit  $0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$  pour les légumes à feuilles et  $0,8 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$  pour l'herbe), 5 mm, 10 mm et 15 mm (cf. figure 12). Lorsque la hauteur de pluie est comprise entre ces valeurs, la valeur de  $FT_{dh}$  est obtenue par interpolation linéaire. Lorsque la hauteur de pluie dépasse 15 mm, le modèle ASTRAL utilise la même valeur de  $FT_{dh}$  que pour 15 mm de pluie. Un tel choix résulte d'une approche volontairement conservatrice pour une démarche prédictive dans le cadre de l'assistance à la gestion d'une situation post-accidentelle ; elle conduit à une surestimation de la contamination des produits végétaux dans de telles conditions. En effet, pour les très fortes pluies, l'efficacité d'interception du dépôt humide par les feuilles devrait être encore plus faible ;

- dans le cas du modèle allemand ECOSYS (Müler et Pröhl, 1993), la diminution de l'efficacité du transfert foliaire humide est déterminée par une fonction continue reliant le facteur de transfert foliaire à la hauteur de précipitation :  $FT_{dh}$  varie en fonction de l'inverse de la hauteur de pluie. Cette relation traduit une saturation du végétal qui ne retient plus rien des dépôts pluvieux quand ceux-ci continuent d'augmenter au-delà de 3 mm.

La comparaison des deux modèles effectuée en 1998 a montré une concordance globalement satisfaisante malgré des modélisations différentes du transfert foliaire (Renaud et al, 1999). La figure 12 permet de comparer les facteurs de transfert foliaire humide du césium à l'herbe selon ces deux modèles.

Jusqu'à 15 mm, l'écart entre les deux modèles reste inférieur à un facteur 2. Au delà de 15 mm de pluie, l'écart entre les deux modèles devient de plus en plus important et ASTRAL, dans sa version paramétrée pour des prévisions en situation de crise accidentelle, fournit des résultats très pénalisants dans le contexte d'une reconstitution *a posteriori*, (courbe orange ASTRAL CRISE).

Ainsi, dans le cadre de l'étude menée par l'IPSN en 1997, il a été retenu une valeur plus réaliste de  $FT_{dh}$  pour une hauteur de pluie de 20 mm ( $0,065 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ , proche de celle proposée par ECOSYS ( $0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ )).

Pour la présente étude, qui s'intéresse à l'influence de différentes hypothèses de proportion du dépôt sous forme humide sur la contamination des végétaux, il convient donc de considérer soit la courbe déduite du modèle ECOSYS, soit celle déduite des paramètres fixés dans ASTRAL en les ajustant selon une fonction en  $1/H_p$  (courbe bleue, ASTRAL expertise).

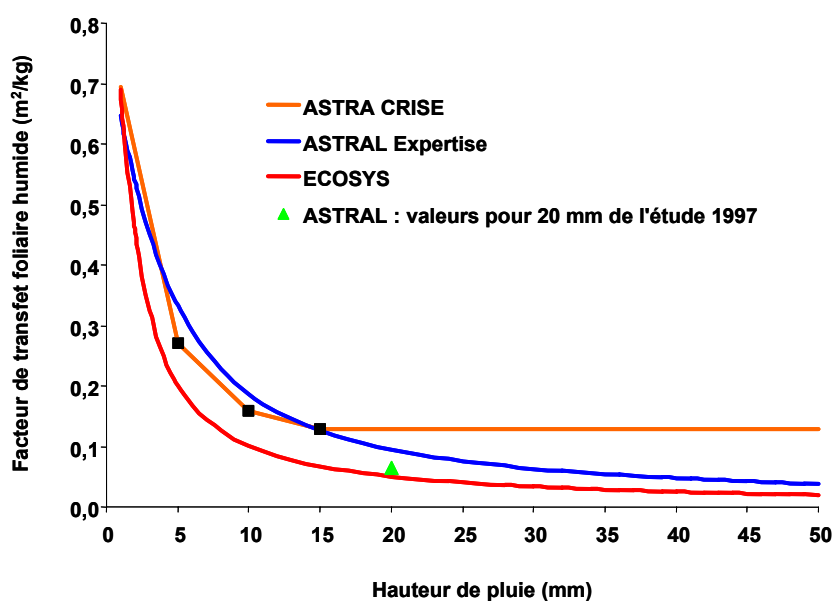


Figure 12 - Evolution du facteur de transfert foliaire humide  $FT_{dh}$  en fonction de la hauteur de pluie dans les modèles ASTRAL et ECOSYS

La figure 13 illustre l'évolution de la contamination de l'herbe ( $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$  frais) immédiatement après un dépôt, déterminée par ASTRAL avec comme hypothèses une activité de l'air de  $0,7 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  et un rapport de lessivage de  $1190 \text{ m}^3 \cdot \text{l}^{-1}$ . Cette figure montre que l'activité du végétal n'augmente effectivement plus par effet de saturation, au-delà de 15 mm, ce qui correspond à un dépôt humide de  $12500 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$  dans ce cas particulier. L'augmentation du dépôt humide au-delà de cette valeur n'ajoute donc aucune activité dans l'herbe.

