

Modélisation du transport atmosphérique et des retombées des rejets émis lors de l'accident de Fukushima Daiichi

En 2012, l'IRSN faisait un premier état des lieux de la modélisation du transport atmosphérique et des retombées des rejets émis lors de l'accident nucléaire de Fukushima-Daiichi [IRSN (2012)]. Le réalisme des simulations souffrait de la difficulté à reproduire plusieurs épisodes de transport de ces rejets et la cause des écarts constatés entre résultats de modélisation et mesures était recherchée. Depuis, les travaux de la communauté internationale de modélisation de la dispersion atmosphérique ont porté sur la réduction des incertitudes, celles relatives aux données d'entrée des modèles de transport atmosphérique et celles relatives aux modèles eux-mêmes. Ce travail se poursuit encore aujourd'hui.

Les conditions météorologiques et la quantification des rejets atmosphériques constituent les principales données d'entrée des modèles de transport atmosphérique. Les progrès les plus significatifs découlent des efforts portés sur l'amélioration de ces données.

Les conditions météorologiques

Les conditions météorologiques (vents, stabilité de l'atmosphère, ...) déterminent le transport du panache radioactif dans l'atmosphère. Les précipitations sont responsables de la contamination des sols due au lessivage du panache. Ces données sont fournies par les modèles de prévisions météorologiques.

Une des particularités de l'accident de Fukushima concerne la géographie des lieux. L'accident s'est déroulé sur la côte Pacifique dans un environnement à orographie complexe, avec des reliefs marqués à seulement quelques kilomètres à l'intérieur des terres. Cette configuration pénalise fortement la qualité des prévisions météorologiques. Par ailleurs, l'accident fait suite au tremblement de terre et au tsunami qui ont détruit une partie des infrastructures rendant indisponibles nombre d'observations météorologiques. Or, celles-ci sont utilisées pour contraindre les modèles. Les conditions d'exploitation des modèles météorologiques sont en conséquence dégradées par rapport à leur fonctionnement nominal.

Dès 2012, la difficulté d'une bonne prise en compte de l'impact de l'orographie dans les prévisions météo était relevée par l'IRSN [Mathieu et al. (2012), Korsakissok et al. (2013)]. Les prévisions de précipitations ne reflètent pas toujours correctement la réalité. Or, leur précision est essentielle pour simuler la contamination des sols. Les champs de précipitations résultant des observations « radar » peuvent être utilisés en entrée des modèles de dispersion. L'utilisation de ce jeu de données a longtemps été considérée comme la meilleure ; cependant, l'usage, de ces données reste délicat. Une des difficultés identifiées concerne les pluies fines. Elles ne sont pas détectées par les observations « radar » mais semblent jouer un rôle essentiel dans la contamination des territoires les 14-16 mars.

Depuis 2011, de nombreuses prévisions météorologiques ont été produites. La plupart des équipes travaillant à la simulation du transport et des retombées des rejets de l'accident de Fukushima ont

d'abord utilisé des prévisions dont la résolution spatiale était d'une dizaine de kilomètres ; ce qui est insuffisant pour une bonne prise en compte de l'influence du relief. La résolution temporelle était souvent de 3h, fréquence trop faible pour évaluer à quel moment le vent a tourné ou quand les précipitations ont exactement débuté. Les efforts se sont donc portés vers la production de prévisions météorologiques à plus fine résolution. Les premières estimations de l'IRSN ont été faites en utilisant les prévisions de Météo-France, puis celles du Centre Européen de Prévisions (ECMWF¹) [Mathieu et al. (2012), Korsakissok et al. (2013), Saunier et al. (2013)]. Dans le cadre du rapport de l'UNSCEAR sur l'accident de Fukushima, des experts issus de WMO² ont comparé plusieurs champs météorologiques [WMO (2011), Draxler et al. (2015)] et les champs de précipitation ont fait l'objet d'une attention particulière [Arnold et al. (2015)], sans pour autant parvenir à identifier clairement une source de prévision météorologique à privilégier pour les simulations. Dans le cadre de ce groupe de travail, l'IRSN a eu accès à des champs produits par le centre de prévision météorologique japonais, JMA. Enfin, le MRI a étudié les difficultés liées à l'influence de l'orographie et a généré des simulations météorologiques du mois de mars 2011 à fine résolution, en cherchant à minimiser les erreurs de modélisation [Sekiyama et al. (2013) ; Sekiyama et al. (2015)]. L'IRSN a eu accès à ces simulations dans le cadre du projet SAKURA. Les observations des précipitations par radar ont également été utilisées dans les simulations. À défaut de disposer de champs météorologiques dépourvus d'incertitudes, plusieurs sources de données météorologiques ont été utilisées afin de nuancer l'interprétation des résultats.

