

# Suivi de la dispersion de la contamination radioactive dans les rivières de Fukushima

Olivier Evrard et de nombreux collègues au Japon et en France



Lundis de l'OHM

10 janvier 2022



Post-Fukushima Studies



Fukushima University  
INSTITUTE OF  
ENVIRONMENTAL  
RADIOACTIVITY



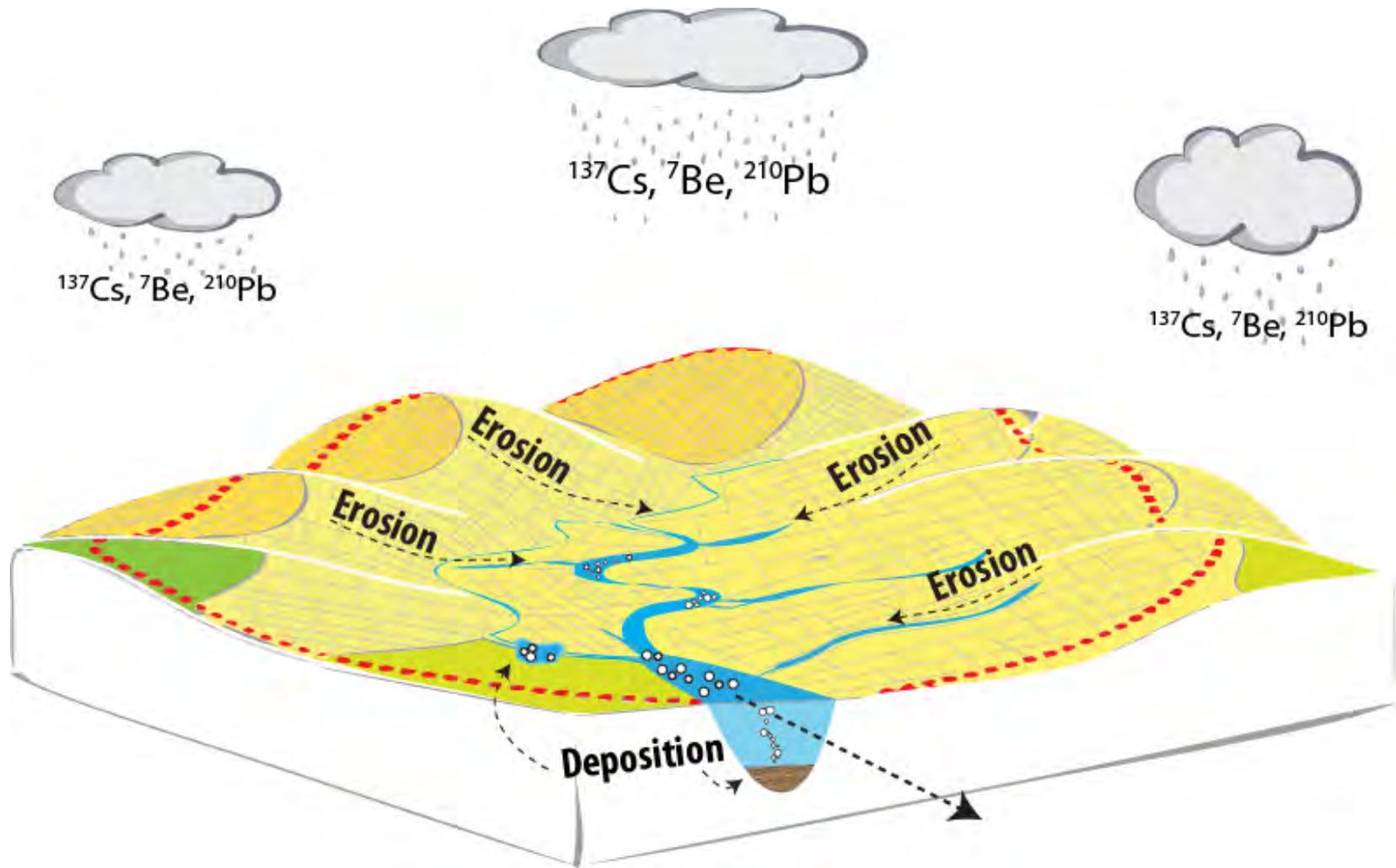
LSCE



University of Tsukuba  
筑波大学

LABORATOIRE DES SCIENCES DU CLIMAT & DE L'ENVIRONNEMENT

# L'érosion des sols dans les bassins cultivés



# Le césium-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) est notre traceur privilégié

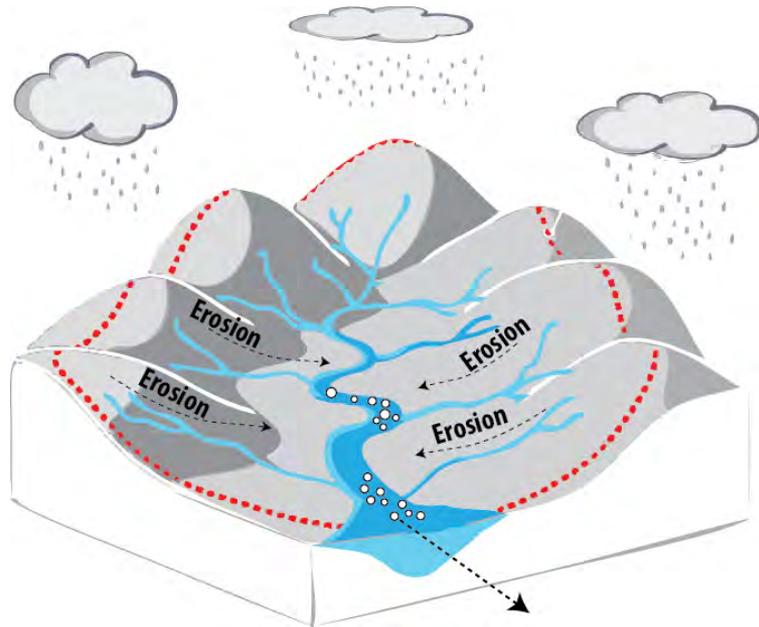


**Demi-vie de 30 ans pertinente pour l'étude des processus environnementaux**

**Bonne connaissance de l'historique et de la distribution spatiale des retombées**

**Fixation