Résumé de thèse

Impact de la décontamination et de la remise en culture des sols agricoles sur les transferts de sédiments et de radiocésium dans les rivières de Fukushima

Thèse soutenue à Paris-Saclay, le 16 décembre 2024, par

Thomas CHALAUX-CLERGUE

Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay École doctorale n° 579,

Sciences mécaniques et énergétiques matériaux et géosciences (SMEMaG)

Spécialité de doctorat : Géosciences

Graduate School : Géosciences, climat, environnement et planètes Référent : Université de Versailles-Sait-Quentin-en-Yvelines (UVSQ)

Thèse préparée dans les unités de recherche Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE ; CEA-CRNS-USVQ, France) et Laboratory of Soil Chemistry (Kyoto Prefectural University, Japan), sous la direction de Olivier EVRARD, directeur de recherche CEA, et la co-direction de Atsushi NAKAO, associate professor à Kyoto Prefectul University.

Introduction

Contexte

Le 11 mars 2011, un séisme sous-marin de magnitude 9,0 ${
m Mw}$ frappe le nord-est de Honsh ${
m u}$, l'île principale du Japon, marquant le début de la catastrophe dite du "Grand séisme de l'est du Japon" (東日本大震災 - 'higashi nihon daishinsai', en japonais) (Simons et al., 2011; Yagi and Fukahata, 2011; Zhao, 2015). Le tsunami qui s'ensuit, génère des vagues atteignant jusqu'à 40,5 ${
m m}$ à Miyako (préfecture d'Iwate). Il submerge 2000 ${
m km}$ de linéaire côtier et s'est engouffré jusqu'à 10 ${
m km}$ à l'intérieur des terres, inondant environ 561 ${
m km}^2$ du littoral et cause la mort de près de 20 000 personnes (Fire and Disaster Management Agency, 2021; Emergency Disaster Preparedness Headquarters, 2021).

La centrale nucléaire de Fukushima Daiichi ("Fukushima Daiichi Nuclear Power Plan"; FDNPP), exploitée par la Tokyo Electric Power Company (TEPCO), est inondée par une vague de 14 à 15 m, entraînant la perte des générateurs de secours et provocant une défaillance des systèmes de refroidissement de quatre réacteurs en fonctionnement. Les explosions des bâtiments des réacteurs 1, 3 et 4 conduit à la libération de environ 520 PBq de radionucléides (sans tenir compte des gaz nobles), dont 20 % retombent sur le nord-est du Japon, le reste étant dispersé dans le Pacifique (Chino et al., 2011; Kobayashi et al., 2013; Steinhauser, 2014). L'accident est classé au niveau 7 de l'échelle "International Nuclear and Radiological Event Scale" (INES) (IAEA, 2015).

Parmi les radionucléides rejetés, l'iode (131 l) et le radiocésium (134 Cs et 137 Cs) sont les plus préoccupants et plus particulièrement le 137 Cs, représentant un enjeu à long terme en raison de sa demi-vie de 30 ans. Sur les 2,7 PBq de 137 Cs déposés au Japon, 74 % se concentrent dans la préfecture de Fukushima (Kato et al., 2019), où 83 % du territoire a reçu plus de 5 kBq.m⁻² et 26 % plus de 100 kBq.m⁻². Les habitants vivant dans un rayon de 20 km autour de la centrale nucléaire ("*Evacuation Zone*") et ceux qui pourraient être exposés à un débit de dose radioactive supérieur à 20 mSv.yr⁻¹ au moment de l'accident ("*Planned Evacuation Zone*") ont été évacués en priorité. Au total, onze communes situées dans la préfecture de Fukushima ont été classées comme "*Residence Restriction Area*" ont reçu un ordre d'évacuation, concernant 80 000 habitants et sur une zone de 1 150 km² (MoE, 2018).

Afin de permettre un retour rapide de la population et la reprise des activités économique, notamment agricole, le gouvernement japonais a entrepris un programme de décontamination à grande échelle. Dans le cadre de ce programme de décontamination, l'objectif à long terme visé était d'atteindre une exposition individuelle inférieure à 1 $\rm mSv~yr^{-1}$ ou 0.23 $\rm \mu Sv.h^{-1}$ (niveau de référence de la dose d'exposition de la population générale dans des conditions normales selon la commission internationale de protection radiologiques; "International Commission on Radiological Protection" - IRCP) (MoE, 2013). Trois zones sont définies : les "Intensive Contamination Survey Areas" (ICAs, 24 000 km²) où le débit de dose dépassait ce seuil de 1 $\rm mSv~yr^{-1}$, concernant 6,9 million d'habitants qui n'a pas fait l'objet d'une évacuation, la "Special Decontamination Zone" (SDZ, 1 150 km²) où le débit de dose dépassait 20 $\rm mSv~yr^{-1}$, et enfin, la "Difficult-to-Return Zone" (DTRZ, 335 km²) où le débit de dose dépasserait encore 20 $\rm mSv~yr^{-1}$ cinq ans après l'accident, soit en 2016 (Fig. R.1.B and C).

Le comportement du ¹³⁷Cs dans le sol permet la mise en place d'un protocole de décontamination fondé sur l'excavation des couches superficielles contaminées. Après son dépôt, le radiocésium se fixe rapidement et de manière quasi-irréversible aux particules fines, telles que les limons ou les argiles (Sawhney, 1972; He and Walling, 1996), entraînant une accumulation de 90 à 99 % du ¹³⁷Cs dans les 5 premiers centimètres des

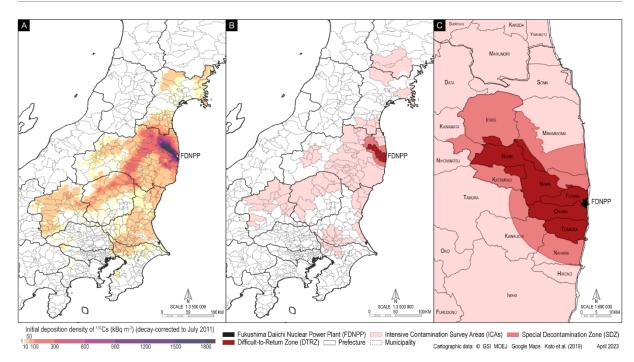


Figure R.1: (A) Carte des dépôts de 137 Cs dans la région nord-est de l'île principale du Japon suite à l'accident de la FDNPP (d'après Kato et al. (2019)); (B) - (C) délimitation des zones où des travaux de décontamination ont été menés, comprenant les "Intensive Contamination Survey Areas" (ICAs) (40 municipalités ; 24 000 km²), la "Special Decontamination Zone" (SDZ) (11 municipalités ; 1 150 km²) et la "Difficult-to-Return Zone" (DTRZ) (tout ou partie de 8 municipalités ; 335 km²) (Source : Ministère de l'Environnement du Japon). Cartes réalisée dans le cadre de l'article Evrard et al. (2023).