Tableau 1 : Description des données météorologiques utilisées par l'IRSN pour sa modélisation de l'accident de Fukushima

Source des données météo utilisées par l'IRSN	ECMWF	JMA (UNSCEAR)	MRI	WRF (Winiarek (2014))
Résolution spatiale	0.125° (env. 12,5 km)	5 km	3 km	5 km
Résolution temporelle	3H	3H	1H	1H

La caractérisation des rejets

Le terme source, c'est-à-dire l'évolution temporelle du débit de chaque radioélément rejeté dans l'atmosphère, est une donnée d'entrée essentielle des modèles de dispersion atmosphérique. Cinq ans après l'accident, son évaluation précise demeure encore incertaine. Il existe deux grandes familles de méthodes pour estimer les émissions.

1. Une approche basée sur la physique des réacteurs et la connaissance de l'état initial de l'installation. Elle consiste à modéliser l'évolution de l'état de la centrale et les événements qui ont conduit aux rejets. Cette approche requiert de nombreuses données. La précision du terme source estimé est directement dépendante des incertitudes sur la modélisation de l'état des réacteurs, de la connaissance précise des événements survenus sur l'installation et de l'efficacité de certains moyens de mitigation des rejets mis en place. Il n'existe pas, à ce jour, de terme source complet (incluant une cinétique de rejet pour différents radionucléides) issu de cette approche. Seules des estimations de quantités totales ont été fournies, immédiatement après l'accident [NISA (2011), NSC (2011)].
2. Des méthodes couplant les mesures dans l'environnement et les simulations de la dispersion atmosphérique pour en déduire les débits de rejet susceptibles d'expliquer les mesures.

¹ European Center for Medium-range Weather Forecast

² World Meteorological Organisation

Inévitablement, la qualité du terme source est corrélée à la précision des champs météorologiques utilisés en entrée du modèle de dispersion ainsi qu'à la quantité et à la pertinence des mesures, puisqu'un évènement n'est reconstruit que s'il est observé. Il existe des méthodes dites « simplifiées » et des méthodes « inverses ». Les premières sont manuelles ou semi-automatiques, et reposent sur un jeu de mesures limité. Les techniques de modélisation inverse, elles, sont des méthodes automatiques à vocation plus opérationnelle basées sur des approches mathématiquement rigoureuses.

Depuis 2011, plusieurs estimations du terme source ont été publiées dans des revues scientifiques. Elles résultent toutes de méthodes couplant les mesures environnementales et les modèles de dispersion atmosphérique. Les approches simplifiées sont privilégiées par JAEA³ [Chino et al. (2011), Terada et al. (2012), Katata et al. (2015)]. Dans un premier temps, l'IRSN les a aussi adoptées [IRSN (2012), Mathieu et al. (2012)]. Les méthodes de modélisation inverse existant avant l'accident de Fukushima permettaient de reconstruire un terme source sur la base d'activités volumiques dans l'air. Elles ont été appliquées au cas de Fukushima par Stohl et al. (2011) et Winiarek et al. (2012), dont l'IRSN est co-auteur. Cependant, l'application de ces méthodes était limitée par le faible nombre de mesures d'activités volumiques disponibles à l'époque. L'équipe de l'IRSN a été la première à développer une méthode de modélisation inverse permettant d'utiliser les mesures de débit de dose [Saunier et al. (2013)]. Cette même équipe a également été la première à inverser les mesures d'activités volumiques de Tsuruta et al. (2014).

Selon les estimations, les activités totales de ¹³⁷Cs rejetées à l'atmosphère varient entre 8 et 20 PBq (Tableau 2). Les premiers termes sources surestimaient les émissions. Les activités rejetées dont les conséquences ont été mesurées sur le territoire japonais varient entre 5,5 et 12,3 PBq. C'est surtout l'évolution temporelle des débits de rejet qui différencie les termes source plus récents. Les débits varient sensiblement sur certaines séquences temporelles. Aucun consensus ne se dégage clairement pour identifier un terme source plus réaliste qu'un autre. Les différences sont imputables aux conditions météorologiques utilisées en entrée du modèle de dispersion atmosphérique et aux types de mesures exploitées (activité volumique, débit de dose ou dépôt total) ; elles reflètent les incertitudes qui persistent dans l'estimation du terme source et dans le domaine des champs météorologiques.

