

Quantification d'incertitude par réduction de modèle de dispersion atmosphérique



Vivien Mallet (INRIA) & Irène Korsakissok (IRSN)

Février 2016

1 Résumé

La simulation numérique de la dispersion de radionucléides dans l'atmosphère repose sur *des modèles et des données très incertains*. Il est essentiel de quantifier ces incertitudes pour guider la prise de décision lors de crises telles que celle de Fukushima. La quantification des incertitudes est cependant un problème de recherche ouvert et difficile du fait des coûts de calcul et de la nature des observations. La thèse proposera une stratégie complète de quantification des incertitudes en reposant sur des *modèles de simulation réduits* et une *calibration* contrainte par les observations. Ce travail de recherche ambitieux s'étendra de la *théorie* de la calibration (bayésienne ou fondée sur des scores d'ensemble, avec prise en compte de la redondance dans les observations) jusqu'à la *simulation* avec les modèles (à réduire) utilisés en situation de crise.

2 Contexte et objectifs

Lors de la catastrophe de Fukushima, l'**IRSN** (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire) a activé son centre technique de crise, afin de répondre notamment aux demandes du gouvernement français, de l'ambassade française au Japon et des médias. Les outils opérationnels permettant d'estimer les conséquences d'un rejet accidentel reposent sur des modèles numériques de simulation de la dispersion atmosphérique à petite échelle (quelques kilomètres autour de la centrale nucléaire) et à grande échelle. La figure 1 illustre des calculs effectués en prévision opérationnelle pendant la crise.

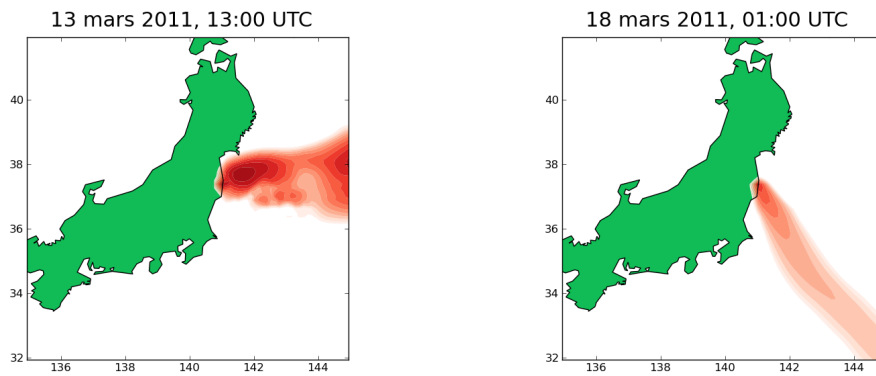


FIGURE 1: Simulation de la dispersion de radionucléides à l'échelle du Japon lors de la catastrophe de Fukushima. Le nuage est simulé par un modèle de transport atmosphérique, ici au voisinage du sol, pour le césium 137 et pour deux échéances de temps.

Qu'il s'agisse de prévoir les conséquences des rejets ou d'effectuer une analyse a posteriori d'un accident nucléaire, les simulations numériques constituent un outil incontournable. Dans le cas de Fukushima, le nombre de mesures effectuées pendant la catastrophe a été limité, notamment du fait de l'indisponibilité de nombreux instruments de mesure, mis hors service par le tremblement de terre et le tsunami. Les mesures effectuées a posteriori ne permettent pas de reconstituer de façon satisfaisante la chronologie des événements, et donc d'évaluer de façon précise leur impact sanitaire et environnemental. Il est donc important de disposer de simulations numériques les plus précises possibles afin de reconstituer au mieux les phases de contamination.

Cependant, la qualité des résultats issus de modèles numériques est limitée par de fortes incertitudes. Ces incertitudes proviennent de la connaissance très approximative du terme source, des limites des simulations météorologiques (cf. figure 2), des défauts de modélisation des dépôts, d'une prise en compte approximative de la turbulence, des erreurs de l'intégration numérique, etc. Il est important de prendre en compte toutes ces incertitudes afin que la simulation numérique puisse aider au mieux à la prise de décision.