sols non perturbés (Kato et al., 2012; Lepage et al., 2015). Sur cette base, le Ministère de l'Environnement japonais (MoE) a publié, dès décembre 2011, des directives précisant les procédures de décontamination selon les types d'occupation du sol, se concentrant principalement sur les zones résidentielles et agricoles (MoE, 2011, 2013). Dans les zones agricoles, les actions menées dépendaient de l'activité initiale en ¹³⁷Cs: un labour profond (30-40 cm) était réalisé lorsque cette activité était inférieure à 5 kBq.kg⁻¹, tandis qu'audelà de ce seuil, une excavation des 5 premiers centimètres était suivie d'un apport de "sol sain" (saprolite), d'amendements pour restaurer la fertilité, puis d'un double labour (25-30 cm) pour homogénéiser l'ensemble (MoE, 2013, 2015, 2023). Dans les forêts, seules les zones situées à moins de 20 m des habitations ou le long des voies ont été traitées, via le retrait de la litière et des débris organiques sur 5 cm, complété par un débroussaillage et un élagage des arbres sur une bande de 4 m. Enfin, la décontamination des prairies et bandes herbacées adjacentes aux zones habitées ou agricoles s'est traduite par un fauchage systématique et la collecte de la biomasse. Les matériaux issus de ces opérations ont été ensuite conditionnés et transférés vers des installations dédiées pour traitement.

À la suite des opérations de décontamination, environ 180 km² avaient été traités au sein de la *Special Decontamination Zone* (SDZ) d'ici à mars 2020, soit environ 16 % de la superficie totale de la zone (MoE, 2023). Ces interventions ont mobilisé un grand nombre de travailleurs et généré 13,43 millions m³ de déchets. La décontamination a constitué un axe majeur de la politique de reconstruction post-accident, dite "*Nuclear Recovery Policy*", representant à elle seule environ 16 % du budget total consacré à la gestion des conséquences du séisme du Tōhoku et de l'accident nucléaire. Ce budget s'élevait à 6 122,3 milliards ¥ (environ 50,9 milliards € au taux moyen de 2020), dont 1 500 milliards ¥ alloués à la décontamination des SDZ et 1 400 milliards ¥ à celle des ICAs (MoE, 2018; Board of Audit of Japan, 2023; Evrard et al., 2023).

La progression des travaux, achevés entre 2017 et 2020 dans les ICAs et la SDZ, combinée à la décroissance

radioactive naturelle, a entraîné une baisse significative des débits de dose ambiants dans les zones résidentielles et agricoles. Cette diminution de l'exposition a permis la levée progressive des ordres d'évacuation, amorcée dès avril 2014 dans le village de Tamura, et conclue en mars 2020 avec le village de Futaba. Tandis que l'ordre d'évacuation a été maintenu dans la DTRZ jusqu'au printemps 2022, exclue dans un premier temps du programme de décontamination en raison de ses niveaux de contamination particulièrement élevés, où dès lors certaines portions de la DTRZ ont été rouvertes sans obligation de décontamination, à l'exception des zones désignées comme "Special Reconstruction and Revitalisation Zones", situées à proximité des zones de résidentielles ou de production agricole.

Malgré l'ampleur du programme de décontamination, seule une fraction limitée du territoire a été traitée. Celui-ci a principalement ciblé les zones résidentielles et agricoles, alors que la majorité de la préfecture de Fukushima est couverte de forêts (70-80 %). Or, seuls 19 % des dépôts initiaux de ¹³⁷Cs ont concerné les terres agricoles, contre 74 % pour les zones forestières (Kato et al., 2019). Selon Yasutaka et al. (2013), la décontamination de la bande de 20 m autour des habitations et voies de circulation ne représente qu'environ 5 % des surfaces forestières contaminées dans la SDZ.

Par ailleurs, cette région est soumise à des épisodes annuels de fortes précipitations, notamment entre juillet et octobre, sous forme de typhons ou de tempêtes tropicales. Ces événements sont les principaux vecteurs du transfert de sédiments par érosion hydrique dans les bassins versants (Laceby et al., 2016; Chartin et al., 2017), et 82 à 99 % du transfert de ¹³⁷Cs survient lors de ces épisodes (Yamashiki et al., 2014; Sakaguchi et al., 2015; Iwagami et al., 2017; Osawa et al., 2018). Ce transfert est associé à l'érosion des particules fines du sol, notamment la fraction limono-argileuse (3-63 μ m; Sakaguchi et al. (2015)). Ainsi, les zones non décontaminées, telles que les forêts et la DTRZ, constituent des sources potentielles de sédiments contaminés, susceptibles d'entraîner une recontamination des zones situées en aval. Néanmoins, une diminution progressive de l'activité du ¹³⁷Cs dans les sédiments fluviaux a été observée au fil des années. Pour expliquer cette tendance plusieurs facteurs ont été mis en avant : décroissance radioactive, effet des actions de décontamination, diminution des stocks mobilisables par l'érosion répétée, ou encore réduction de l'érosion due au développement spontané de la végétation dans les zones agricoles abandonnées.

L'évacuation des populations, les travaux de décontamination et la reprise partielle de l'activité agricole ont entraîné des modifications radicales et rapides de l'usage des sols. De ce fait, des évolutions notables dans les dynamiques de transfert des sédiments et du radiocésium sont attendues sur l'ensemble de la période post-accident jusqu'à plus d'une décennie après la catastrophe.

Objectifs et démarche générale

Cette thèse vise à évaluer l'impact de la décontamination et de la remise en culture des sols agricoles sur les transferts de sédiments et de radiocésium dans trois fleuves côtiers (Mano - 真野川, Ukedo - 請戸川 et Ota - 太田川) drainant le principal panache radioactif issu de l'accident de Fukushima. Une approche comparative a été conduite dans la partie amont de ces bassins versants, caractérisés par leurs paysages montagneux, leurs usages du sol contrastés (zones agricoles et/ou forestières), et leurs trajectoires post-accidentelle. En effet, les bassins versants des barrages Mano et Ogaki drainent des zones mixtes agricoles et forestières, les zones agricoles couvrant environ 7 à 10 % et les zones forestières 90 % de leurs surfaces. Ainsi, le bassin de Mano, situé dans la SDZ, a été décontaminé entre 2014 et 2016. Tandis que le bassin versant du barrage Ogaki, situé dans la DTRZ, a connu une décontamination plus tardive, amorcée en 2022 avec la réouverture de la DTRZ. Tandis que le bassin versant du barrage de Yokokawa, recouvert à 99 % par de la forêt,



Figure R.2: Prélèvement de laisses de crue lors des campagnes de prélèvement d'automne des années 2022 et 2023 (© Olivier Evrard).

n'a pas été concerné par le programme de décontamination.

Le suivi s'est appuyé sur des échantillonnages réalisés entre 2011 et 2023, incluant 911 échantillons de laisses de crue collectés après la saison des typhons (octobre-novembre), 159 échantillons de sol issus de différents contextes d'occupation des sols, ainsi que plusieurs carottes sédimentaires prélevées dans les réservoirs des barrages de Mano, Ogaki et Yokokawa. Les données obtenues ont été intégrées à une base homogène combinant spectrométrie gamma, géochimie élémentaire, propriétés de la matière organique et spectrocolorimétrie.

