

## Actualisation des connaissances relatives à la dispersion et aux dépôts des rejets atmosphériques de l'accident nucléaire sur le site de Fukushima Daiichi survenu en mars 2011

Depuis 2011, l'IRSN travaille à améliorer la compréhension de l'accident de Fukushima et de ses conséquences environnementales, en couplant l'analyse des mesures dans l'environnement avec la modélisation de la dispersion atmosphérique. Ces travaux sont en grande partie réalisés dans le cadre de collaborations internationales. Ainsi, le projet SAKURA<sup>1</sup>, collaboration bilatérale entre l'IRSN et le MRI<sup>2</sup> a permis à l'IRSN d'accéder à de nombreuses données (mesures radiologiques et météorologiques, modélisation météorologique) qui se sont avérées déterminantes. L'IRSN a également participé au groupe d'experts de l'UNSCEAR relatif à l'évaluation des niveaux d'exposition de la population dus à l'accident de Fukushima [UNSCEAR (2013)]<sup>3</sup>. Enfin, l'Institut participe à des exercices internationaux de comparaison de modèles de dispersion atmosphérique sur le cas de l'accident de Fukushima, coordonnés par le Science Council of Japan [SCJ (2014)]<sup>4</sup>.

Cinq ans après l'accident sur le site nucléaire de Fukushima Daiichi, l'IRSN fait un état des lieux de la compréhension du comportement des rejets dans l'atmosphère et des principales séquences de contamination de l'environnement terrestre. De nombreuses mesures radiologiques dans l'environnement ont permis de reconstruire en grande partie les différentes séquences de contamination, d'identifier les trajectoires probables des panaches radioactifs, et de les relier avec les événements pluvieux pour expliquer des zones de dépôt<sup>5</sup>. Néanmoins, de nombreuses incertitudes subsistent, et les mesures, seules, ne permettent pas de reconstruire de façon satisfaisante toutes les séquences de contamination.

La suite de ce document présente les différentes mesures dans l'environnement. Une deuxième partie est consacrée à la compréhension actuelle des épisodes de contamination, fournie par l'analyse croisée des données d'observation radiologiques et météorologiques. Dans une troisième partie, l'éclairage complémentaire apporté par la modélisation est présenté. Deux notes complémentaires détaillent davantage ces deux derniers aspects :

- [Note sur les épisodes de contamination](#)
- [Note sur la modélisation de la dispersion atmosphérique](#)

<sup>1</sup> Ce partenariat Hubert Curien (PHC) est financé par le ministère des Affaires étrangères.

<sup>2</sup> Le MRI est l'unité de recherche du centre de prévision météorologique japonais (JMA).

<sup>3</sup> L'UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) a mis en ligne le [rapport](#).

<sup>4</sup> Le premier exercice a donné lieu à un [rapport](#) en septembre 2014. Le second a démarré début 2016.

<sup>5</sup> On appelle « dépôt » les retombées radioactives qui ont été déposées sur le sol, les bâtiments ou les végétaux lors du passage du panache radioactif dans l'air. Lorsque le dépôt se fait sans pluie, on parle de « dépôt sec ». Lorsque les radionucléides ont été rabattus au sol par la pluie, on parle de « dépôt humide ». Ce dernier processus est en général considéré comme le plus efficace.

## Les mesures dans l'environnement

De nombreuses mesures radiologiques ont été rendues publiques, certaines dès le mois de mars 2011, d'autres très récemment. Celles-ci sont de trois types :

1. **Les mesures de débit de dose**<sup>6</sup> sont celles qui ont été accessibles le plus rapidement pendant l'accident. Les stations de mesure fixes sont assez bien réparties sur le territoire japonais (Figure 1) et donnent l'évolution temporelle de la contamination. Toutefois, le signal est difficile à interpréter car il correspond au rayonnement émis par tous les radionucléides, qu'ils soient au sol ou dans l'atmosphère, sans distinction possible. Ainsi, dans les endroits très contaminés par le dépôt, le signal reste très élevé après le passage du panache, masquant éventuellement la détection d'évènements ultérieurs. Les mesures de débit de dose ne donnent pas d'information sur la composition isotopique de la contamination.
2. **Les mesures de dépôt** au sol permettent une cartographie précise de la contamination. Elles sont issues de campagnes de mesures aéroportées<sup>7</sup> [Sanada et al. (2014)] et de prélèvements de sols [Endo et al. (2012; Saito et al. (2015))] réalisés après les principaux rejets atmosphériques. Ces mesures concernent donc essentiellement les césiums,  $^{134}\text{Cs}$  et  $^{137}\text{Cs}$ , dont le temps de demi-vie est long. Certaines études évaluent, d'après les prélèvements, les dépôts d'iodes radioactifs dont  $^{131}\text{I}$  [Kinoshita et al. (2011)], dont le temps de demi-vie est court, mais ces évaluations sont plus incertaines. De plus, la cartographie réalisée a posteriori ne permet pas de distinguer les périodes au cours desquelles les différentes zones de dépôt ont été formées.
3. **Les mesures d'activité volumique** donnent directement la concentration dans l'air d'un isotope sur une période donnée (en  $\text{Bq}/\text{m}^3$ ). Ces mesures, très précieuses pour la reconstitution de la trajectoire du panache dans l'atmosphère, étaient peu nombreuses jusque récemment, et intégrées sur de longues périodes de temps, ce qui les rendait peu exploitables. En 2015, des mesures d'activité volumique de  $^{137}\text{Cs}$  estimées à partir des filtres particuliers des stations de surveillance de la qualité de l'air au Japon ont été rendues publiques [Tsuruta et al. (2014)]. Ces mesures, nombreuses et bien réparties sur le territoire japonais, sont données par pas de temps horaire. L'accès à ces données a permis une réelle avancée dans la compréhension du déroulement des évènements. Cependant, prélevant l'air à hauteur d'homme, elles n'indiquent la présence d'un panache que si celui-ci touche le sol ; or, il peut être situé en hauteur. En présence de pluie, cela peut conduire à une contamination au sol par dépôt humide (lessivage du panache en altitude) alors que les mesures d'activité volumique sont très faibles. De plus, ces mesures peuvent être sous-estimées en cas de présence de brouillard. Enfin, la mesure des filtres étant relativement récente, aucune information sur les radionucléides à vie courte n'est disponible. La position des stations d'activité volumique est indiquée Figure 1.