rapide et presque irréversible aux particules fines**

**Traceur de la redistribution des particules le long des versants et dans les bassins-versants**



# Accident nucléaire de Fukushima Dai-ichi (mars 2011)



Source: Reuters (2011)

**14-16 mars 2011.** Explosions d'hydrogène affectant plusieurs réacteurs de la centrale et libérant des radionucléides dans l'environnement

**11 mars à 14:46** – Séisme (magnitude > 9) au large des côtes orientales du Japon

**15:30** - Tsunami (vagues ~15m) conduisant à la perte des systèmes de refroidissement de la centrale Fukushima Dai-ichi



(Source: The Telegraph, 2011)



# Relevés aéroportés menés en avril 2011



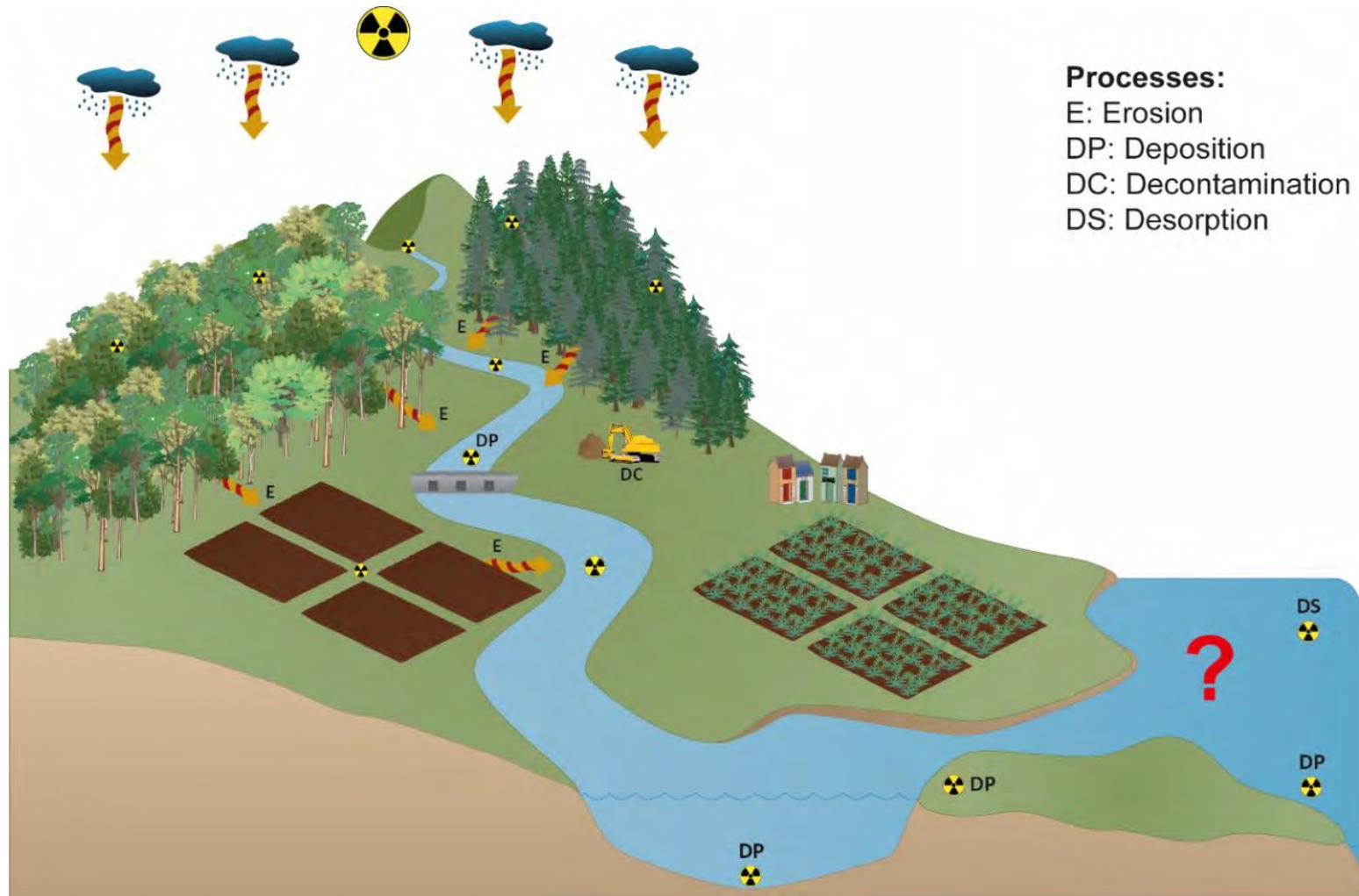
Dépôts totaux de  $^{134}\text{Cs}$  et  $^{137}\text{Cs}$   
en Bq/m<sup>2</sup>