La méthodologie du traçage sédimentaire, dite de "sediment source fingerprinting", a été utilisée afin de déterminer les contributions relatives des différentes sources de sédiments au cours de cette thèse. Dans un premier temp, ce travail a permis de comparer deux méthodes de sélection de traceurs communes dans la communauté : la "Three-Steps Method" et la "Consensus Method" (Lizaga et al., 2020). Toutes deux appliquées sur un jeu de données unique, une carotte du réservoir de Mano, afin d'évaluer leur influence sur la sélection des traceurs et les prédictions des contributions sédimentaires. Par ailleurs, une approche de validation fondée sur des mélanges virtuels a été formalisée, et un package R, fingR, a été développé et publié pour en faciliter la mise en œuvre de la TSM couplé a la proposition d'un format de base de données adaptées à la publication et l'échange des jeux de données par les scientifiques du domaine.

Dans un second temps, l'évolution des transferts sédimentaires et radiologiques a été analysée dans un bassin versant contrasté - celui du barrage Mano - combinant données de carottes et de laisses de crue. L'objectif était d'identifier les effets temporels de la décontamination sur les sources de sédiments. Cette démarche a été étendue à l'analyse comparative des bassins versants des barrages Mano, Ogaki et Yokokawa, afin d'examiner l'influence de l'usage du sol et du calendrier de décontamination sur les transferts de contaminants

La conjugaison de ces approches a permis de mieux caractériser les dynamiques spatio-temporelles des flux sédimentaires et de radiocesium dans un contexte de mutation des usages du sol, depuis les phases d'abandon, de décontamination jusqu'à la reprise des activités agricoles après l'accident de la FDNPP.

Chapitre I - Traçage sédimentaire: concept, techniques & usages

Ces dernières décennies, le traçage sédimentaire ("sediment source fingerprinting") s'est imposé comme une approche clé pour identifier et quantifier les sources de sédiments au sein des bassins versants. Cette méthode constitue un outil essentiel pour mieux comprendre les dynamiques d'érosion et de transport sédimentaire, en particulier dans des contextes d'évolution des pratiques et de l'occupation des sols, et ainsi soutenir la mise en œuvre de politiques efficaces de gestion des sols et de la ressource en eau.

L'une des étape crutiale de cette méthode réside dans la sélection des traceurs, c'est-à-dire des propriétés physico-chimiques utilisées pour évaluer la contribution des sources sédimentaires. Cette sélection conditionne directement la qualité des prédictions du modèle. La méthode dite "*Three-Step Method*" (TSM) est historiquement la plus utilisée. Elle repose sur la sélection de propriétés dites conservatives et discriminantes. Toutefois, différentes variantes de cette méthode existent, notamment concernant les critères utilisés pour évaluer le caractère conservatif des propriétés, avec sept critère retrouvés dans la bibliographie. Plus récemment, une méthode alternative, dite "*Consensus Method*" (CM), a été proposée comme approche potentiellement plus robuste. Malgré l'intérêt croissant pour ces deux méthodes, peu d'études ont comparé leurs performances respectives à partir d'un même jeu de données réel.

Ce chapitre vise précisément à combler cette lacune en comparant les traceurs sélectionnés par la TSM et la CM, et en évaluant leurs sélections de traceurs et l'impact de ces selections sur les prédictions des contributions relatives des sources sédimentaires. L'analyse réalisée ici repose sur un jeu de données constitué de couches de carottes sédimentaires et d'échantillons de sol issus de 3 sources distinctes (forêt, cultures et substrat) pour lesquels les propriétés de la matière organique, la géochimie et la spectrocolorimétrie en visible ont été analysés. En complement, des mélanges virtuels à proportions de sources connues ont été générés afin de permettre d'évaluer la précision des modélisations.

Les différentes méthodes de sélection de traceurs, issues de la TSM et de la CM, ont abouti à des ensembles de propriétés contrastés, influençant fortement les prédictions des contributions sédimentaires qui en résultent. En effet, l'évaluation du caractère conservatif par la TSM (sept critères de type "range test") et de la CM ont resulté en des nombres de propriétés selectionées variés. Les critères les moins restrictifs de la TSM (minimum-maximum, minimum-maximum ± 10 % et whiskers) ont retenu jusqu'à 23 propriétés, tandis que les plus stricts (moyenne et médiane) et l'intervalle de confiance (CI) de la CM, n'en ont sélectionné que 3 à 4. Certains traceurs, tels que les propriétés organiques (TOC, TN), certains indices colorimétriques (b*, C* et Q7/4), ont toutefois été retenus par l'ensemble des méthodes, suggérant un certain consensus. La sélection de propriétés dites conservatives a été cohérente avec la biblographie : les propriétés organiques (TOC, TN) ont été systématiquement identifiées comme conservatives, de même que certains éléments géochimiques peu solubles (AI, Si, Ti) et indices colorimétriques (b*, C*, Q7/4). Toutefois, ces propriétés sont parfois sensibles à la granulométrie ou à la variabilité spatio-temporelle, ce qui souligne la nécessité d'avoir une approche prudente et contextualisée dans leur utilisation. La méthode CM, bien que plus restrictive, a montré sa capacité à écarter très strictement des traceurs non conservatifs mais aussi exclure des propriétés potentiellement informatives.

La modélisation des contributions selon les différentes sélection de traceurs a révélé trois tendances principales liées au nombre de traceurs sélectionnés (Fig. R.3) : les méthodes ayant selectionné un grand nombre de traceurs (TSM minimum-maximum, minimum-maximum \pm 10 % et whiskers) ont conduit à une

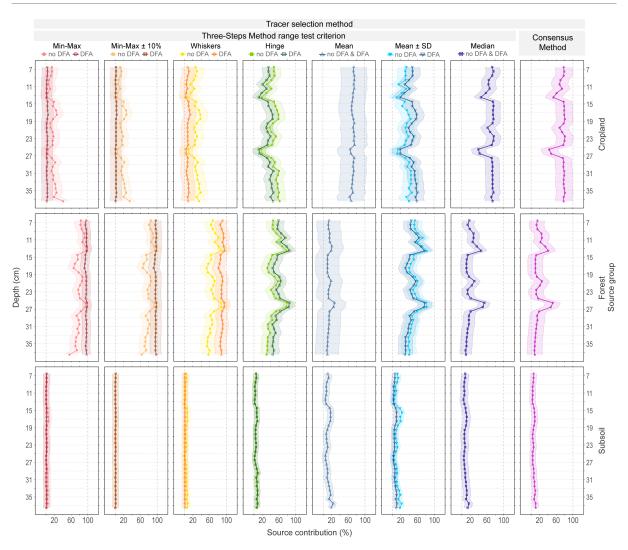


Figure R.3: Predicted source contributions for the sediment core samples according to each tracer selection approach. The different range test criteria of the three-step method (TSM) are the following: minimum-maximum (red circle), minimum-maximum \pm 10 % (brown crossed circle), whiskers (yellow/orange diamond), hinge (green square), mean (blue triangle), mean \pm SD (light blue triangle point down), and median (purple crossed square); the consensus method (CM; light purple circle plus) is also shown. Empty and filled symbols correspond to the use of DFA or not. The error buffer ribbons around the plotted values correspond to the respective RMSE values calculated on virtual mixtures.

contribution dominante de la forêt, les méthodes ayant selectionné un petit nombre de traceurs (CM, et TSM moyenne et médiane) à une dominance des parcelles agricoles, tandis que les méthodes intermédiaires (TSM mean \pm SD, and hinge) ont produit des contributions équilibrées.