---

<sup>6</sup> Le débit de dose est le rayonnement gamma émis par l'ensemble des isotopes radioactifs, en un point, par unité de temps. Son unité est le Gy/h.

<sup>7</sup> Les résultats des campagnes sont [répertoriés sur le site de la NRA](#) (Nuclear Regulation Agency).

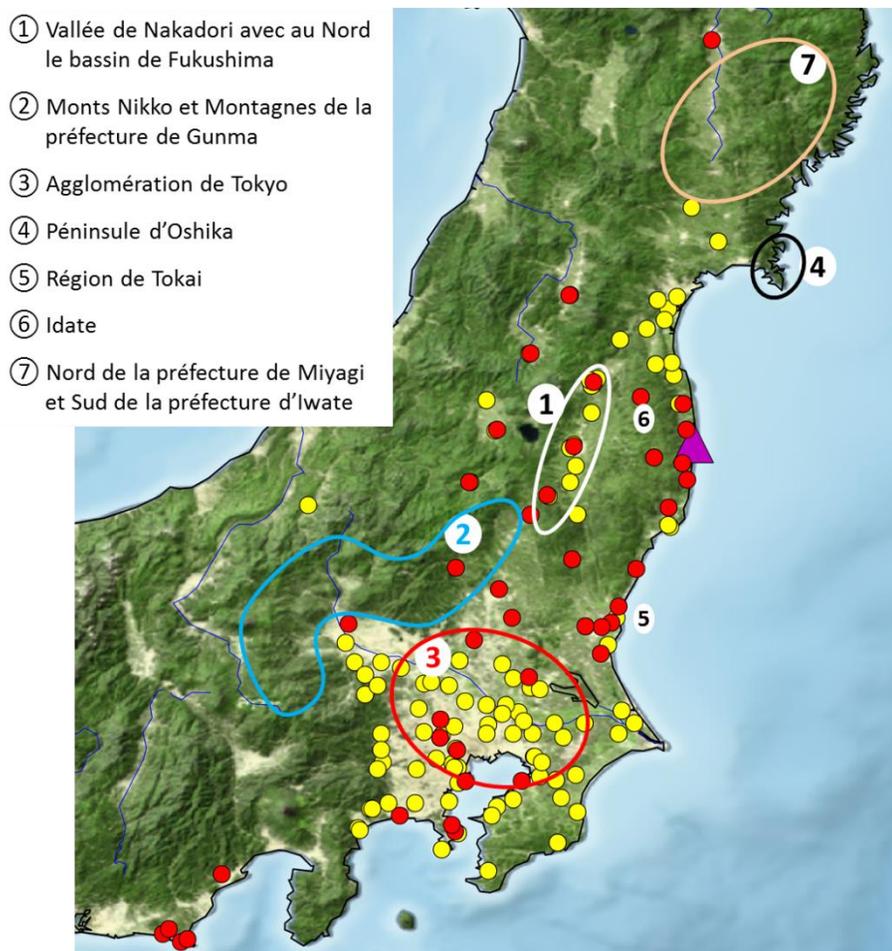


Figure 1 : Les positions des balises de débit de dose (rouge) et d'activité volumique (jaune) sont représentées sur la carte du relief du Japon. Les régions d'importances évoquées dans le texte sont également positionnées sur la carte.

En ce qui concerne les observations météorologiques, l'IRSN a eu accès, dans le cadre du projet SAKURA, aux données du réseau de mesures AMEDAS<sup>8</sup> de JMA. Celles-ci comprennent :

- des observations de vent (vitesse et direction) à 10 mètres (environ 1200 stations),
- des observations de pluie données par des pluviomètres. Celles-ci donnent la quantité de pluie en mm/h par pas discret de 0,5 mm/h. Les pluies fines (inférieures à 0,5 mm/h) ne sont donc pas mesurées. Toutefois, certains pluviomètres plus sophistiqués indiquent l'occurrence de faible pluie sans donner la quantité ;
- des observations de température, humidité, visibilité, hauteur de neige, qui ont pu être utilisées par exemple pour déterminer la présence éventuelle de neige ou de brouillard. Cette information est importante pour estimer les dépôts.