On peut identifier deux difficultés majeures lors de la quantification des incertitudes dans les simulations de dispersion. Il y a d'abord le coût de calcul des simulations qui ne permet d'effectuer qu'un nombre limité de simulations. Or, toutes les approches de propagation des incertitudes dans un modèle non linéaire requièrent un grand nombre de simulations. La seconde difficulté réside dans le défaut de connaissance des incertitudes sur les données d'entrée du modèle et sur le modèle lui-même. Ainsi, même si la première difficulté est levée, il reste encore à correctement déterminer les incertitudes à propager. Ceci ne peut se faire qu'en se confrontant aux observations et en calibrant toutes les incertitudes. Le sujet de thèse souhaite lever ces deux difficultés majeures. Il s'agit là d'objectifs ambitieux, mais les récents développements portés par l'équipe d'accueil ont ouvert la voie à des solutions esquissées ci-dessous.

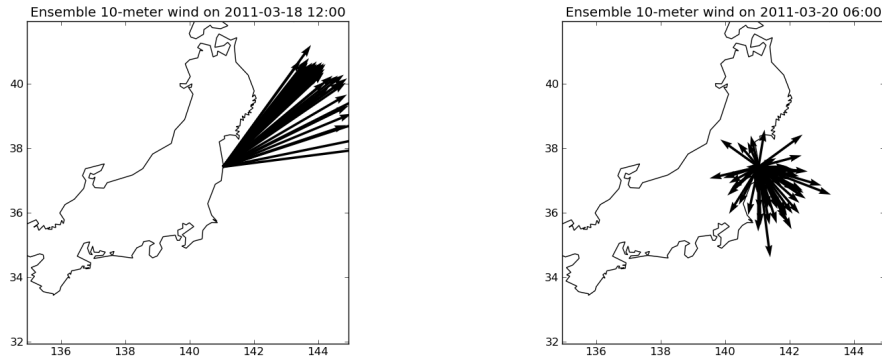


FIGURE 2: Prévisions à la centrale de Fukushima de la vitesse et de la direction du vent à 10 mètres par plusieurs modèles météorologiques issus de **TIGGE**. À gauche, une incertitude significative est observée (cas classique) ; à droite, l'incertitude est particulièrement élevée, ce qui conduit à de très fortes erreurs dans la simulation de la dispersion des radionucléides.

3 Méthodes envisagées

Une importante contribution récente concerne la construction de modèles réduits. On appelle modèle réduit, ou encore méta-modèle, un substitut du modèle numérique de dispersion qui produit des résultats proches et dont le coût de calcul est très faible, voire négligeable. Aujourd'hui, nous ne disposons pas d'un modèle réduit reproduisant l'intégralité des activités et dépôts calculés par le modèle de dispersion, mais nous avons construit un modèle réduit qui reproduit assez fidèlement les activités et dépôts moyens (en temps) aux points d'observation. Le modèle réduit émule de manière satisfaisante la relation entre certaines perturbations sur les entrées, telles que les émissions ou le vent, et la plupart des observations moyennées en temps. Les perturbations sont aujourd'hui des facteurs multiplicatifs ou termes additifs appliqués à l'ensemble de la variable considérée (vitesse de dépôt, coefficient de diffusion turbulente, etc.).

Le contenu scientifique de la thèse peut être résumé par les points suivants.

1. L'amélioration du modèle réduit pour qu'il représente des variables de sorties moins agrégées (que les moyennes temporelles) et qu'il gère des perturbations d'entrée plus riches (que des facteurs multiplicatifs ou des termes additifs globalement appliqués à un champ spatio-temporel).
2. La calibration des incertitudes sur les données d'entrée par inférence bayésienne.
3. La calibration des incertitudes sur les données d'entrée par optimisation de scores d'ensemble.

Ces mêmes points peuvent être interprétés du point de vue opérationnel, comme suit.