Les mélanges virtuels ont été utilisés pour évaluer d'évaluer la qualité de prédiction théorique selon les différentes selections de traceurs à travers divers indicateurs. Ces indicateurs ont mis en évidence que, pour plusieurs sélections de traceurs, les prédictions réalisées sur les sédiments réels se situaient en dehors des plages de variation des mélanges virtuels. Ce décalage révèle une incoherence entre les valeurs des mélanges virtuels et les échantillons réels, qui pourrait être dû à un comportement non parfaitement conservatif de certaines propriétés ou à une représentation incomplète des sources. Ainsi, bien que les métriques issues des mélanges virtuels soient utiles pour évaluer la robustesse des modèles, leur transférabilité aux échantillons réels doit être interprétée avec précaution.

La forte variabilité observée dans la sélection des traceurs entre la TSM, la CM et les différents critères de

la TSM s'est traduite par des divergences notables dans les résultats de modélisation. Cela montre qu'il est crucial de porter une attention particulière à l'identification rigoureuse des propriétés conservatives, sur laquelle repose l'ensemble de la démarche. En effet, cette étape est déterminante tant pour l'amélioration de la compréhension des processus d'érosion que pour l'appui à la mise en œuvre de mesures de gestion du territoire. À cette fin, un effort collectif de partage de jeux de données issus de contextes environnementaux variés serait précieux pour améliorer, tester et consolider les méthodes de traçage sédimentaire. Pour cette raison, un modèle de structure de base de données en traçage sédimentaire a été proposé sur Zenodo afin d'inciter et d'améliorer le partage des données entre les acteurs de la communauté (https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.10725788 - Chalaux-Clergue et al. (2024a)). Afin de contribuer à cette dynamique de partage, la base de données utilisée dans ce chapitre a été publiée selon ce format et est librement accessible sur Zenodo : https://zenodo.org/records/10836974 (Chalaux-Clergue et al., 2024b).

Ce travail a été publié dans la revue *SOIL* (STOTEN) par *Copernicus Publications* pour le compte de la *European Geosceinces Union* :

Chalaux-Clergue, T., Bizeul, R., Batista, P. V. G., Martínez-Carreras, N., Laceby, J. P., & Evrard, O. (2024). Sensitivity of source sediment fingerprinting to tracer selection methods. SOIL, 10(1), 109 – 138.

https://doi.org/10.5194/soil-10-109-2024

En parallèle de ce travail méthodologique, un package R, fingR, a été développé et publié. Il propose une implémentation facilitée de la méthode TSM, intégrant ses principales variantes. Ce package permet d'identifier les traceurs discriminants et conservatifs, de générer des mélanges virtuels, d'exécuter des modèles de type "Bayesian Mean Model" (BMM) et MixSIAR, et d'évaluer la qualité des prédictions à



partir de jeux de données fournis par l'utilisateur. Le package est accessible en ligne à l'adresse suivante : https://github.com/tchalauxclergue/fingR (Chalaux-Clergue and Bizeul, 2023). Les principales fonctions, leurs objectifs et utilisations sont présentés sur la page GitHub du projet ainsi que dans l'annexe A du manuscrit de thèse.

Chapitre II - Décontamination et transfert de radiocésium : les apports d'une carotte de sédimentaire

Depuis l'accident de la centrale de Fukushima Daiichi en mars 2011, une diminution progressive de l'activité en ¹³⁷Cs a été observée dans les sédiments fluviaux. Cette baisse a souvent été attribuée à la fois à la décroissance radioactive et à la mise en uvre du programme national de décontamination, qui a ciblé en priorité les zones agricoles et résidentielles fortement connectées au réseau hydrographique. Dans ce contexte, l'analyse des transferts de sédiments et de ¹³⁷Cs au sein des bassins versants et leur évolution au cours de la dernière décennie demeure essentielle pour évaluer l'impact réel des stratégies de décontaminée engagées.

Ce chapitre vise à reconstruire l'évolution des transferts sédimentaires et du ¹³⁷Cs associé dans le bassin versant du barrage de la rivière Mano, décontaminé de manière précoce entre 2014 et 2016. Pour cela, une carotte sédimentaire a été prélevée en juin 2021 dans le réservoir, et a été analysée par tranche de 1 cm (matière organique, géochimie élémentaire, colorimétrie visible, granulométrie). La séquence de dépot sédimentaire résultant des épisodes de préciptation extrême a été idenfiée et sa chronologie reconstruite

selon une approche multiparamétrique reposant sur les indicateurs physico-chimiques analysés couplés à des données contextuelles (précipitations, gestion du niveau d'eau, historique de la décontamination, étude antérieure du site). En l'absence de la possibilité d'utiliser une approche de datation conventionnelle, cette approche a permis d'identifier et de dater six événements sédimentaires majeurs entre 2011 et 2021, dont quatre antérieurs à la fin de la décontamination (2016) et deux postérieurs.

Les contributions respectives des sources sédimentaires (forêt, terres agricoles, sous-sol et sol sain ajouté) ont été évaluées par traçage sédimentaire (Fig. R.4.a). Durant la période d'abandon (2011-2016), la contribution des terres agricoles a diminué d'environ 27 %, associé au développement spontané du couvert végétal. En parallèle, l'activité en ¹³⁷Cs des sédiments a baissé de 67 % (soit -19 % an⁻¹), et les flux de dépôt de ¹³⁷Cs par événement de précipitation extrême ont été divisés par cinq (-84 %). À l'inverse, lap période suivant la décontamination a été marquée par une augmentation significative des apports issus des terres agricoles (+625 %) et du sol sain (+180 %), entraînant une hausse de 270 % des transferts sédimentaires. Ces apports majoritairement non contaminés ont provoqué une dilution importante du ¹³⁷Cs dans les sédiments (-65 % d'activité dès 2017), mais n'ont pas entraîné de baisse du flux total de ¹³⁷Cs, du fait d'une contribution stable des forêts non décontaminées, et qui constituent ainsi une source continue et stable de sédiments contaminés.

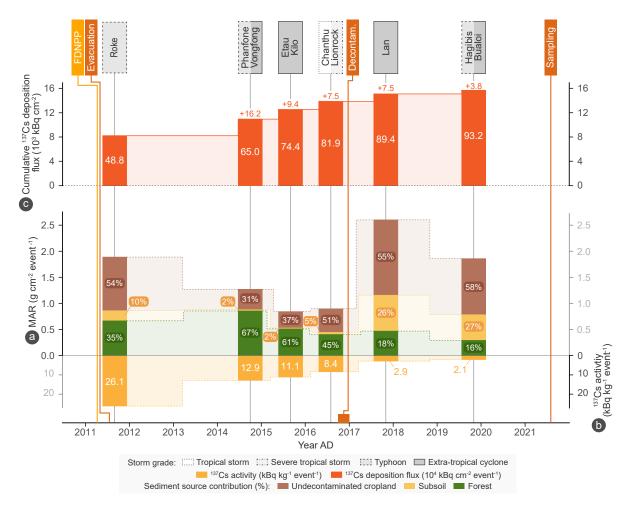


Figure R.4: Evolution of the (a) mass accumulation rate (MAR) as a function of the contribution of each sedimentary source (%), ¹³⁷Cs (b) activity and (c) cumulative deposition flux per extreme precipitation event identified along the sediment core sampled in the downstream part of the Mano Dam reservoir.