En sus des données AMEDAS, des observations de pluie faites par des radars<sup>9</sup> (corrigés par les pluviomètres) ont été utilisées. Celles-ci donnent une information spatiale à une résolution très fine (1 kilomètre), mais ne permettent pas non plus d'identifier les pluies fines.

<sup>8</sup> Automated Meteorological Data Acquisition System (<http://www.jma.go.jp/en/amedas/>)

<sup>9</sup> <http://www.jma.go.jp/en/radnowc/>

## La contamination de l'île d'Honshu

Les rejets majeurs dans l'atmosphère se sont déroulés sur trois semaines entre le 11 mars et le 31 mars 2011. Au cours de cette période, une partie du territoire japonais a été contaminée. Plusieurs études basées sur la modélisation estiment qu'environ 80% des rejets atmosphériques ont été déposés sur l'océan Pacifique et approximativement 15-20% sur Honshu, la principale île du Japon [Morino et al. (2011), Morino et al. (2013), Yasunari et al. (2011)]. Les évaluations de l'IRSN corroborent ces estimations [Korsakissok et al. (2013) ; Groëll et al. (2014)]. Les observations indiquent que la surface du Japon contaminée à plus de 185 kBq/m<sup>2</sup> de <sup>137</sup>Cs<sup>10</sup> couvre environ 1700 km<sup>2</sup> [Steinhauser et al. (2014)] et la zone contaminée à plus de 10 kBq/m<sup>2</sup> couvre environ 24 000 km<sup>2</sup> [Champion et al. (2013)]

En 2012, l'IRSN présentait une description des principaux événements de rejets dans l'atmosphère et de leur devenir [IRSN (2012)]. À la lumière des nouvelles mesures mises à sa disposition, notamment dans le cadre du projet SAKURA, l'Institut a ré-analysé les différentes séquences.

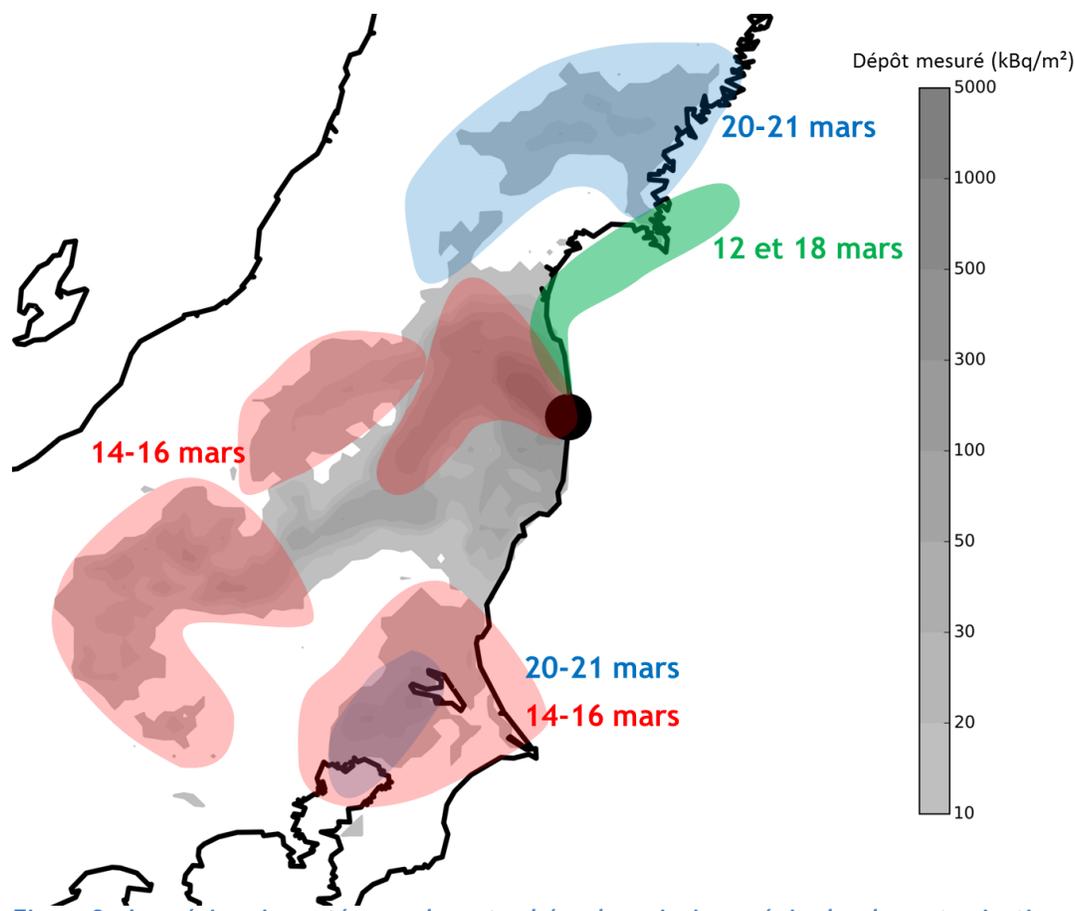


Figure 2 : Les régions impactées par les retombées des principaux épisodes de contamination sont indiquées en couleurs et superposées à la carte des dépôts de <sup>137</sup>Cs mesurés. Les épisodes des 12 et 18 mars sont en vert, l'épisode du 14-16 mars est en rose et celui du 20-21 mars en bleu.