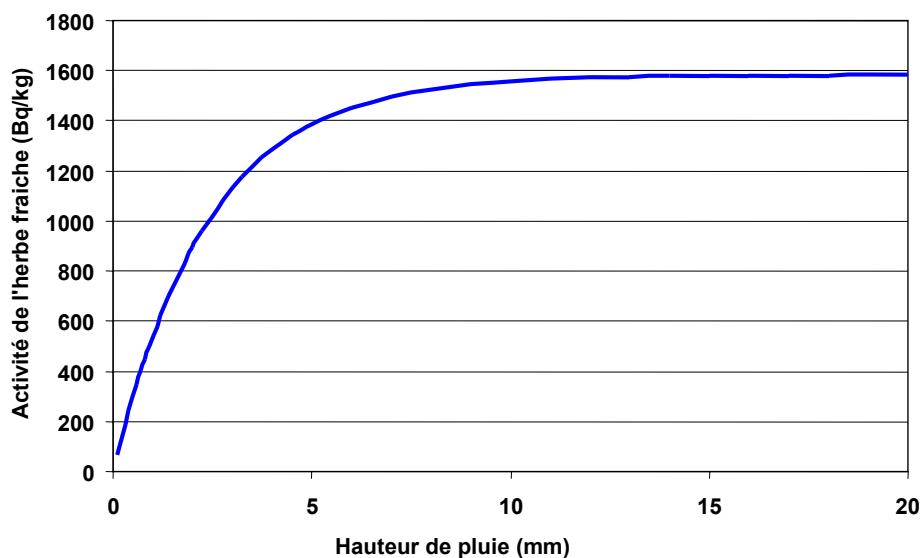


Figure 13 - Evolution de l'activité de l'herbe calculée par ASTRAL en fonction de l'augmentation de la hauteur de pluie et donc du dépôt humide pour une activité de l'air de  $0,7 \text{ Bq.m}^{-3}$  et un rapport de lessivage de  $1190 \text{ m}^3.l^{-1}$ .

### 5.3. CONTAMINATION DES VEGETAUX PAR UN DEPOT MIXTE (SEC + HUMIDE)

Du 1<sup>er</sup> au 5 mai 1986, 95 % des 3657 communes dotées de stations météorologiques ont reçu des pluies (figure 14).

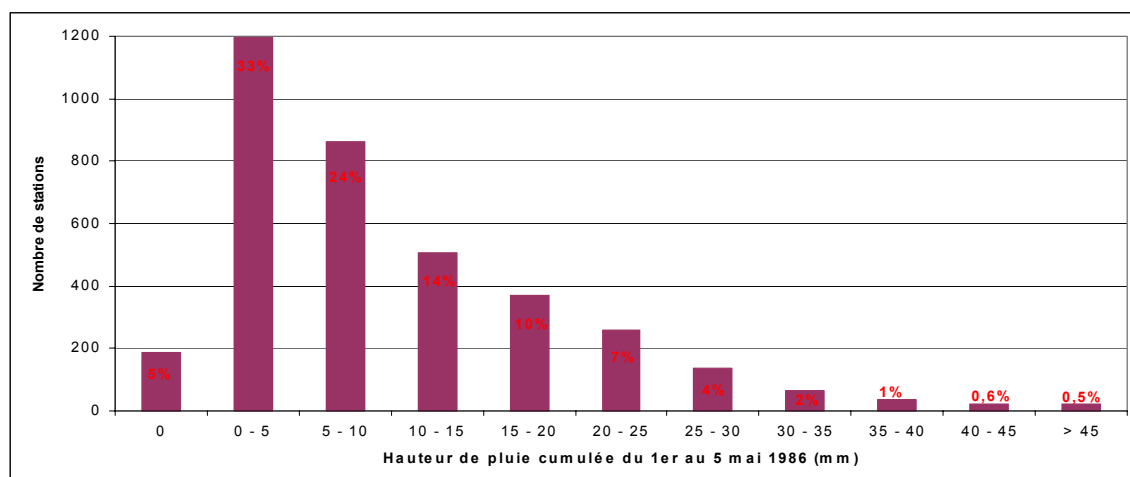
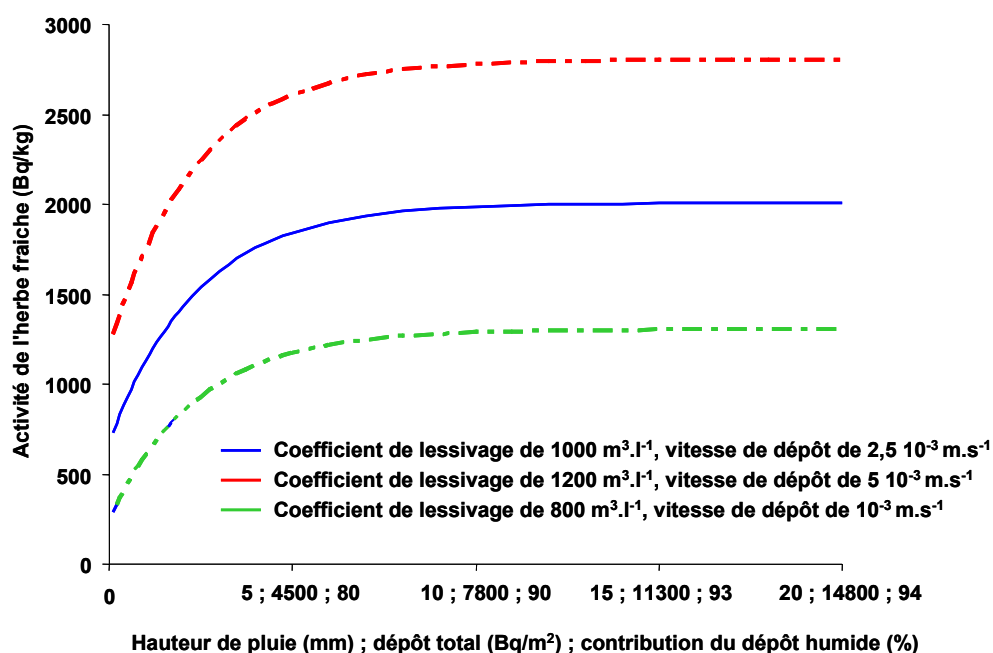