Ainsi, les flux de ¹³⁷Cs observés entre 2016 et 2021, après la décontamination, sont restés similaires à ceux de la période d'abandon (2011-2016), malgré la baisse des activités mesurées dans les sédiments (Fig. R.4.b et c). Cela s'explique par la dynamique complexe entre reprise de l'érosion sur les terres décontaminées, la dilution par le sol sain et la persistance des apports de sédiments contaminés issus des forêts. Ainsi, la réduction du transfers de sédiment et ¹³⁷Cs pendant la période d'abandon est liée à la diminution des stocks mobilisables par l'érosion répétée couplées à la régénération spontanée de la végétation sur les terres agricoles abandonnées. Par ailleurs, les conditions de gestion du barrage (débits de crue, durée de rétention) ont pu influencer la représentativité de certains événements dans l'enregistrement sédimentaire, tout comme la résolution de l'échantillonnage (1 cm), qui limite la détection de certains dépôts fins.

Enfin, cette étude suggère que la baisse observée de l'activité en ¹³⁷Cs dans les sédiments fluviaux ne reflète pas nécessairement une baisse des flux transférés, mais peut résulter d'une dilution mécanique par des matériaux non contaminés mis a disposition de manière importante après la décontamition. À ce titre, les effets bénéfiques de la décontamination sur les transferts fluviaux de ¹³⁷Cs apparaissent proches de ceux observés lors de la régénération végétale naturelle durant la phase d'abandon. Ces résultats soulignent la nécessité d'évaluer les effets à long terme d'un tel programme de la décontamination selon differentes échelles temporelles et spatiales.

Ce travail a été publié dans la revue Science of The Total Environment (STOTEN) Elsevier B.V.:

Chalaux-Clergue, T., Foucher, A., Chaboche, P.-A., Hayashi, S., Tsuji, H., Wakiyama, Y., Huon, S., Vandromme, R., Cerdan, O., Nakao, A., & Evrard, O. (2024). Impacts of farmland decontamination on 137Cs transfers in rivers after Fukushima nuclear accident: Evidence from a retrospective sediment core study. Science of The Total Environment, 947, 174546. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174546

Chapitre III - Décontamination et transfert de radiocésium : les apports des laisses de crue

Le chapitre précédent a mis en évidence l'impact de la décontamination sur les transferts de sédiments et de ¹³⁷Cs à l'échelle d'un point bas du bassin versant. Ces résultats ont souligné le rôle central des événements de précipitation extrêmes dans les transferts fluviaux, ainsi que l'effet protecteur du couvert végétal spontané durant la phase d'abandon et de la décontamination. Afin de mieux caractériser la dynamique spatio-temporelle de ces transferts, il est nécessaire d'évaluer leur variabilité à l'échelle du bassin versant.

Ce chapitre vise ainsi à analyser l'évolution spatio-temporelle des transferts de sédiments et des sources de ¹³⁷Cs dans le bassin versant du barrage de la rivière Mano. Pour cela, 101 échantillons de laisses de crue, collectés chaque automne entre 2011 et 2023 sur dix sites situés le long du réseau hydrographique, ont été étudiés. Cette approche permet d'appréhender la variabilité interannuelle des transferts et d'identifier plus finement les secteurs du bassin impliqués. Un indice de connectivité, combinant données topographiques, occupation du sol annuelle et érosivité des précipitations, a été utilisé pour spatialiser la sensibilité des surfaces à l'érosion et leur connexion au réseau hydrographique.

Les résultats montrent que la période d'abandon (2011 – 2015) a été marquée par une baisse progressive de la connectivité des terres agricoles, liée au développement d'un couvert végétal protecteur, limitant l'érosion. La décontamination, menée entre 2014 et 2016, a ensuite restauré cette connectivité, augmentant la sensibilité à l'érosion. En parallèle, l'activité en ¹³⁷Cs dans les sédiments a fortement diminué, passant

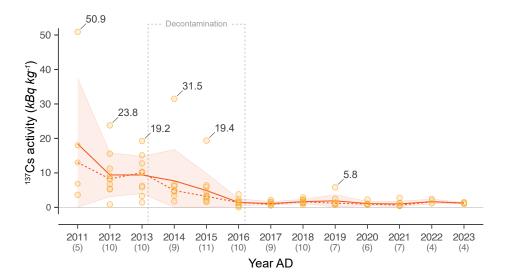


Figure R.5: Annual evolution of ¹³⁷Cs activities in lag deposits sampled in November across the Mano Dam reservoir catchment from 2011 to 2023. Orange solid and dotted lines indicate annual mean and median values, respectively, with the standard deviation around the mean indicated by the light orange ribbon. Number in brackets indicates the number of samples collected during each campaign. Dotted line indicates the occurrence of the decontamination period that took place from June 2014 to December 2016.

de 18.5 ± 1.9 à $1.5 \pm 1.0~{\rm kBq.kg^{-1}}$ entre 2011 et 2016 (Fig. R.5). Cette baisse importante, non suivie d'une hausse malgré la reprise des apports sédimentaires agricoles après la remise en culture, témoigne de l'efficacité de la décontamination à réduire les apports de particules contaminées depuis les terres agricoles.

Les forêts, qui n'ont pas été décontaminées et concentrent encore une majorité du stock de ¹³⁷Cs du bassin versant, sont restées faiblement connectées au réseau hydrographique en dehors des événements extrêmes, comme ceux de 2015 (Etau) et 2019 (Hagibis). Lors de ces épisodes, des apports ponctuels plus importants de sédiments issus des forêts ont été détectés , en particulier en amont du bassin versant, mais sans hausse systématique des activités en ¹³⁷Cs . En effet, ces événements extrêmes induisent principalement des processus d'érosion en ravines, mobilisant préférentiellement le sous-sol appauvri en ¹³⁷Cs. Ainsi, le rôle des forêts comme source de transfert de contamination apparaît plus limité que précédemment supposé.

En somme, cette étude de la dynamique spatio-temporelle dans un bassin versant fortement anthropisé et connecté met en avant l'efficacité du programme de décontamination pour réduire l'activité et le transfert de ¹³⁷Cs dans les sédiments fluviaux, tout en soulignant le rôle déterminant des évènement de précipitations extrêmes dans le déclenchement de ces transferts. Elle montre également que la reprise de l'activité agricole n'entraîne pas systématiquement une augmentation de la contamination. Ces résultats rappellent l'importance d'analyser conjointement les dynamiques d'occupation du sol, la connectivité hydro-sédimentaire et l'intensité des forçages météorologiques pour évaluer les risques de transfert de contamination à long terme le long d'un réseau hydrographique.