La contamination terrestre du territoire japonais s'est faite essentiellement au cours de quatre plages temporelles : celle du 12 mars, celle du 14-16 mars, celle du 18 mars et celle du 20-21 mars (Figure 2).

<sup>10</sup> La valeur de 185 kBq/m<sup>2</sup> correspond à 5 Ci/km<sup>2</sup>, valeur seuil qui définissait les zones évacuées suite à l'accident de Tchernobyl. Après Tchernobyl, la surface contaminée à plus de 185 kBq/m<sup>2</sup> de <sup>137</sup>Cs était d'environ 29400 km<sup>2</sup>.

[Les épisodes des 12 et 18 mars](#) n'ont pas conduit à des dépôts importants (Figure 2), mais les mesures d'activité volumiques aux stations H, I, et J montrent qu'ils sont significatifs du point de vue de l'exposition des populations aux panaches radioactifs dans la région située au nord de la centrale, le long de la côte de la préfecture de Fukushima (Figure 3). Plus loin au nord, la péninsule d'Oshika (zone 4 Figure 1) montre des dépôts de  $^{137}\text{Cs}$  qui se sont formés durant ces épisodes. Il s'agit de dépôts secs.

[L'épisode du 14 au 16 mars](#) constitue l'évènement le plus étudié de la séquence accidentelle car il est responsable des principaux dépôts sur l'île de Honshu. Au cours de cet évènement, les vents ont tourné progressivement, poussant la contamination vers le Sud-Ouest, l'Ouest, le Nord-Ouest puis vers le Sud, le long de la côte. À partir du 15 mars à 6h<sup>11</sup>, les panaches présents dans la vallée de Nakadori (zone 1 Figure 1, stations A à G) ainsi qu'entre la centrale et le bassin de Fukushima (station A) ont été lessivés, engendrant la majeure partie des dépôts observés dans ces zones. L'analyse des observations tend à rejeter l'hypothèse de dépôt par le brouillard dans la vallée de Nakadori, longtemps évoquée par plusieurs équipes japonaises. Les dépôts les plus significatifs se seraient produits au tout début des précipitations, au moment où ces dernières étaient par endroits trop faibles pour être mesurées. L'analyse des observations semble suggérer qu'une part significative de l'activité dans l'air était localisée en altitude, sans doute en raison du relief des régions traversées. La Figure 3 montre que la part d'activité mesurée dans l'air du 14 au 16 mars dans le bassin de Fukushima (station A) est plus faible que pour l'épisode du 20-21 mars. Pourtant, les dépôts se sont essentiellement formés le 15 mars. Plus au sud, le dépôt sur le flanc des Monts Nikko et sur les montagnes de la préfecture de Gunma (zone 2 Figure 1), est probablement intervenu au cours de cet épisode. Les mesures sont trop partielles pour étudier cette séquence de contamination mais l'hypothèse d'un dépôt engendré par un brouillard créé localement ou nuages pris dans la montagne est très probable [Kaneyasu et al. (2012) ; Hososhima et Kaneyasu (2015)].

[L'épisode du 20 au 21 mars](#) est le principal épisode de contamination des territoires de la plaine du Kantô, de la région de Tokai et de la zone entre le Nord de la préfecture de Miyagi et le Sud de la préfecture de Iwate.

Du 20 au 21 mars, plusieurs panaches ont été détectés au Nord Nord-Ouest de la centrale (zone des stations J, I, H et au-delà), ainsi que dans la vallée de Nakadori (stations A à G) et dans l'agglomération de Tokyo. Des vents faibles ont favorisé leur stagnation, ce qui a conduit, en cumulé, à une activité volumique en  $^{137}\text{Cs}$ , sur la période du 20 au 21 mars, élevée. En se basant sur la contamination des sols et les débits de dose, l'évènement du 14 au 16 mars était jusqu'à présent considéré comme l'épisode ayant conduit à une des plus fortes expositions de la population du bassin de Fukushima, de la vallée de Nakadori et de l'agglomération de Tokyo. Les mesures d'activité volumique en  $^{137}\text{Cs}$  remettent en cause cette idée en indiquant une exposition non négligeable au panache lors de l'épisode du 20-21 mars (Figure 3). Toutefois, des mesures par radionucléide indiquent que la proportion d'iodes, de tellures et de gaz rares contenus dans le panache était plus faible à ces dates qu'au cours des épisodes précédents. Or, ce sont ces éléments (notamment les iodes et les tellures) qui sont les plus déterminants pour l'impact sanitaire lors du passage du panache.

---

<sup>11</sup> Tous les horaires sont donnés en temps universel (UTC). Il faut ajouter 9h pour l'heure locale japonaise.