Relevés DoE et MEXT (avril 2011)  
toujours disponibles en ligne:

<https://radioactivity.nsr.go.jp/>

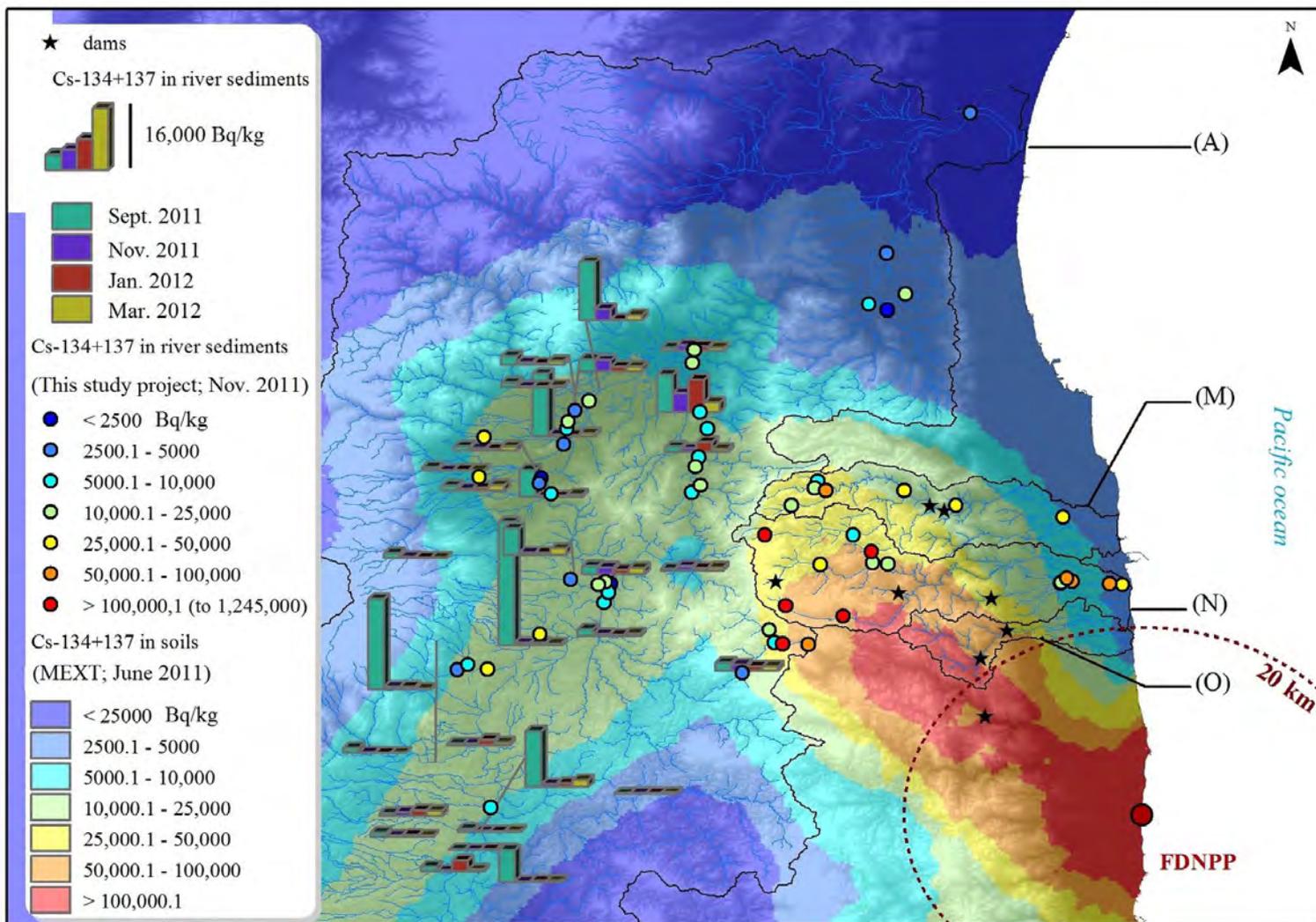
Emissions d'iode-131 ( $^{131}\text{I}$ ) qui ont  
décru rapidement ( $t_{1/2} = 8$  jours)