1. La mise au point d'une procédure de construction d'un modèle réduit répondant immédiatement à des différents scénarios d'émission ou météorologiques.

2. La quantification des incertitudes des prévisions et analyses du passé grâce aux observations remontées.
3. Le calcul fiable des probabilités de réalisation d'événements comme les dépassements de seuils d'exposition.

L'une des voies d'amélioration du modèle réduit est de le rendre capable d'approcher plus de sorties du modèle de dispersion. Il est notamment souhaitable qu'on puisse l'utiliser pour calculer les temps et hauteurs des pics d'activité observés aux stations. L'amélioration doit aussi concerner les entrées que nous souhaitons plus riches. En particulier, les perturbations sur les émissions, qui sont des entrées du modèle réduit, devront dépendre du temps.

La calibration par inférence bayésienne consiste à trouver des distributions de probabilité des entrées cohérentes avec les observations. Ces distributions, dites a posteriori car conditionnées par les observations, peuvent être échantillonnées à condition de disposer d'un modèle réduit et d'évaluer les incertitudes des observations. Grâce à ces calculs, on accède à la distribution jointe des perturbations sur les entrées (vents, émissions, etc.) et à celle des sorties, ce qui constitue l'information la plus complète.

Nous souhaitons aussi exploiter des scores d'ensemble, souvent orientés vers un ou plusieurs événements particuliers, par exemple le dépassement de seuils. La calibration avec ce type de score est un sujet nouveau mais prometteur car il permet de s'affranchir d'hypothèses difficilement vérifiables et concerne directement la survenue d'événements surveillés en situation opérationnelle.

Au-delà des techniques évoquées précédemment, plusieurs questions de fond se poseront lors de la réalisation des travaux. En particulier, la caractérisation du réel apport des observations est un problème ouvert et pourtant essentiel. Étant donné les structures cohérentes des activités et dépôts, issues de panaches, les observations sont largement redondantes et les techniques de calibration devraient en tenir compte.

Enfin, tous ces travaux seront pensés pour être applicables dans un contexte opérationnel où deux contraintes fortes sont présentes : la nécessité d'effectuer des simulations rapidement et la faible quantité d'observations. La première contrainte orientera la construction du modèle réduit vers des techniques adaptatives qui minimisent le nombre d'appels au modèle. La seconde contrainte demandera d'évaluer la quantité d'information apportée par les observations, et pourra éventuellement donner lieu à des recommandations sur le réseau des observations.

4 Équipes de recherche impliquées

L'équipe-projet **CLIME** de l'**INRIA** (Institut national de recherche en informatique et en automatique) travaille sur le couplage entre modèles et données d'observation pour la simulation environnementale, et en particulier sur l'estimation des incertitudes en simulation de la qualité de l'air. Les travaux s'inscriront dans la continuité de recherches effectuées sur le cas de Fukushima à grande échelle et, par ailleurs, en photochimie.

L'équipe de l'**IRSN** est en charge des calculs de dispersion atmosphérique en cas d'accident majeur. Elle développe des outils de modélisation à petite et grande échelle. Ces

outils sont destinés à être exploités de manière opérationnelle lors d'une crise, tel que ce fut le cas lors de la catastrophe japonaise.

5 Conditions et contacts

Profil recherché : très bon niveau général, avec intérêt pour la théorie des incertitudes, la simulation numérique et la modélisation statistique

Début de la thèse : octobre 2016

Durée : 3 ans

Rémunération : à partir de 1650 euros nets par mois et selon profil

Localisation partagée :

- **INRIA Paris** dans l'équipe-projet Clime, au 41 rue du Charolais à Paris (près de gare de Lyon ; nouveaux locaux INRIA) ;
- **IRSN, à Fontenay-aux-Roses.**

Encadrement : Vivien Mallet (INRIA), Irène Korsakissok (IRSN)

Contacts :

- **Vivien.Mallet@inria.fr**—1 80 49 41 24
- **Irene.Korsakissok@irsn.fr**—1 58 35 85 49