Figure 14 - Distribution des hauteurs de précipitation cumulée entre le 1<sup>er</sup> et le 5 mai 1986 sur les 3657 communes dotées d'une station météorologique

En ces points, les végétaux ont été contaminés par transfert foliaire d'un dépôt mixte, sec et pluvieux, de radionucléides, la fraction de dépôt sec dans le dépôt total paramétré par le coefficient K ayant pu varier de 1% à 100% selon l'importance des précipitations pluvieuses au cours de cette période (cf. chapitre 4). L'activité massique du végétal ( $C_v$ , en  $\text{Bq.kg}^{-1}$ ) immédiatement après le dépôt atmosphérique (DAT, en  $\text{Bq.m}^{-2}$ ) est déterminée à partir de la relation suivante combinant les deux formes de dépôt décrites précédemment :

$$C_v = DAT \times (K \times FT_{ds} + (1 - K) \times FT_{dh})$$

La figure 15 illustre l'évolution de la contamination de l'herbe ( $\text{Bq.kg}^{-1}$  frais) immédiatement après un dépôt augmentant avec les précipitations, avec comme hypothèses une activité de l'air de  $0,7 \text{ Bq.m}^{-3}$  durant 5 jours, un rapport de lessivage variant de  $800$  à  $1200 \text{ m}^3.\text{l}^{-1}$ , et une vitesse de dépôt sec variant de  $10^{-3}$  à  $5.10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ .



**Figure 15 - Evolution de l'activité massique de l'herbe fraîche immédiatement après un dépôt total mixte qui augmente avec la hauteur de pluie, pour des vitesses de dépôts variant de  $10^{-3}$  à  $5.10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$  et un coefficient de lessivage entre  $800$  à  $1200 \text{ m}^3.\text{l}^{-1}$ . Les valeurs de dépôt total et % de dépôt humide en abscisse correspondent au cas intermédiaire (courbe bleue)**

Dans la courbe intermédiaire, correspondant à des valeurs intermédiaires du coefficient de lessivage ( $1000 \text{ m}^3.\text{l}^{-1}$ ) et de la vitesse de dépôt ( $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ ), l'activité de l'herbe n'augmente plus au-delà d'une pluie de 10 mm qui engendre un dépôt humide de  $7000 \text{ Bq.m}^{-2}$  contribuant à 90% du dépôt total de  $7800 \text{ Bq.m}^{-2}$ . Les courbes en pointillés rouges et verts montrent que cette observation est générale quelles que soient les hypothèses sur le rapport de lessivage et sur la vitesse de dépôt sec : à partir d'une contribution du dépôt humide de 80 à 90%, il n'y a plus de différence significative en termes de contamination de l'herbe lorsque la composante humide du dépôt continue d'augmenter.