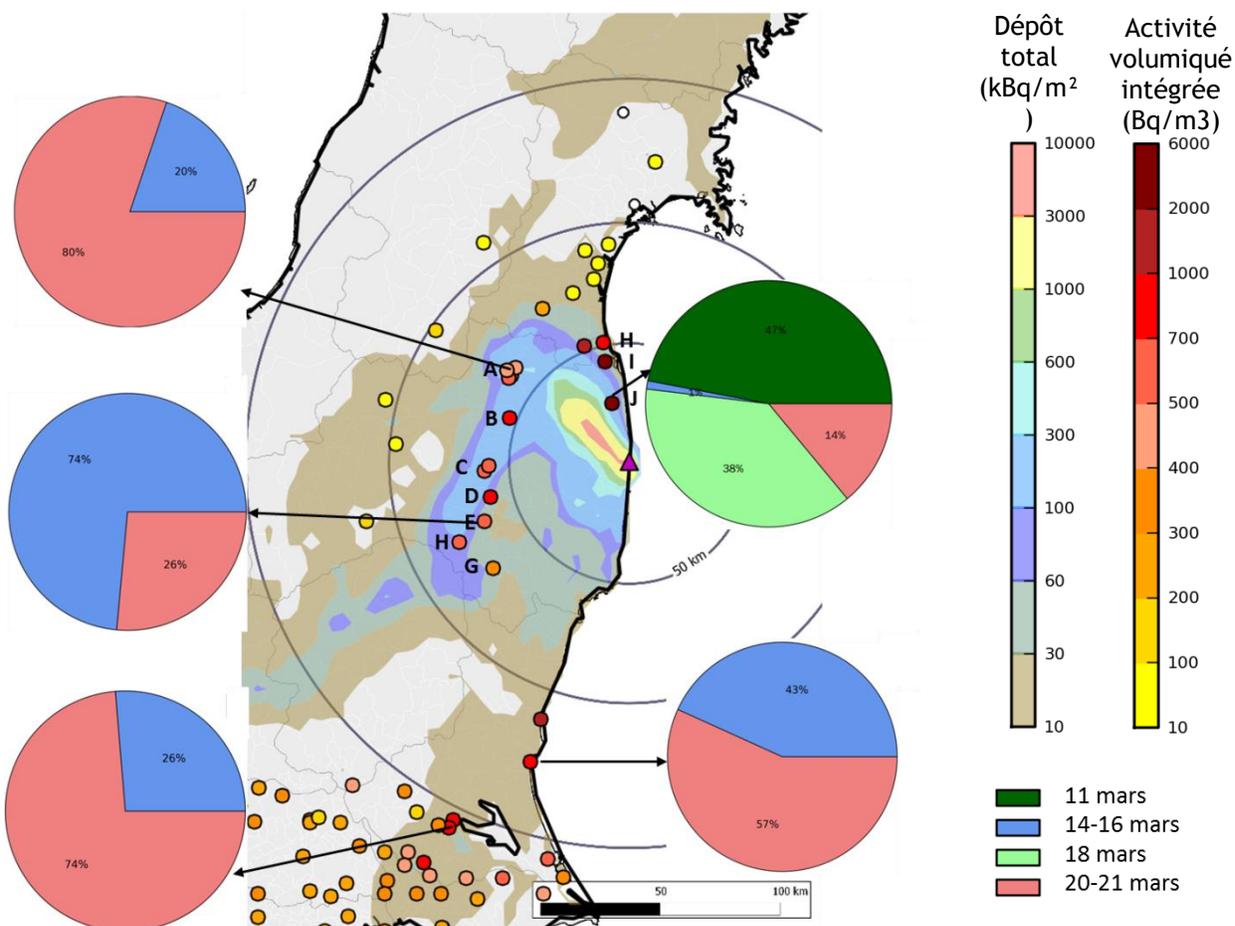


Figure 3 : Les points colorés représentent les valeurs aux stations des activités volumiques de  $^{137}\text{Cs}$  intégrées entre le 11 mars et le 24 mars. Elles sont superposées à la carte de dépôt de  $^{137}\text{Cs}$  total. Les camemberts donnent la répartition des activités volumiques observées pour chacune des périodes principales de contamination.

En résumé, l'analyse conjointe des mesures radiologiques dans l'environnement et des observations météorologiques a permis de préciser la trajectoire des panaches dans l'atmosphère et les périodes de lessivage par la pluie conduisant aux principaux épisodes de contamination des sols. L'analyse des activités volumiques a révélé des zones ayant subi une contamination atmosphérique importante en  $^{137}\text{Cs}$  alors que les dépôts mesurés y sont faibles, et que les débits de dose ne montrent pas de hausse significative (Figure 3).

L'analyse des mesures a mis en lumière les principales difficultés qui limitent la compréhension des événements.