Dans le cadre de ce travail, plusieurs fonctions ont été développées pour calculer l'érosivité des précipitations à partir de données enregistrées toutes les six minutes, téléchargées depuis le site de la *Japan Meteorological Agency* (JMA). Ces fonctions ont été regroupées dans un package R open source : RainErosivity. Ce package permet d'identifier les événements érosifs, de calculer leur érosivité (I30 – intensité maximale des précipitations sur 30 minutes ; EI30 – indice d'érosivité des précipitations), ainsi que de synthétiser les caractéristiques des épisodes pluvieux (date et heure de début et de fin, durée, précipitations cumulées, I30 maximum, EI30), tout en s'adaptant aux formats de données et aux règles définies par l'utilisateur. Le package

est accessible en ligne à l'adresse suivante : https://github.com/tchalauxclergue/RainErosivity (Chalaux-Clergue, 2025). Le fonctionnement des principales fonctions est détaillé sur la page GitHub du projet.

Chapitre IV - Décontamination et transfert de radiocésium : perspectives sur le calendrier de décontamination

Dans les chapitres précédents, l'analyse d'une carotte sédimentaire prélevée dans le réservoir du barrage de la Mano ainsi que celle des laisses de crue prélevées dans son bassin versant ont permis de caractériser la dynamique spatio-temporelle des transferts de sédiments et de ¹³⁷Cs dans un bassin décontaminé précocement. Ces résultats ont mis en évidence la forte influence de l'usage des sols, du rôle du couvert végétal développé durant la période d'abandon et de la décontamination sur les flux de sédiments et de ¹³⁷Cs.

Ce chapitre vise à comparer l'évolution des contributions sédimentaires et des transferts de ¹³⁷Cs en fonction du calendrier de décontamination, dans des bassins versants similaires mais caractérisés par des occupations du sol contrastées et des modalités de gestion post-accidentelle distinctes : Mano (mixte forestieragricole, décontamination précoce), Ogaki (mixte forestier-agricole, décontamination très tardive) et Yokokawa (principalement forestier, non décontaminé). Trois carottes sédimentaires ont été prélevées dans les réservoirs de ces barrages, puis analysées par scanner ED-XRF haute résolution (1 mm), ainsi que de manière plus conventionnelle sur des tranches de 1 cm. Ces analyses ont permis d'évaluer les contributions des sources sédimentaires depuis l'accident, et d'étudier l'évolution des transferts de ¹³⁷Cs associés.

Les stocks initiaux de 137 Cs déposés différaient entre les bassins versants selon leur position relative par rapport au panache radioactif principal. Le stock initial dans le bassin d'Ogaki (2,91 \cdot 10¹⁴ Bq) était plus de huit fois supérieur à celui de Mano (3,32 \cdot 10¹³ Bq). Dans les deux bassins forestiers-agricoles, une diminution rapide de l'activité en 137 Cs a été observée après un premier pic de transfert post-accidentel associée à une plus faible relative contribution des couches profondes du sol, traduisant l'effet protecteur du couvert végétale dans les zones agricoles limitant l'érosion (Fig. R.6.a et b). Dans le bassin de Mano, cette tendance a été renforcée après la décontamination (2016), qui a entraîné une hausse des apports de "sol sain" (+20 %) et une dilution marquée de l'activité en 137 Cs (atteignant 2 $\rm kBq.kg^{-1}$). Cette dilution n'a toutefois pas été associée à une baisse du flux de dépôt, en raison du maintien des apports issus des zones forestières non décontaminées. Dans le bassin d'Ogaki, où la décontamination n'a débuté qu'en 2022, la poursuite de la phase d'abandon a été associée à une baisse progressive des flux sédimentaires et du flux de 137 Cs.

La carotte du bassin forestier de Yokokawa présente un comportement distinct, avec trois pics successifs d'activité en ¹³⁷Cs, associés à un transfert différé depuis la canopée et la litière vers le sol (Fig. R.6.c). Ces transferts secondaires seraient liés à la dynamique de la litière dans les forêts de conifères et à l'accumulation de matière organique contaminée en bas de versant. Les analyses montrent que ces pics ne sont pas associés à une modification des sources sédimentaires, mais probablement à la remobilisation différée de ¹³⁷Cs piégé dans la matière organique, érodée plusieurs années après le dépôt initial. Cette observation soutient l'idée d'une décontamination rapide, 1 à 5 ans après l'accident, dans les contextes forestiers, afin de limiter le transfert progressif du ¹³⁷Cs depuis la canopée vers le sol et sa mise à disposition pour l'érosion. Néanmoins, l'excavation de la litière lors de cette décontamination pourrait entraîner une augmentation du ruissellement du radiocésium, en plus de perturber le fonctionnement écologique de la forêt. L'efficacité de la décontamination des forêts dépendra ainsi du moment choisi, des conditions spécifiques au site, et de

l'élimination continue de la nouvelle litière.

Malgré des gestions contrastées (décontamination précoce, tardive ou absente), les trois bassins montrent une stabilisation relativement rapide des profils de contributions sources et des niveaux d'activité en ¹³⁷Cs dans les sédiments. Ces résultats suggèrent que des sources contaminées, stables dans le temps, continuent

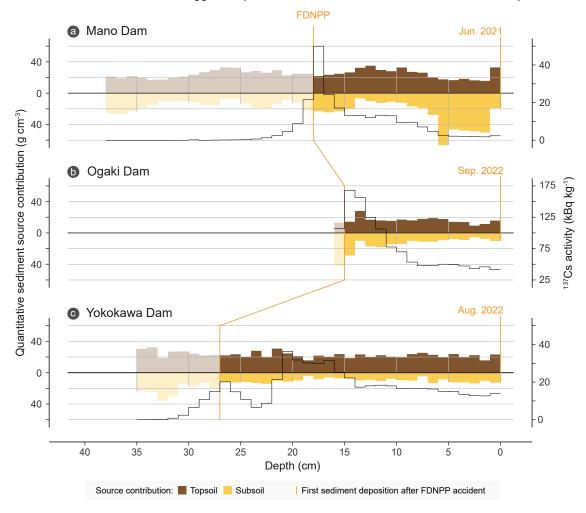


Figure R.6: Evolution of the quantitative source contributions between topsoil and subsoil sedimentary sources (in $\rm g~cm^{-3}$) and radiocesium activity (in $\rm Bq~kg^{-1}$) along the sediment core collected in the downstream part of reservoir of the (a) Mano Dam (June 2021), (b) Ogaki Dam (September 2022) and (c) Yokokawa Dam (August 2022). FDNPP stands for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident

d'alimenter le réseau hydrographique, même après décontamination. Ainsi, bien que la décontamination ait permis une réduction de l'activité des sédiments dans les zones agricoles, elle ne semble pas avoir modifié durablement les flux stables de sédiments contaminés qui se mettent en place quelques années après la contamination. Ces constats invitent à repenser les stratégies de gestion post-accidentelle, en combinant plus étroitement interventions humaines et processus naturels de stabilisation des sols, afin d'optimiser la réduction des transferts contaminés à long terme.