Dans l'exemple retenu, quelle que soit l'importance du dépôt humide, le dépôt sec contribue à hauteur de 30 à 50% de la contamination maximale de l'herbe. Entre 0,1 mm et 3 mm de hauteur de pluie, la contribution du dépôt humide à la contamination de l'herbe augmente rapidement, presque aussi vite que le dépôt humide lui-même. Entre 3 et 5 mm, elle continue d'augmenter mais beaucoup moins vite que le dépôt humide. Ainsi, pour 5 mm, le dépôt humide représente 80% du dépôt total et contribue à 63% de l'activité de l'herbe. Lorsque la hauteur de pluie dépasse 15 mm, et même pour des valeurs beaucoup plus élevées, le dépôt humide voit sa contribution à la contamination de l'herbe plafonner à 66% ( $1330 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ) ; ainsi, pour une hauteur de pluie de 45 mm, le dépôt sec (moins de 2% du dépôt total) représente encore 34% de cette contamination.

Les courbes supérieures et inférieures montrent que la variation de l'activité de l'herbe est plus sensible à la variation des paramètres de dépôt (vitesse de dépôt sec et coefficient de lessivage) qu'à l'augmentation des dépôts pluvieux.

Il est important de souligner que pour un niveau donné de contamination initiale de l'herbe résultant d'un dépôt atmosphérique (de même que pour le lait et la viande du bétail nourri par cette herbe), il existe une multitude de



caractéristiques possibles du dépôt à l'origine de cette contamination, elles-mêmes étant interdépendantes (cf. figure 8 et équation associée, fixant le lien entre proportion de dépôt humide et hauteur de pluie). Par ailleurs, la figure 15 montre que même dans le cas où la vitesse de dépôt sec et le rapport de lessivage sont connus, il n'est possible de déduire la valeur du dépôt total à partir de la contamination du végétal qu'en dessous d'une certaine hauteur de pluie ; au-delà de cette valeur, il convient de connaître également la proportion de dépôt humide (ou la hauteur de pluie) pour établir une relation bijective entre la contamination végétale et le dépôt. En 1997, afin d'établir une telle relation bijective, les caractéristiques du dépôt susceptible de correspondre à la contamination mesurée dans les productions agricoles (contribution du dépôt humide et hauteurs de pluie) ne pouvaient être fixées que de manière globale et approximative, à l'aide d'un nombre limité de données disponibles. Sur la base de ces caractéristiques figées (20mm de pluie et 80% de dépôt humide), la variabilité des activités mesurées dans le lait et les légumes à feuilles a été reliée directement à la variabilité du dépôt total. La figure 15 montre qu'en fixant des caractéristiques de dépôt différentes (en l'occurrence plus conformes à celles observées dans les différentes parties du territoire), un même niveau de contamination végétale peut résulter de toute une gamme de valeurs du dépôt total. En d'autres termes, en retenant des valeurs fixes sur les conditions du dépôt comme cela a été fait par l'IPSN en 1997, il est normal d'observer une surestimation ou une sous-estimation des dépôts correspondant aux activités mesurées dans le lait et les légumes à feuilles, sur les territoires où les caractéristiques réelles des dépôts s'écartaient significativement des conditions fixées dans l'étude (voir aussi la figure 11).

Cette influence des caractéristiques des dépôts sur la contamination de l'herbe, illustrée ici avec le césium, existe également pour l'iode. Pour cet élément, la diminution de l'efficacité de l'interception foliaire avec l'augmentation des dépôts pluvieux est encore plus rapide que pour le césium, en raison de la spécificité de cet élément. De manière générale, avec une vitesse de dépôt sec supérieure à celle du césium, la contamination foliaire des végétaux par l'iode est beaucoup plus sensible au dépôt sec qu'au dépôt humide.