³ Japan Atomic Energy Agency

Tableau 2 : Termes sources principaux estimés à partir des mesures dans l'environnement. En bleu, les quantités totales estimées par la NISA et la NSC sur la base des informations issues de l'installation. En vert, les premiers termes sources construits à partir de méthodes inverses ou simplifiées (combinant mesures radiologiques et météorologiques) en 2011-2012. En violet, les termes sources récents estimés à partir de méthodes inverses ou simplifiées. Les quantités totales des rejets dont les conséquences ont été observées sur le territoire Japonais sont précisées.

Terme source	Quantité totale rejetée de ^{137}Cs (Pbq)		Méthode	Observations
	Vers le Japon et l'océan	Vers le Japon uniquement		
NISA (2011)	15		Installation	Quantité totale seule (pas de cinétique)
NSC (2011)	12		Installation	Quantité totale seule (pas de cinétique)
Chino et al. (2011)	13	7,2	Simplifiée	Activités dans l'air et débits de dose sur le Japon et événements installation
Stohl et al. (2012)	34,9	23,5	Inverse	Activités dans l'air sur l'hémisphère nord et événements installation
Winiarek et al. (2012)	19	12	Inverse	Activités dans l'air sur le Japon, États-Unis et Canada
Mathieu et al. (2012)	20,6	12,6	Simplifiée	Activités dans l'air et débits de dose proches de l'installation et événements installation
Terada et al (2012)	8,8	5,5	Simplifiée	Activités dans l'air et débits de dose proches de l'installation et événements installation
Saunier et al. (2013)	15,5	12,3	Inverse	Débits de dose sur le Japon
Winiarek et al. (2014)	11,6-19,3	7,4	Inverse	Activités dans l'air et mesures de dépôt sur le Japon
Katata et al. (2015)	12,4	8,7	Simplifiée	Activités dans l'air, débits de dose proches de l'installation et mesures en mer et événements installation
IRSN 2015 non publié		8	Inverse	Activités dans l'air sur le Japon (dont Tsuruta et al, 2014)

Un terme source complet estimé en modélisant l'état des réacteurs serait complémentaire puisqu'il s'affranchirait des sources d'incertitudes liées à la météorologie et aux mesures dans l'environnement, et permettrait de progresser sur certains épisodes de rejet.

Depuis 2012, la NEA⁴ a lancé un projet international d'envergure⁵ pour améliorer les modèles d'accident grave et analyser la progression de l'accident de Fukushima. Parmi les objectifs affichés,

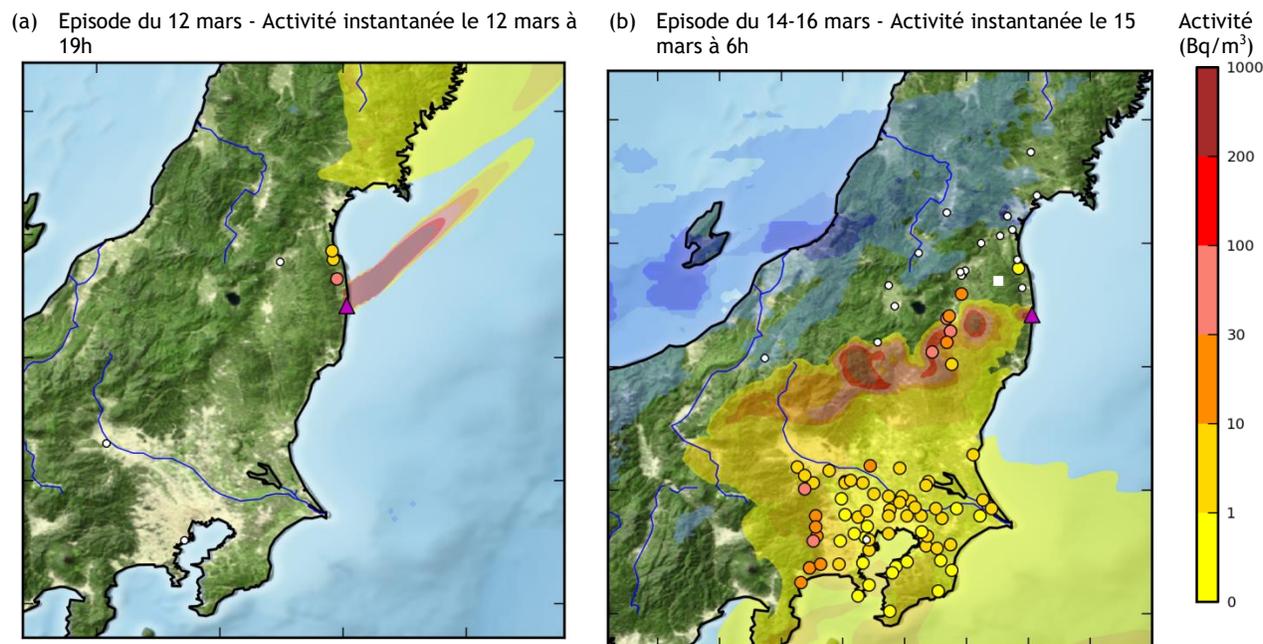
⁴ Nuclear Energy Agency de l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE)