Discussion générale, perspectives, conclusions

Les principaux enseignements issus de l'ensemble des travaux menés dans le cadre de cette thèse, portant sur l'impact de la décontamination et de la remise en culture des sols agricoles sur les transfers de sédiments et de radiocésium dans les bassins versants contaminés de la Préfecture de Fukushima depuis l'accident de la centrale de Fukushima Daiichi en 2011. L'analyse croisée de plusieurs matrices sédimentaires (carottes sédimentaires et laisses de crue), prélevées dans trois bassins aux contextes contrastés (Mano, Ogaki et Yokokawa), a permis de reconstruire l'impact des changements drastiques et rapides d'occupation et d'usage des sols (abandon, décontamination et reprise agricole) sur les dynamiques de transfert du ¹³⁷Cs associés aux particules fines de sol.

Les résultats montrent que la baisse des activités en ¹³⁷Cs observée dans les sédiments fluviaux après la décontamination, n'a pas nécessairement traduit une baisse effective des flux de ¹³⁷Cs déposés dans les reservoirs. Cette baisse a pu résulter d'une dilution mécanique par des apports importants de matériaux non contaminés, notamment issus des "sols sains" ajoutés lors de la décontamination des zones agricole. L'analyse de la carotte sédimentaire du Mano Dam, suggère que les effets de la décontamination sur les flux de ¹³⁷Cs sont comparables à ceux observés après plusieurs années d'abandon, lorsque la végétation spontanée a permis de limiter l'érosion des sols agricoles.

La comparaison entre bassins versants a mis en évidence une stabilisation rapide des contributions sédimentaires et des activités en ¹³⁷Cs, indépendamment du mode de gestion post-accidentelle. Dans les bassins agricoles de Mano (décontamination précoce) et Ogaki (décontamination tardive), cette stabilisation est intervenue quelques années après l'accident, suggérant qu'un régime stable d'apports sédimentaires contaminés s'est mis en place. Dans le bassin forestier de Yokokawa, l'analyse de la carotte sédimentaire a révélé un transfert différé du ¹³⁷Cs, probablement lié à la dynamique de la litière et au relargage progressif de la contamination stockée dans la canopée des conifères et l'humus des forêts.

L'intensité des événements de précipitations extrêmes, particlièrement visible pour les typhons Roke (2011) et Hagibis (2019), s'est révélée être un facteur déterminant dans les transferts de sédiments et de ¹³⁷Cs. Toutefois, l'analyse des carottes a montré que les signatures sédimentaires de ces événements sont parfois absentes ou atténuées, probablement en raison de la gestion des niveaux d'eau dans les réservoirs, soulignant ainsi les limites des reconstitutions fondées uniquement sur les dépôts lacustres.

Enfin, les limites identifiées dans la méthodologie du traçage sédimentaire conventionel, notamment liées à l'évaluation de la conservativité des traceurs, appellent à de nouvelles perspectives méthodologiques. Le développement de modèles par apprentissage automatique, intégrant des données de mélanges virtuels et tenant compte des altérations des propriétés lors du transfert sédimentaire, pourrait constituer une voie prometteuse pour mieux estimer les contributions sédimentaires des sources. Ces avancées pourraient être renforcées par l'utilisation de technologies de mesure embarquées (spectroscopie infrarouge) au sein de réseaux de suivi automatisés (IoT), permettant un suivi en temps réel des flux sédimentaires et des propriétés associées.

Ainsi, cette thèse met en lumière la complexité des transferts de contaminants dans un context post-accidentel, et souligne l'importance d'une approche intégrée, croisant dynamiques d'occupation des sols, les processus d'érosion, et l'intensité des forcages climatiques. Les enseignements tirés du cas de Fukushima doivent servir de leçon et ouvrent la voie à des stratégies de gestion plus durables fondées sur une meilleure compréhension des processus naturels de stabilisation des transfert sédimentaires et au sein de l'écosystème,

et applicables à d'autres polluants particulaires persistants (pesticides, produits pharmaceutiques, etc.) dans un contexte de multiplication des aléas climatiques.

Références

- Board of Audit of Japan, 2023. Status of Implementation of Projects Related to Recovery from the Great East Japan Earthquake. Technical Report. Board of Audit of Japan. URL: https://www.jbaudit.go.jp/pr/kensa/result/5/pdf/050203_01_zenbun.pdf.
- Chalaux-Clergue, T., 2025. RainErosivity: Customisable tools to calculate precipitation event rainfall erosivity index. URL: https://github.com/tchalauxclergue/RainErosivity, doi:10.5281/zenodo. 14745961.
- Chalaux-Clergue, T., Bizeul, R., 2023. fingR: A support for sediment source fingerprinting studies. URL: https://github.com/tchalauxclergue/fingR, doi:10.5281/zenodo.10044404.
- Chalaux-Clergue, T., Bizeul, R., Foucher, A., Evrard, O., 2024a. A unified template for sediment source fingerprinting databases. URL: https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.10725788, doi:10.5281/ZENODO.10725788.
- Chalaux-Clergue, T., Evrard, O., Durand, R., Caumon, A., Hayashi, S., Tsuji, H., Huon, S., Vaury, V., Wakiyama, Y., Nakao, A., Laceby, J.P., Onda, Y., 2024b. Organic matter, geochemical, visible spectro-colorimetric properties, radiocesium properties, and grain size of potential source material, target sediment core layers and laboratory mixtures for conducting sediment fingerprinting approaches in the Mano Dam Reservoir (Hayama Lake) catchment, Fukushima Prefecture, Japan. URL: https://zenodo.org/records/10836974, doi:10.5281/zenodo.10836974.
- Chartin, C., Evrard, O., Laceby, J.P., Onda, Y., Ottlé, C., Lefèvre, I., Cerdan, O., 2017. The impact of typhoons on sediment connectivity: Lessons learnt from contaminated coastal catchments of the Fukushima Prefecture (Japan): Typhoon Impact on Sediment Connectivity Fukushima, Japan. Earth Surface Processes and Landforms 42, 306–317. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/esp.4056, doi:10.1002/esp.4056.
- Chino, M., Nakayama, H., Nagai, H., Terada, H., Katata, G., 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, 1129–1134. URL: http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/18811248.2011.9711799, doi:10.1080/18811248.2011.9711799.
- Emergency Disaster Preparedness Headquarters, 2021. Police Activities and Damage from the 2011 Tohoku Earthquake. Technical Report 1. Emergency Disaster Preparedness Headquarters, Police Agency. URL: https://www.npa.go.jp/news/other/earthquake2011/pdf/higaijokyo.pdf.
- Evrard, O., Chalaux-Clergue, T., Chaboche, P.A., Wakiyama, Y., Thiry, Y., 2023. Research and management challenges following soil and landscape decontamination at the onset of the reopening of the Difficult-To-Return Zone, Fukushima (Japan). SOIL 9, 479–497. URL: https://soil.copernicus.org/articles/9/479/2023/, doi:10.5194/soil-9-479-2023.
- Fire and Disaster Management Agency, 2021. 2011 Tohoku-Pacific Ocean Earthquake (Great East Japan Earthquake). Technical Report 161. Disaster Management Headquarters, Fire and Disaster Management Agency. Japan. URL: https://www.fdma.go.jp/disaster/higashinihon/items/161.pdf.
- He, Q., Walling, D., 1996. Interpreting particle size effects in the adsorption of 137Cs and unsupported 210Pb by mineral soils and sediments. Journal of Environmental Radioactivity 30, 117–137. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0265931X96892757, doi:10.1016/0265-931X(96)89275-7.