- L'orographie complexe (influence de la côte et des reliefs) joue un rôle crucial dans la trajectoire empruntée par le panache, mais aussi dans son élévation verticale. Elle influence également la répartition des dépôts. Lorsque le panache se trouve en altitude, aucune mesure ne permet de le détecter (les stations sont au sol). Or, plusieurs panaches ont probablement été transportés par des vents en altitude, pour être ensuite lessivés par la pluie et former des taches de contamination qui ne peuvent s'expliquer autrement.
- Le dépôt ne peut s'expliquer de façon satisfaisante en ne tenant compte que des observations de pluie (pluviomètres ou radars). En effet, les pluies fines (inférieures à 0,5 mm/h) ne sont pas mesurées. L'analyse des mesures indique que la principale contamination des sols, le 15-16

mars, est liée à un lessivage du panache débutant plus tôt que les premières observations de pluie, en conséquence par des pluies fines.

- Aucune mesure ne permet d'accéder à la composition isotopique des panaches et des dépôts. Des mesures d'<sup>129</sup>I commencent à être publiées et permettent d'en déduire le contenu en <sup>131</sup>I [Muramatsu et al. (2015)].

## Modélisation du transport et des retombées

Depuis 2011, la communauté internationale de modélisation de la dispersion atmosphérique travaille à simuler aussi précisément que possible les conséquences environnementales de l'accident de Fukushima. La motivation est double. Le premier objectif est, bien sûr, de parvenir à une meilleure compréhension de l'accident. La deuxième consiste à améliorer les modèles de dispersion et la représentation des processus physiques. L'IRSN étend ce second objectif aux outils opérationnels d'évaluation de conséquences radiologiques qu'il développe. Cet objectif répond au souci d'améliorer la pertinence de l'expertise de l'Institut, en cas d'accident nucléaire.

### ***Premier objectif : simuler précisément et mieux comprendre l'accident***

Assez rapidement après l'accident, les principaux événements de rejet étaient identifiés et leurs conséquences grossièrement évaluées. Depuis, la compréhension des différents épisodes a été grandement améliorée, les processus responsables des dépôts ont été précisés et les simulations ont gagné en réalisme. Les progrès les plus significatifs résultent des efforts qui ont porté sur l'amélioration des principales données d'entrée des modèles de dispersion. Il s'agit des conditions météorologiques et de la quantification des rejets à l'atmosphère.

Les [conditions météorologiques](#) sont fournies par les modèles de prévision. Elles déterminent le transport du panache radioactif dans l'atmosphère. Les précipitations sont responsables de la contamination des sols due au lessivage du panache. Un décalage spatial ou temporel dans les prévisions, tel qu'un retard de quelques heures sur le changement de direction du vent, ou sur le déclenchement des précipitations, peut fortement pénaliser la reproduction de certains épisodes de contamination. Après l'accident, les simulations étaient faites en utilisant des prévisions météorologiques à résolution trop lâche comme le relevait, dès 2012, l'IRSN [Mathieu et al. (2012), Korsakissok et al. (2013)]. Des prévisions à plus fines résolution [WMO (2011), Sekiyama et al. (2015)] ont donc été produites, permettant d'améliorer significativement les simulations de l'accident de Fukushima. L'IRSN a eu accès à plusieurs sources de prévisions, en particulier dans le cadre de sa participation aux travaux de l'UNSCEAR et au projet SAKURA. Les observations des précipitations par radar ont également été utilisées dans les simulations, en remplacement des précipitations prévues par les modèles.

Le [terme source](#), c'est-à-dire l'évolution temporelle du débit de chaque radionucléide rejeté dans l'atmosphère, est l'autre donnée d'entrée essentielle des modèles de dispersion atmosphérique. Actuellement, il n'y a pas de terme source détaillé estimé uniquement grâce à la modélisation de l'évolution de l'état des réacteurs. Ceux qui existent ont tous été évalués sur la base de méthodes qui utilisent les mesures dans l'environnement et les simulations de dispersion atmosphérique. Plusieurs termes sources ont été publiés. Les premiers étaient relativement approximatifs. Ils ont depuis été largement affinés. Néanmoins, il n'y a pas de consensus sur un terme source jugé plus réaliste que les autres. La contribution de l'IRSN sur l'évaluation détaillée des rejets de l'accident est significative et originale [Winiarek et al. (2012) ; Saunier et al. (2013) ; Winiarek et al. (2014)]. L'IRSN a été la

première équipe à développer une méthode automatique de reconstruction du terme source à partir de mesures de débits de dose dans l'environnement.

Les termes source détaillés et les prévisions météorologiques à fines échelles permettent de simuler le transport et les retombées des panaches avec réalisme. La comparaison aux observations a été significativement améliorée. Néanmoins, certains épisodes demeurent difficiles à simuler. Par exemple, les simulations de la séquence du 14 au 16 mars ne parviennent toujours pas à reproduire les différents événements de dépôt. Cet état de fait dénote des incertitudes qui persistent ainsi que la complexité de la situation rencontrée. Ces difficultés orientent les axes de progrès à privilégier pour améliorer les modèles de dispersion.