l'un d'entre eux consiste à évaluer le terme source de l'accident en modélisant la physique des réacteurs. L'IRSN est fortement impliqué dans ce projet.

La modélisation de la dispersion atmosphérique

Le terme source et les champs météorologiques sont utilisés en entrée des modèles de dispersion atmosphérique pour simuler le transport des panaches radioactifs dans l'atmosphère et leurs retombées au sol. La qualité des simulations est évaluée par comparaison aux mesures radiologiques dans l'environnement.

Depuis 2011, les simulations ont gagné en réalisme et dorénavant, les écarts modèle-mesures ont été significativement réduits. Des progrès déterminants ont été réalisés grâce à l'exploitation des différentes sources de prévisions météorologiques, à un plus grand réalisme des termes sources ainsi qu'une meilleure compréhension des épisodes de contamination de l'environnement [Tsuruta et al. (2014)]. Pourtant, toutes les études signalent encore des faiblesses et relèvent souvent les mêmes difficultés à modéliser certaines séquences [Morino et al. (2013) ; Terada et al. (2012) ; Korsakissok et al. (2013) ; Saunier et al. (2013) ; Katata et al. (2015) ; Draxler et al. (2015)].



⁵ Le projet BSFAF : <https://www.oecd-nea.org/jointproj/bsaf.html>

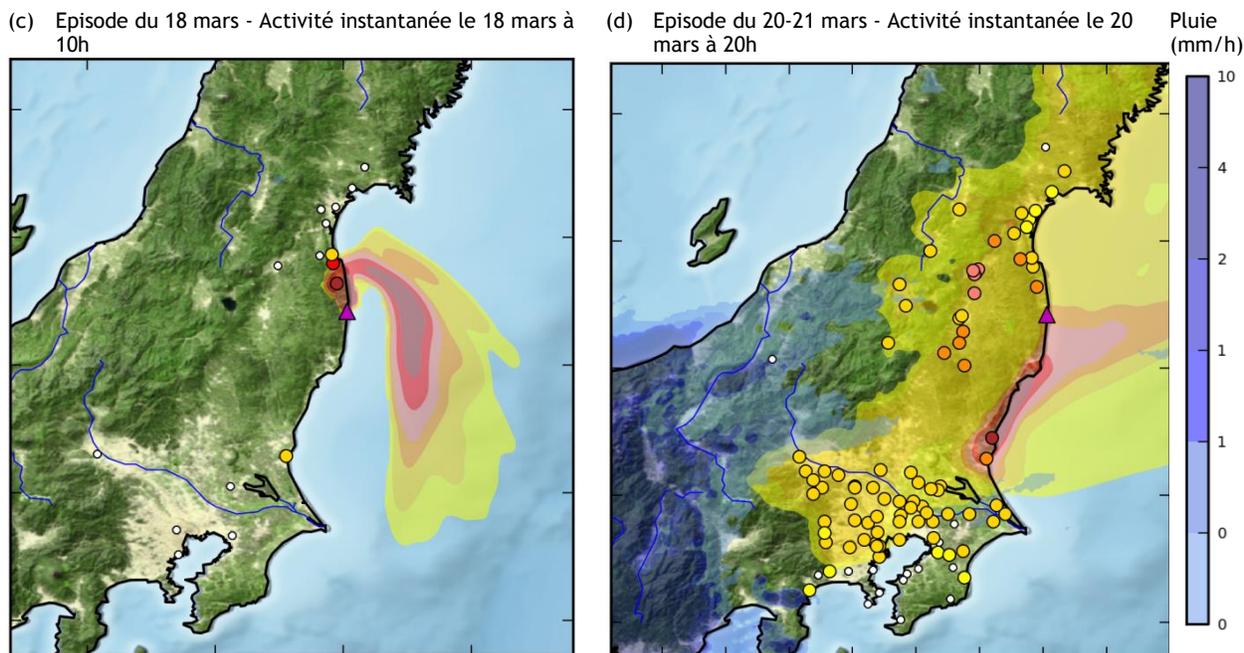


Figure 1 : Activités instantanées de ^{137}Cs du panache simulé comparées aux mesures (ronds colorés). Les précipitations sont représentées par la palette de couleur bleue et sont indiquées en transparence sur les cartes. Chaque carte représente un instant des principaux épisodes de contamination. 12 mars à 19h (a) ; 15 mars à 6h (b) ; 18 mars à 10h (c) et 20 mars à 20h (d). La position d'Idate est indiquée par un carré blanc sur la Figure (b).

L'épisode du 12 mars est correctement simulé sur la première phase mais les modèles échouent sur la seconde quand les activités les plus fortes sont mesurées. Quelle que soit la source de données météorologiques, le panache ne longe pas suffisamment la côte (en regard de la réalité des faits) mais est transporté vers l'océan Pacifique en direction du Nord-Est. La Figure 1a illustre ce comportement qui met en évidence le manque de réalisme des vents le long de la côte.

L'épisode du 14 au 16 mars est aujourd'hui nettement mieux modélisé mais des progrès restent encore à faire.

La simulation de la zone de fort dépôt entre le site nucléaire et le bassin de Fukushima est beaucoup plus réaliste mais sa localisation reste encore légèrement décalée et le lessivage du panache débute au mieux une à deux heures plus tard que dans la réalité mesurée. Le manque de précision des données de pluie est directement responsable de ces défauts d'évaluation (Figure 1b⁶).