- IAEA, 2015. The Fukushima Daiichi Accident. Non-Serial Publications, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/SupplementaryMaterials/P1710/Languages/French.pdf.
- Iwagami, S., Onda, Y., Tsujimura, M., Abe, Y., 2017. Contribution of radioactive 137Cs discharge by suspended sediment, coarse organic matter, and dissolved fraction from a headwater catchment in Fukushima after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. Journal of Environmental Radioactivity 166, 466–474. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0265931X16302557, doi:10.1016/j.jenvrad.2016.07.025.
- Kato, H., Onda, Y., Gao, X., Sanada, Y., Saito, K., 2019. Reconstruction of a Fukushima accident-derived radiocesium fallout map for environmental transfer studies. Journal of Environmental Radioactivity 210, 105996. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0265931X18303308, doi:10.1016/j.jenvrad.2019.105996.
- Kato, H., Onda, Y., Teramage, M., 2012. Depth distribution of 137Cs, 134Cs, and 131I in soil profile after Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident. Journal of Environmental Radioactivity 111, 59–64. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0265931X11002426, doi:10.1016/j.jenvrad.2011.10.003.
- Kobayashi, T., Nagai, H., Chino, M., Kawamura, H., 2013. Source term estimation of atmospheric release due to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident by atmospheric and oceanic dispersion simulations: Fukushima NPP Accident Related. Journal of Nuclear Science and Technology 50, 255–264. URL: http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00223131.2013.772449, doi:10.1080/00223131.2013.772449.
- Laceby, J.P., Chartin, C., Evrard, O., Onda, Y., Garcia-Sanchez, L., Cerdan, O., 2016. Rainfall erosivity in catchments contaminated with fallout from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. Hydrology and Earth System Sciences 20, 2467–2482. URL: https://hess.copernicus.org/articles/20/2467/2016/, doi:10.5194/hess-20-2467-2016.
- Lepage, H., Evrard, O., Onda, Y., Lefèvre, I., Laceby, J.P., Ayrault, S., 2015. Depth distribution of cesium-137 in paddy fields across the Fukushima pollution plume in 2013. Journal of Environmental Radioactivity 147, 157–164. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0265931X15001484, doi:10.1016/j.jenvrad.2015.05.003.
- Lizaga, I., Latorre, B., Gaspar, L., Navas, A., 2020. Consensus ranking as a method to identify non-conservative and dissenting tracers in fingerprinting studies. Science of The Total Environment 720, 137537. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969720310482, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137537.
- MoE, 2011. Basic Principles on the Act on Special Measures Concerning the Handling of Environment Pollution by Radioactive Materials Discharged by the Nuclear Power Station Accident Associated with the Tohoku District-Off the Pacific Ocean Earthquake That Occurred on March 11, 2011. Technical Report. Ministry of the Environment. Japan. URL: https://josen.env.go.jp/en/framework/pdf/basic_principles.pdf.
- MoE, 2013. Decontamination Guidelines. Technical Report 2. Japanese Ministry of Environment. Japan.
- MoE, 2015. Decontamination Report A Compilation of Experiences to Date on Decontamination for the Living Environment Conducted by the Ministry of the Environment. Technical Report. Japanese Ministry of Environment. Japan. URL: http://josen.env.go.jp/en/policy_document/.

- MoE, 2018. Decontamination Projects for Radioactive Contamination Discharged by Tokyo Electric Power Company Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident. Technical Report. Japanese Ministry of Environment.
- MoE, 2023. Decontamination status. URL: http://josen.env.go.jp/area/.
- Osawa, K., Nonaka, Y., Nishimura, T., Tanoi, K., Matsui, H., Mizogichi, M., Tatsuno, T., 2018. Quantification of dissolved and particulate radiocesium fluxes in two rivers draining the main radioactive pollution plume in Fukushima, Japan (2013–2016). Anthropocene 22, 40–50. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213305418300262, doi:10.1016/j.ancene.2018.04.003.
- Sakaguchi, A., Tanaka, K., Iwatani, H., Chiga, H., Fan, Q., Onda, Y., Takahashi, Y., 2015. Size distribution studies of 137Cs in river water in the Abukuma Riverine system following the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. Journal of Environmental Radioactivity 139, 379–389. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0265931X14001519, doi:10.1016/j.jenvrad.2014.05.011.
- Sawhney, B.L., 1972. Selective Sorption and Fixation of Cations by Clay Minerals: A Review. Clays and Clay Minerals 20, 93–100. URL: https://doi.org/10.1346/CCMN.1972.0200208, doi:10.1346/CCMN.1972.0200208.
- Simons, M., Minson, S.E., Sladen, A., Ortega, F., Jiang, J., Owen, S.E., Meng, L., Ampuero, J.P., Wei, S., Chu, R., Helmberger, D.V., Kanamori, H., Hetland, E., Moore, A.W., Webb, F.H., 2011. The 2011 Magnitude 9.0 Tohoku-Oki Earthquake: Mosaicking the Megathrust from Seconds to Centuries. Science 332, 1421–1425. URL: https://science.sciencemag.org/content/332/6036/1421, doi:10.1126/science.1206731.
- Steinhauser, G., 2014. Fukushima's Forgotten Radionuclides: A Review of the Understudied Radioactive Emissions. Environmental Science & Technology 48, 4649–4663. URL: https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es405654c, doi:10.1021/es405654c.
- Yagi, Y., Fukahata, Y., 2011. Rupture process of the 2011 Tohoku-oki earthquake and absolute elastic strain release: RUPTURE PROCESS OF TOHOKU-OKI EARTHQUAKE. Geophysical Research Letters 38, n/a–n/a. URL: http://doi.wiley.com/10.1029/2011GL048701, doi:10.1029/2011GL048701.
- Yamashiki, Y., Onda, Y., Smith, H.G., Blake, W.H., Wakahara, T., Igarashi, Y., Matsuura, Y., Yoshimura, K., 2014. Initial flux of sediment-associated radiocesium to the ocean from the largest river impacted by Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. Scientific Reports 4, 3714. URL: https://www.nature.com/articles/srep03714, doi:10.1038/srep03714.
- Yasutaka, T., Iwasaki, Y., Hashimoto, S., Naito, W., Ono, K., Kishimoto, A., Yoshida, K., Murakami, M., Kawaguchi, I., Oka, T., Nakanishi, J., 2013. A GIS-based evaluation of the effect of decontamination on effective doses due to long-term external exposures in Fukushima. Chemosphere 93, 1222–1229. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045653513009405, doi:10.1016/j.chemosphere.2013.06.083.
- Zhao, D., 2015. The 2011 Tohoku earthquake (Mw 9.0) sequence and subduction dynamics in Western Pacific and East Asia. Journal of Asian Earth Sciences 98, 26–49. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1367912014004799, doi:10.1016/j.jseaes.2014.10.022.