## 5.4. ACTUALISATION DE L'INTERPRETATION DES MESURES SUR LES PRODUCTIONS AGRICOLES DANS L'EST DE LA FRANCE

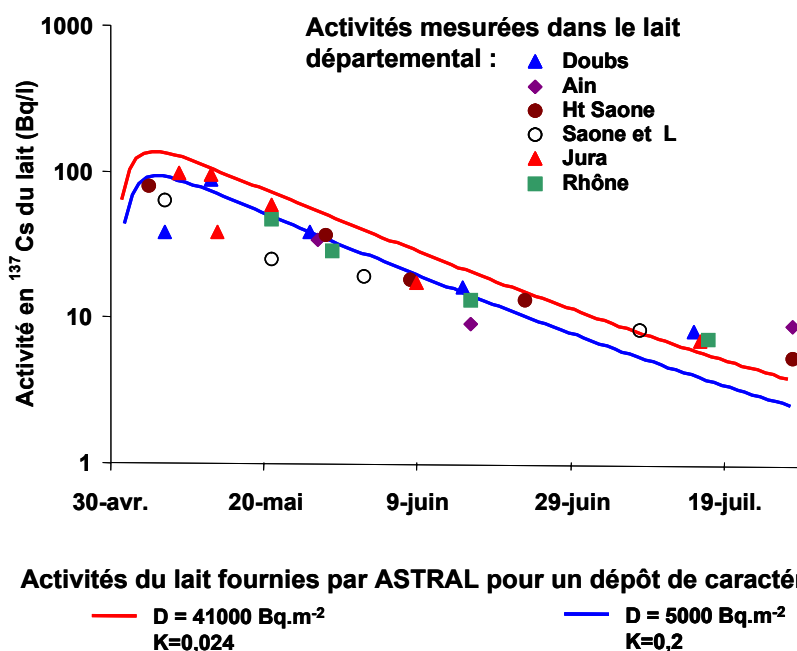
Dans les deux-tiers ouest de la France, les dépôts sont globalement faibles (quelques milliers de  $\text{Bq.m}^{-2}$ ), soit parce que la fraction de dépôt sous forme humide a été faible (bande de longitude centrale), soit en raison de l'appauvrissement des masses d'air en  $^{137}\text{Cs}$ . Le rapport IRSN 2005-03 montre que les dépôts estimés par les modèles 2003 ou 2005 sur l'Ouest sont inférieurs ou égaux aux incertitudes ( $\pm 5000 \text{ Bq.m}^{-2}$  au niveau de confiance de 80%), ce qui les rend non distinguables des estimations faites en 1997.

C'est donc dans le tiers est de la France (zone 1 et partiellement la zone 2) que les principales conclusions peuvent être tirées de la présente étude.

La principale source d'actualisation de l'interprétation des mesures de  $^{137}\text{Cs}$  dans les productions agricoles tient à la modulation de la proportion de dépôt humide dans le dépôt total, elle-même reliée à la variation des hauteurs de pluie, au lieu des hypothèses uniformes retenues lors de l'étude de 1997 (80 % de dépôt sous forme humide et 20 mm de hauteur de pluie).

Ainsi, la figure 16 illustre l'interprétation des mesures de  $^{137}\text{Cs}$  dans le lait provenant de 6 départements de la zone 1 (Est de la France), suivant une approche analogue à celle utilisée en 1997 mais en utilisant plusieurs scénarios de

dépôt qui diffèrent par les valeurs du dépôt total et de la proportion de dépôt humide, elle-même variant avec la hauteur de précipitations.



**Figure 16 - Comparaisons des activités de <sup>137</sup>Cs mesurées dans le lait de 6 départements de l'Est de la France de mai à juillet 1986 et des activités théoriques fournies par ASTRAL pour des dépôts représentatifs des caractéristiques extrêmes rencontrées en mai 1986 sur les départements concernés**

Les courbes correspondent aux évolutions théoriques du lait, fournies par ASTRAL pour deux caractéristiques de dépôt différentes : la courbe bleue correspond à des caractéristiques proches de celles retenues en 1997 pour la zone 1 (dépôt de 5000 Bq.m<sup>-2</sup> à 80% humide), la courbe rouge est représentative des valeurs de dépôt les plus élevées évaluées en France au moyen des modèles 2003 ou 2005 pour les plus fortes précipitations enregistrées par Météo-France. Conformément à ce qui a été présenté au paragraphe 5.3, les activités mesurées dans le lait peuvent aussi bien résulter d'un dépôt de 5000 Bq.m<sup>-2</sup> formé à 80% sous forme humide (hauteur de pluie cumulée de 5 mm, K=0,2), que d'un dépôt de 41000 Bq.m<sup>-2</sup> formé à 97,6% sous forme humide (hauteur de pluie cumulée de 50 mm, K=0,024) ; l'écart de l'activité du lait entre les deux courbes n'étant que de 25%.

Les mesures de lait, comme celles de légumes à feuilles, ne permettent donc pas de distinguer des dépôts d'intensité et de caractéristiques très différentes, dès lors que la proportion de dépôt humide dépasse 80 %. Pour les raisons évoquées précédemment, la fraction du dépôt humide interceptée par le végétal ne rend pas compte du dépôt total et donc ne permet pas de le quantifier. Cette approche reposant sur les mesures dans le lait et dans les végétaux ne permet donc pas de connaître la limite supérieure des dépôts sur la zone 1 puisque lorsque les dépôts humides sont associés à des fortes pluies, les transferts vers le végétal et donc vers la chaîne alimentaire n'augmentent plus (effet de saturation décrit au paragraphe 4.2). Seule l'approche par une relation pluie-dépôt, telle que développée dans les modèles IRSN de 2003 et 2005, permet d'accéder à l'estimation des fortes valeurs d'activité déposées lors des pluies et donc de reconstruire les retombées totales à l'échelle de la France entière.