Une difficulté commune à toutes les modélisations est la simulation des retombées dans la vallée de Nakadori. En effet, la répartition verticale de l'activité des panaches ainsi que l'orientation des vents ne sont pas assez réalistes en raison d'une prise en compte insuffisante de l'influence du relief.

L'épisode du 18 mars est dorénavant bien modélisé (Figure 1c).

L'épisode du 20 au 21 mars est, depuis peu, nettement mieux modélisé et les différentes phases de cette séquence sont désormais bien reconstruites. Par exemple, grâce aux prévisions météorologiques fournis par le MRI [Sekiyama et al. (2013) ; Sekiyama et al. (2015)] la modélisation des panaches

⁶ La Figure 1b illustre le problème de précision des données de pluie. La simulation est très cohérente avec les activités de ^{137}Cs mesurées. A 6 heures, le lessivage du panache devrait débuter dans la région d'Idate (indiquée par un carré blanc). L'absence de pluie dans la simulation, l'exclut. Les données de pluies utilisées dans cet exemple sont pourtant les observations radar.

transportés vers le Sud a été considérablement améliorée. Jusqu'à présent, le retard du panache ne permettait pas de simuler la contamination de la région de Tokai, ce qui dégradait également les simulations dans l'agglomération de Tokyo. Les prévisions météorologiques du MRI permettent de mieux résoudre les simulations de la zone côtière. Ainsi, les simulations de l'IRSN parviennent à un bon accord avec les mesures environnementales comme l'illustre la Figure 1d.

Améliorer les modèles de dispersion atmosphérique et la représentation des processus physiques

Au-delà de l'objectif d'aboutir à une meilleure compréhension de l'accident de Fukushima, l'enjeu du travail engagé par la communauté de modélisation de la dispersion atmosphérique est d'améliorer la représentation des processus physiques dans les modèles. Pour l'IRSN, cela se traduit par l'amélioration des outils opérationnels d'expertise dans le souci de faire progresser la pertinence de la réponse de l'Institut en cas d'accident nucléaire.

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. Le réalisme des dépôts simulés a donc fait l'objet d'une attention particulière et les difficultés à reproduire les dépôts de l'épisode du 14-16 mars ont conduit plusieurs équipes, dont l'IRSN, à étudier la modélisation des processus de dépôt humide [Leadbetter et al. (2015); Katata et al. (2015); Quérel et al. (2016); les équipes du MRI]. Les modèles de dispersion utilisés dans un contexte opérationnel présentent généralement des modélisations du dépôt très simplifiées. Aussi, l'enjeu était-il de savoir si des modèles complexes prenant en compte la physique des aérosols, leur granulométrie, celle des précipitations etc., permettraient de mieux simuler les dépôts.