### ***Deuxième objectif : améliorer les modèles de dispersion et les outils de gestion de crise***

L'axe d'amélioration des modèles de dispersion atmosphérique privilégié par la communauté travaillant sur l'accident de Fukushima concerne la [représentation des processus de dépôt](#). En effet, du point de vue de l'exposition des populations, la modélisation du dépôt est un enjeu majeur tant par les doses induites par le dépôt que par l'appauvrissement du panache qu'il engendre. Les études menées, et en particulier celle de l'IRSN [Quérel et al. (2016)], montrent que les incertitudes qui persistent sur les données d'entrée dans le cas Fukushima restent encore trop importantes pour pouvoir étudier les processus de dépôt. Leur modélisation précise n'apporte donc pas, à ce stade, de réelle plus-value pour améliorer le réalisme des simulations. Les sujets de la répartition verticale des panaches et du dépôt au moment des pluies fines apparaissent comme des préalables avant d'envisager une meilleure simulation de la contamination des sols. La poursuite de l'analyse de l'accident du point de vue des mesures dans l'environnement et les inter-comparaisons de modèles comme celles organisées par le SCJ sont deux moyens à disposition de la communauté pour continuer à progresser sur ces sujets et améliorer la simulation de l'accident.

Au-delà du travail sur les modèles de dispersion, la modélisation de l'accident de Fukushima a démontré l'intérêt de disposer d'outils opérationnels pour estimer des termes sources détaillés à partir des mesures dans l'environnement. L'IRSN a été assez novateur sur ce sujet. Désormais, toutes les équipes à vocation opérationnelle cherchent à se doter d'un tel outil (projet européen PREPARE, les équipes de PHE et du Met Office<sup>12</sup> pour l'Angleterre, le ZAMG<sup>13</sup> pour l'Autriche).

Le grand enseignement de l'accident de Fukushima concerne les incertitudes liées aux données météorologiques et aux rejets. Celles-ci sont inévitables et l'enjeu majeur pour la communauté de modélisation des conséquences est de parvenir à les prendre en compte dans la gestion d'une situation accidentelle. Évaluer leur impact sur les simulations et les modéliser pour une prise de décision plus pertinente vis-à-vis du risque d'exposition constitue un défi important. Depuis 2011, l'IRSN a engagé un projet concernant cette thématique [Girard et al. (2014) ; Girard et al. (2015)]. À l'échelle européenne, d'autres équipes s'engagent également sur cette voie [Sørensen et al. (2015)].

---

<sup>12</sup> PHE est le Public Health England et le MetOffice est le centre météorologique anglais.

<sup>13</sup> Le ZAMG est le Central Institute for Meteorology and Geodynamics.

- Champion, D., Korsakissok, I., Didier, D., Mathieu, A., Quélo, D., Groell, J., Quentric, E., Tombette, M., Benoit, J.-P., Saunier, O., Parache, V., Simon-Cornu, M., Gonze, M. A., Renaud, P., Cessac, B., Navarro, E. et Servant-Perrier, A.-C. (2013). "The IRSN's earliest assessments of the Fukushima accident's consequences for the terrestrial environment in Japan." Radioprotection **48**(01): 11-37.
- Endo, S., Kimura, S., Takatsuji, T., Nanasawa, K., Imanaka, T. et Shizuma, K. (2012). "Measurement of soil contamination by radionuclides due to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident and associated estimated cumulative external dose estimation." Journal of Environmental Radioactivity **111**: 18-27.
- Girard, S., Korsakissok, I. et Mallet, V. (2014). "Screening sensitivity analysis of a radionuclides atmospheric dispersion model applied to the Fukushima disaster." Atmospheric Environment **95**(0): 490-500.
- Girard, S., Korsakissok, I., Mallet, V. et Mathieu, A. (2015). "Emulation and Sobol' sensitivity analysis of an atmospheric dispersion model applied to the Fukushima nuclear accident." Journal of Geophysical Research **accepté pour publication**.
- Groëll, J., Quélo, D. et Mathieu, A. (2014). "Sensitivity analysis of the modelled deposition of <sup>137</sup>Cs on the Japanese land following the Fukushima accident." Int. J. of Environment and Pollution **55**(1/2/3/4): 67-75.
- Hososhima, M. et Kaneyasu, N. (2015). "Altitude-Dependent Distribution of Ambient Gamma Dose Rates in a Mountainous Area of Japan Caused by the Fukushima Nuclear Accident." Environmental Science & Technology **49**(6): 3341-3348.
- IRSN (2012). Fukushima, one year later: initial analyses of the accident and its consequences. IRSN. Rapport n° **IRSN/DG/2012-003**.
- Kaneyasu, N., Ohashi, H., Suzuki, F., Okuda, T. et Ikemori, F. (2012). "Sulfate Aerosol as a Potential Transport Medium of Radiocesium from the Fukushima Nuclear Accident." Environmental Science & Technology **46**(11): 5720-5726.
- Kinoshita, N., Sueki, K., Sasa, K., Kitagawa, J.-i., Ikarashi, S., Nishimura, T., Wong, Y.-S., Satou, Y., Handa, K., Takahashi, T., Sato, M. et Yamagata, T. (2011). "Assessment of individual radionuclide distributions from the Fukushima nuclear accident covering central-east Japan." Proceedings of the National Academy of Sciences.
- Korsakissok, I., Mathieu, A. et Didier, D. (2013). "Atmospheric dispersion and ground deposition induced by the Fukushima Nuclear power plant accident : a local-scale simulation and sensitivity study." Atmospheric Environment **70**: 267-279.
- Mathieu, A., Korsakissok, I., Quélo, D., Groëll, J., Tombette, M., Didier, D., Quentric, E., Saunier, O., Benoit, J.-P. et Isnard, O. (2012). "Atmospheric dispersion and deposition of radionuclides from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident." Elements **8**: 195-200.
- Morino, Y., Ohara, T. et Nishizawa, M. (2011). "Atmospheric behavior, deposition, and budget of radioactive materials from the Fukushima Daiichi nuclear power plant in March 2011." Geophysical Research Letters **38**: L00G11.
- Morino, Y., Ohara, T., Watanabe, M., Hayashi, S. et Nishizawa, M. (2013). "Episode Analysis of Deposition of Radiocesium from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident." Environmental Science & Technology **47**(5): 2314-2322.
- Muramatsu, Y., Matsuzaki, H., Toyama, C. et Ohno, T. (2015). "Analysis of <sup>129</sup>I in the soils of Fukushima Prefecture: preliminary reconstruction of <sup>131</sup>I deposition related to the accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (FDNPP)." Journal of Environmental Radioactivity **139**: 344-350.
- Quérel, A., Roustan, Y., Quélo, D. et Benoit, J.-P. (2016). "Hints to discriminate the choice of wet deposition models applied to an accidental radioactive release." Int. J. of Environment and Pollution **Accepté pour publication**.
- Saito, K., Tanihata, I., Fujiwara, M., Saito, T., Shimoura, S., Otsuka, T., Onda, Y., Hoshi, M., Ikeuchi, Y., Takahashi, F., Kinouchi, N., Saegusa, J., Seki, A., Takemiya, H. et Shibata, T. (2015). "Detailed deposition density maps constructed by large-scale soil sampling for gamma-ray emitting radioactive nuclides from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident." Journal of Environmental Radioactivity **139**: 308-319.