Ces constats entraînent trois types de conclusion :

- sur les zones de France les plus touchées par les retombées de l'accident de Tchernobyl, les activités en iode 131, césium 137 et césium 134 du lait et des légumes à feuilles n'ont pas pu dépasser significativement au cours de l'année 1986, les activités mesurées et considérées comme représentatives des moyennes départementales dans le cadre de l'étude de 1997 ;
- les mesures de  $^{137}\text{Cs}$  réalisées en 1986 dans les productions agricoles sont globalement cohérentes avec les estimations de dépôt obtenues par la relation empirique pluie-dépôt ayant conduit à la carte de 2003 et celle de l'étude de 2005 ;
- enfin, les cartes obtenues en 1997 et 2003 diffèrent principalement par la limite supérieure des dépôts pour la zone 1 et cette différence s'explique par le choix de fixer uniformément les caractéristiques des dépôts pour l'étude de 1997, elle-même liée à une méconnaissance de la variabilité de ces caractéristiques lors de la réalisation de cette étude.
- le fait que dans certains départements, les conditions de dépôt (proportion de dépôt humide) s'écartent significativement de la valeur retenue uniformément dans l'étude de 1997 ne remet pas en cause les estimations de la contamination de l'ensemble des produits alimentaires déduites de l'application d'ASTRAL, car ces estimations reposent sur des hypothèses identiques à celles utilisées pour interpréter les mesures de contamination du lait et des légumes à feuilles obtenues en 1986, en termes de dépôt. Ces estimations sont donc conformes aux mesures dont elles découlent.

## 5.5. INCIDENCE SUR L'ESTIMATION DES DOSES

Les évaluations faites en 1997 des doses moyennes par ingestion engagées en 1986, ne sont globalement pas remises en cause par les nouvelles connaissances des dépôts apportées par les études ultérieures pour les raisons suivantes :

- les hypothèses très simplificatrices de 1997 sur les caractéristiques des dépôts sont cohérentes avec ce qu'ont montré ultérieurement les relations pluies-dépôt en ce qui concerne le transfert foliaire sec qui a contribué à une part importante de la contamination du lait et des végétaux.
- la sous-estimation de la proportion des dépôts humides dans l'étude de 1997 n'a pas eu de conséquences significatives sur la reconstitution de la contamination de la chaîne alimentaire et donc sur les évaluations des doses moyennes faites en 1997 car les dépôts humides au-delà de  $5000 \text{ Bq.m}^{-2}$  ont très peu contribué à la contamination des productions agricoles (cf. figure 15).

Au-delà des doses moyennes estimées en 1997 et concernant les populations vivant sur les zones les plus touchées du territoire, toute évaluation des doses engagées en 1986 par ingestion doit prendre en compte les remarques suivantes :

- comme cela a été montré dans le chapitre 5.4 pour le lait, les activités dans les productions agricoles résultant du transfert foliaire direct ne sont pas significativement plus élevées pour un dépôt de  $40000 \text{ Bq.m}^{-2}$  à 97,5% humide (valeur parmi les plus élevées atteintes en France) que pour un dépôt de  $5000 \text{ Bq.m}^{-2}$  à 80% humide (valeur qui a servi à l'estimation des doses moyennes).
- l'étude de 1997 faisait l'hypothèse d'une consommation alimentaire autarcique à l'échelle de la zone 1, compte tenu de son extension (1/3 est du pays). Le bien-fondé de cette hypothèse avait été vérifié par la confrontation avec les données anthroporadiométriques (Renaud et al 1998). En revanche, cette hypothèse

d'autarcie ne peut pas être admise comme vraisemblable à l'échelle d'un département, encore moins de quelques communes, sauf pour des légumes et quelques produits locaux. Il en résulte que la faible augmentation de la contamination des produits locaux ne se répercute en termes de dose que dans la proportion qu'ils représentent dans la ration alimentaire complète.

Toutes ces remarques faites sur le césium 137 valent également pour l'iode 131. En conséquence, à régime alimentaire donné, les doses efficaces et les doses à la thyroïde reçues par ingestion n'ont pu excéder significativement les valeurs estimées dans les travaux antérieurs de l'IPSN. En l'occurrence, les doses internes par ingestion les plus élevées susceptibles d'avoir été reçues en France en 1986 résultent davantage de pratiques alimentaires particulières, comme par exemple la consommation de fromage de chèvre, ou de fortes consommations de produits frais, que de dépôts importants (Vidal 2000, Renaud 2002).