Simuler les conséquences de l'accident de Fukushima avec un modèle de dépôt complexe ne résout pas les difficultés à reproduire certains épisodes. Ces difficultés semblent surtout dues aux incertitudes qui demeurent sur les données d'entrée et à la modélisation du comportement du panache dans le contexte d'une orographie complexe qui influence sa répartition verticale. En revanche, il apparaît essentiel de modéliser, même simplement, les processus de lessivage dans le nuage au même titre que les processus de lessivage sous le nuage [Quérel et al. (2016)].

L'investigation de ce sujet se poursuit, en particulier au travers des inter-comparaisons de modèles. L'IRSN y contribue activement, notamment en participant celle coordonnée par le Science Council of Japan autour de l'accident de Fukushima.

Arnold, D., Maurer, C., Wotawa, G., Draxler, R., Saito, K. et Seibert, P. (2015). "Influence of the meteorological input on the atmospheric transport modelling with FLEXPART of radionuclides from the Fukushima Daiichi nuclear accident." *Journal of Environmental Radioactivity* **139**: 212-225.

Chino, M., Nakayama, H., Nagai, H., Terada, H., Katata, G. et Yamazawa, H. (2011). "Preliminary estimation of release amounts of ^{131}I and ^{137}Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant into the atmosphere." *Journal of nuclear science and technology* **48**(7): 1129-1134.

Draxler, R., Arnold, D., Chino, M., Galmarini, S., Hort, M., Jones, A., Leadbetter, S., Malo, A., Maurer, C., Rolph, G., Saito, K., Servranckx, R., Shimbori, T., Solazzo, E. et Wotawa, G. (2015). "World Meteorological Organization's model simulations of the radionuclide dispersion and deposition from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident." *Journal of Environmental Radioactivity* **139**: 172-184.

- IRSN (2012). *Fukushima, one year later: initial analyses of the accident and its consequences*. IRSN. Rapport n°[IRSN/DG/2012-003](#).
- Katata, G., Chino, M., Kobayashi, T., Terada, H., Ota, M., Nagai, H., Kajino, M., Draxler, R., Hort, M. C., Malo, A., Torii, T. et Sanada, Y. (2015). "Detailed source term estimation of the atmospheric release for the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident by coupling simulations of an atmospheric dispersion model with an improved deposition scheme and oceanic dispersion model." *Atmos. Chem. Phys.* **15**(2): 1029-1070.
- 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.
- Leadbetter, S. J., Hort, M. C., Jones, A. R., Webster, H. N. et Draxler, R. R. (2015). "Sensitivity of the modelled deposition of Caesium-137 from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant to the wet deposition parameterisation in NAME." *Journal of Environmental Radioactivity* **139**: 200-211.
- Mathieu, A., Korsakissok, I., Quélo, D., Groëll, J., Tombette, M., Didier, D., Quentric, E., Saunier, O. et Benoit, J.-P. (2012). *Assessment of atmospheric dispersion for the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident*. 13th International Congress of the International Radiation Protection Association, Glasgow, 14-18 May, 2012.
- 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., 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.
- NISA (2011, 2011/06/06). "Regarding the Evaluation of the Conditions on Reactor Cores of Unit 1, 2 and 3 related to the Accident at Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station, TEPCO." <http://www.nisa.meti.go.jp/english/press/2011/06/en20110615-5.pdf>.
- NSC (2011). "Trial estimation of emission of radioactive materials (1-131, Cs-137) into the atmosphere from Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station." <http://www.nsc.go.jp/NSCenglish/geje/2011%200412%20press.pdf>.
- 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 Accepted pour publication*.
- 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.
- Sekiyama, T., Kajino, M. et Kunii, M. (2013). *Ensemble simulation of the atmospheric radionuclides discharged by the Fukushima nuclear accident*. EGU General Assembly C1 - Vienne.
- 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.
- Stohl, A., Seibert, P., Wotawa, G., Arnold, D., Burkhardt, J. F., Eckhardt, S., Tapia, C., Vargas, A. et Yasunari, T. J. (2011). "Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition." *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* **11**(10): 28319-28394.
- Terada, H., Katata, G., Chino, M. et Nagai, H. (2012). "Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. Part II: verification of the source term and analysis of regional-scale atmospheric dispersion." *Journal of Environmental Radioactivity* **112**: 141-154.
- 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**.
- 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.

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.

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.*