- Sanada, Y., Sugita, T., Nishizawa, Y., Kondo, A. et Torii, T. (2014). "The aerial radiation monitoring in Japan after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident." Progress in Nuclear Science and Technology 4: 76-80.
- Saunier, O., Mathieu, A., Didier, D., Tombette, M., Quélo, D., Winiarek, V. et Bocquet, M. (2013). "An inverse modeling method to assess the source term of the Fukushima Nuclear Power Plant accident using gamma dose rate observations." Atmos. Chem. Phys. 13(22): 11403-11421.
- SCJ (2014). A review of the model comparison of transportation and deposition of radioactive materials released to the environment as a result of the Tokyo Electric Power Company's Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. Science Council of Japan. Rapport.
- Sekiyama, T. T., Kunii, M., Kajino, M. et Shimbori, T. (2015). "Horizontal Resolution Dependence of Atmospheric Simulations of the Fukushima Nuclear Accident Using 15-km, 3-km, and 500-m Grid Models." Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II 93(1): 49-64.
- Sørensen, J. H., Amstrup, B., Feddersen, H., Korsholm, U. S., Bartnicki, J., Klein, H., Simonsen, M., Lauritzen, B., Hoe, S. C., Israelson, C. et Lindgren, J. (2015). Fukushima Accident: UNCertainty of Atmospheric dispersion modelling (FAUNA). Nordic Nuclear Safety Research. Rapport n° **NKS-339 (ISBN 978-87-7893-421-5)**.
- Steinhauser, G., Brandl, A. et Johnson, T. E. (2014). "Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts." Science of The Total Environment 470-471: 800-817.
- Tsuruta, H., Oura, Y., Ebihara, M., Ohara, T. et Nakajima, T. (2014). "First retrieval of hourly atmospheric radionuclides just after the Fukushima accident by analyzing filter-tapes of operational air pollution monitoring stations." Sci. Rep. 4.
- UNSCEAR (2013). Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly. Scientific Annex A: Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami. UNSCEAR. Rapport.
- Winiarek, V., Bocquet, M., Duhanyan, N., Roustan, Y., Saunier, O. et Mathieu, A. (2014). "Estimation of the caesium-137 source term from the Fukushima Daiichi nuclear power plant using a consistent joint assimilation of air concentration and deposition observations." Atmospheric Environment 82(0): 268-279.
- Winiarek, V., Bocquet, M., Saunier, O. et Mathieu, A. (2012). "Estimation of errors in the inverse modeling of accidental release of atmospheric pollutant: Application to the reconstruction of the cesium-137 and iodine-131 source terms from the Fukushima Daiichi power plant." J. Geophys. Res. 117(D5): D05122.
- WMO (2011). Meeting of the WMO task team on meteorological analyses for Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. World Meteorological Organization Rapport n° **TT-MA-NPP-Accident Report**.
- Yasunari, T. J., Stohl, A., Hayano, R. S., Burkhart, J. F., Eckhardt, S. et Yasunari, T. (2011). "Cesium-137 deposition and contamination of Japanese soils due to the Fukushima nuclear accident." Proceedings of the National Academy of Sciences.