En ce qui concerne les doses internes par ingestion de denrées contaminées par transfert racinaire de l'activité rémanente du sol au cours des années suivantes, contrairement à l'année 1986 où les produits alimentaires frais (légumes frais, viande de bœuf et lait frais) avaient contribué à l'essentiel des doses, les produits qui ont contribué aux doses par ingestion durant les années suivantes (1987-1996) sont ceux qui entrent dans des aliments transformés et distribués sur un large territoire (dérivés céréaliers, viandes et produits laitiers variés). L'effet autarcique est alors encore plus limité que pour l'année 1986. Donc, même si la contamination des produits alimentaires locaux du fait du transfert racinaire est proportionnelle au dépôt résiduel dans les sols, il n'en est pas de même pour les doses globalement reçues par la population vivant dans les territoires les plus touchés.

Finalement, seule l'exposition externe due au rayonnement émis par les dépôts peut être considérée comme directement liée aux dépôts radioactifs du sol. Compte tenu de la variabilité des dépôts, la dose externe due aux dépôts évaluée dans l'étude de 1997 pour la zone 1 pourrait être jusqu'à 7 fois plus élevée pour les communes les plus touchées. Toutefois, la valeur de cette dose externe estimée en 1997 était faible (environ 100  $\mu\text{Sv}$  en 1986 pour la valeur haute caractéristique de la zone 1), cette augmentation introduite par la prise en compte de la variabilité de la proportion du dépôt sous forme humide demeure dans une gamme de faibles valeurs.

De même, la variabilité du dépôt influence également la dose moyenne reçue par exposition externe due aux dépôts au cours des années 1987 et suivantes, représentant elle-même les 2/3 de la dose efficace totale reçue sur cette même période. Cependant, la dose externe due aux dépôts au cours des 10 années suivant l'année de l'accident (1987-1996) est très faible (environ 500  $\mu\text{Sv}$  dans la zone 1 selon l'étude IPSN de 1997, soit en moyenne 50  $\mu\text{Sv}/\text{an}$ ) et l'augmentation de cette dose du fait des dépôts variables est peu importante dans l'absolu.

## 6. CONCLUSION

Plusieurs enseignements peuvent être retirés de cette étude :

- l'estimation des retombées atmosphériques de  $^{137}\text{Cs}$  à l'aide d'une relation pluie-dépôt (modèles 2003 et 2005) donne une information plus contrastée sur les caractéristiques de ces dépôts, non seulement en ce qui concerne leur valeur, mais aussi la proportion déposée sous forme humide. Cette connaissance ne pouvait être obtenue par l'interprétation des mesures de contamination du lait et des légumes à feuilles effectuée en 1997 qui avait nécessité de fixer, de manière globale et uniforme, la proportion de dépôt humide à l'échelle de la France (80%). Les caractéristiques des dépôts déduites des modèles 2003 et 2005 s'écartent parfois significativement de l'hypothèse uniforme retenue dans l'étude de 1997 ;
- l'examen de la situation à l'Est de la France (zone 1) montre une bonne cohérence entre les différentes approches : sur les départements pour lesquels la proportion moyenne de dépôt sous forme humide est proche de la valeur fixée dans l'étude de 1997 (80%), les dépôts moyens départementaux déduits des modèles pluie-dépôt sont au voisinage de la gamme proposée en 1997 pour la zone 1 (3000-6000 Bq.m<sup>-2</sup>) ; sur les départements pour lesquels la proportion moyenne de dépôt sous forme humide est nettement supérieure à 80%, les dépôts moyens départementaux déduits des modèles pluie-dépôt peuvent être jusqu'à 3 fois plus élevés que la gamme définie en 1997 pour la zone 1 ; à l'inverse, sur les départements pour lesquels la proportion moyenne de dépôt sous forme humide est significativement inférieure à 80% (Gard, Savoie et Haute-Savoie), les dépôts moyens départementaux sont inférieurs à la gamme initiale attribuée à la zone 1 ;
- en ce qui concerne la contamination des végétaux résultant de ces dépôts atmosphériques, cette étude montre que : 1) même lorsque la part de dépôt humide est très importante dans le dépôt total, le dépôt sec continue de jouer un rôle très significatif dans la contamination foliaire ; 2) l'augmentation du dépôt humide au-delà d'un certain seuil n'entraîne pas d'augmentation du transfert foliaire et donc de la contamination des végétaux. Ainsi, dans les zones du territoire ayant reçu les dépôts les plus élevés, qui sont également celles où les pluies de début mai 1986 ont été les plus fortes, la contamination des productions agricoles du fait du transfert foliaire n'a pas été significativement plus élevée que dans les zones des mêmes territoires ayant reçu des dépôts plus faibles. Il est donc normal que les mesures de lait obtenues en 1986 dans l'Est de la France n'aient pas permis de révéler une quelconque influence des zones ayant reçu des dépôts de 20000 Bq.m<sup>-2</sup> de  $^{137}\text{Cs}$ , voire plus, ce qui ne signifie pas pour autant que de tels niveaux de dépôts n'aient pas pu être atteints, comme le confirment d'ailleurs les mesures faites ultérieurement dans les sols prélevés sur les zones les plus touchées ;
- il découle de ce qui précède que les doses efficaces dues à l'ingestion d'aliments produits en 1986, notamment les doses à la thyroïde (qui résultent presque exclusivement de l'ingestion de produits frais), telles qu'elles ont été estimées dans l'étude de 1997, ne sont pas remises en cause par les connaissances nouvelles apportées par la modélisation de la relation pluie-dépôt. Seules les doses dues à l'irradiation externe par le dépôt (en 1986 et dans une moindre mesure les années suivantes) ainsi que les doses reçues à partir de 1987 par ingestion de produits végétaux contaminés par le transfert racinaire du césium résiduel dans les sols, peuvent être influencées par la variation du dépôt. Toutefois, ces doses étant faibles, l'effet de cette augmentation est peu important dans l'absolu.

## 7. BIBLIOGRAPHIE

- Calmon P. et Mourlon C. Equations et paramètres du logiciel ASTRAL V2.3 (2005). Rapport DEI/SECRE 2005-19.
- Garland et Playford, 1991 Deposition and resuspension of radiocaesium after Chernobyl. Proceedings of seminar on comparative assessment of the environmental impact of radionuclides during three major nuclear accidents : Kysthym, Windscale, Chernobyl. Luxembourg, 1-5 october 1990. Vol. 1, pp 237-253. Rep. EUR 13574
- Masson O. et Saey L. Valorisation des données acquises par les stations atmosphériques du réseau d'Observatoire PERmanent de la RADIOactivité (OPERA) de l'IRSN. Rapport DEI/SESURE 2006 à paraître.
- Müller H., Pröhl G. (1993). ECOSYS-87 : a dynamic model for assessing radiological consequences of nuclear accident. Health Physics, 64, 3, 232-242
- Pourcelot L., Renaud Ph., Métivier J-M. et Louvat D. (2002). Etude des retombées de l'accident de Tchernobyl en Corse : estimation des dépôts de 1986 et état actuel de la contamination des sols. Rapport IRSN/02-21
- Renaud Ph., Stapel R., Maubert H., Bleher M & Wirth E. Comparative study of the PARK and ASTRAL post-accidental decision support softwares, *Health Physics* 76(4) : 8-12. 1999.
- Renaud Ph., Beaugelin K., Maubert H., Ledenvic Ph (1997). Conséquences radioécologiques et dosimétriques en France des retombées de l'accident de Tchernobyl. Rapport IPSN 97-03.
- Renaud Ph., Bérard Ph., Le Guen B. Conséquences pour la population française de l'ingestion de denrées contaminées à la suite de l'accident de Tchernobyl (confrontation entre les estimations dosimétriques et les mesures anthropométriques). Rapport IPSN 98-07 (1998)
- Renaud Ph., Métivier J. M et Morello M. (2001) - Modélisation de la répartition spatiale des dépôts de  $^{137}\text{Cs}$  dans les sols de la basse vallée du Rhône - Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, Rapport IPSN/DPRE/SERNAT 2001-17.
- Renaud Ph., Métivier J-M. et Louvat D. Etude des retombées de l'accident de Tchernobyl en Corse : estimation des dépôts de 1986 et état actuel de la contamination des sols. L. Pourcelot - Rapport IRSN/02-21 (mai 2002)
- Renaud Ph., Pourcelot L., Métivier J-M and Morello M. (2003) -  $^{137}\text{Cs}$  deposits and behaviour over eastern France after the Chernobyl accident, the Sciences of the Total Environment, 309, p. 257-264.
- Renaud Ph., Métivier J M, Castelier E., Pourcelot L et Louvat D (2004) - Cartographie des dépôts de  $^{137}\text{Cs}$  en mai 1986 sur l'ensemble du territoire français métropolitain, Radioprotection, 39, p. 23-38.
- Renaud Ph., Garcia-Sanchez L., Métivier JMM., Pourcelot L. et Champion D (2005). Interprétation phénoménologique et analytique de la relation pluie-dépôt utilisée pour la reconstitution cartographique des dépôts de  $^{137}\text{Cs}$  en France consécutifs à l'accident de Tchernobyl. Rapport DEI 2005-03.
- Vergier P. et Chérié-Challine L. (2000). Evaluation des conséquences sanitaires de l'accident de Tchernobyl en France : dispositif de surveillance épidémiologique, état des connaissances, évaluation des risques et perspectives. Rapport IPSN-InVS 2000-15.
- Vidal M. et Renaud Ph. (2000). Estimation des doses moyennes à la thyroïde reçues par les enfants en France en 1986 à la suite de l'accident de Tchernobyl, et analyse de sensibilité. Note technique IPSN/SEGR/SAER/ 2000-67. Novembre 2000.