# Quantification de la redistribution post-accidentelle du $^{137}\text{Cs}$ dans les bassins côtiers de Fukushima



Evrard et al. (2015)

# Redistribution de la contamination radioactive par les rivières

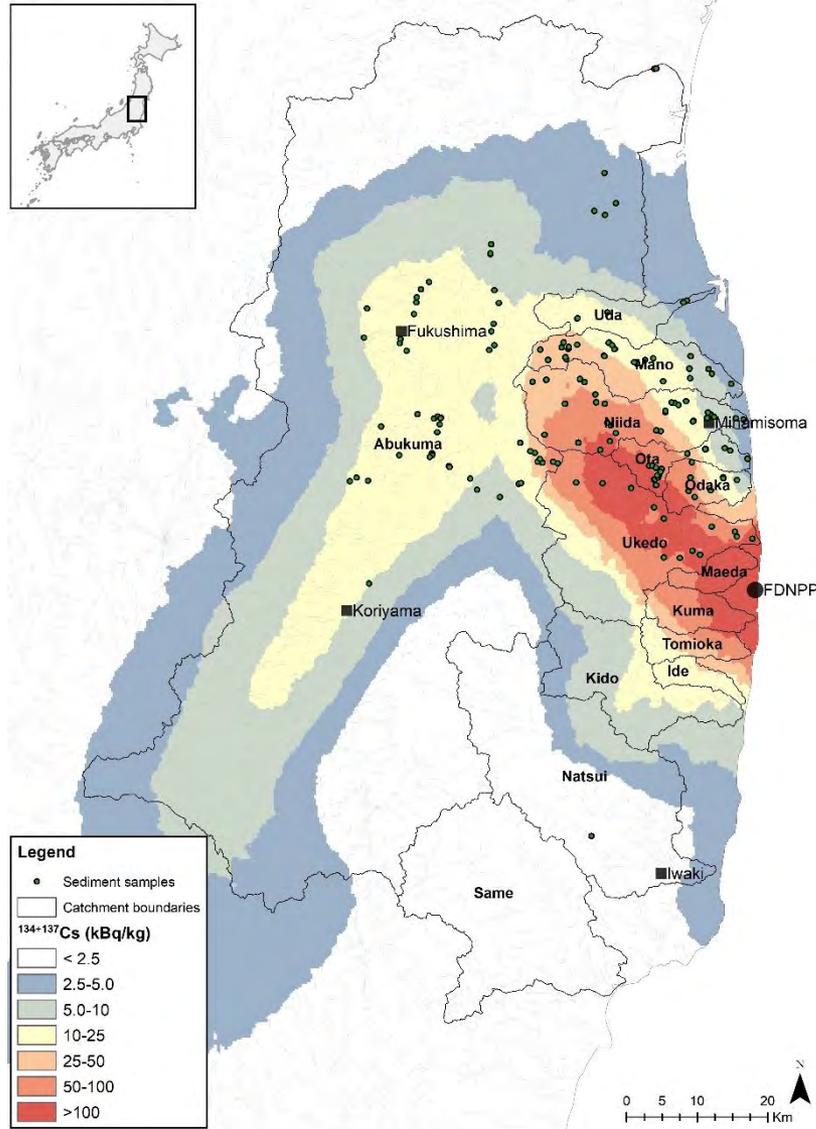


Activités en  $^{134}\text{Cs}$  et  $^{137}\text{Cs}$  dans les sédiments mesurées par le MoE – Japon (*bâtonnets*) et le LSCE (*cercles*)

*Chartin et al. (2013)*



# Evolution des concentrations en $^{137}\text{Cs}$ dans les sédiments des rivières côtières de Fukushima



Suivi des dépôts de laisses de crue depuis 2011



16 campagnes de terrain à ce jour

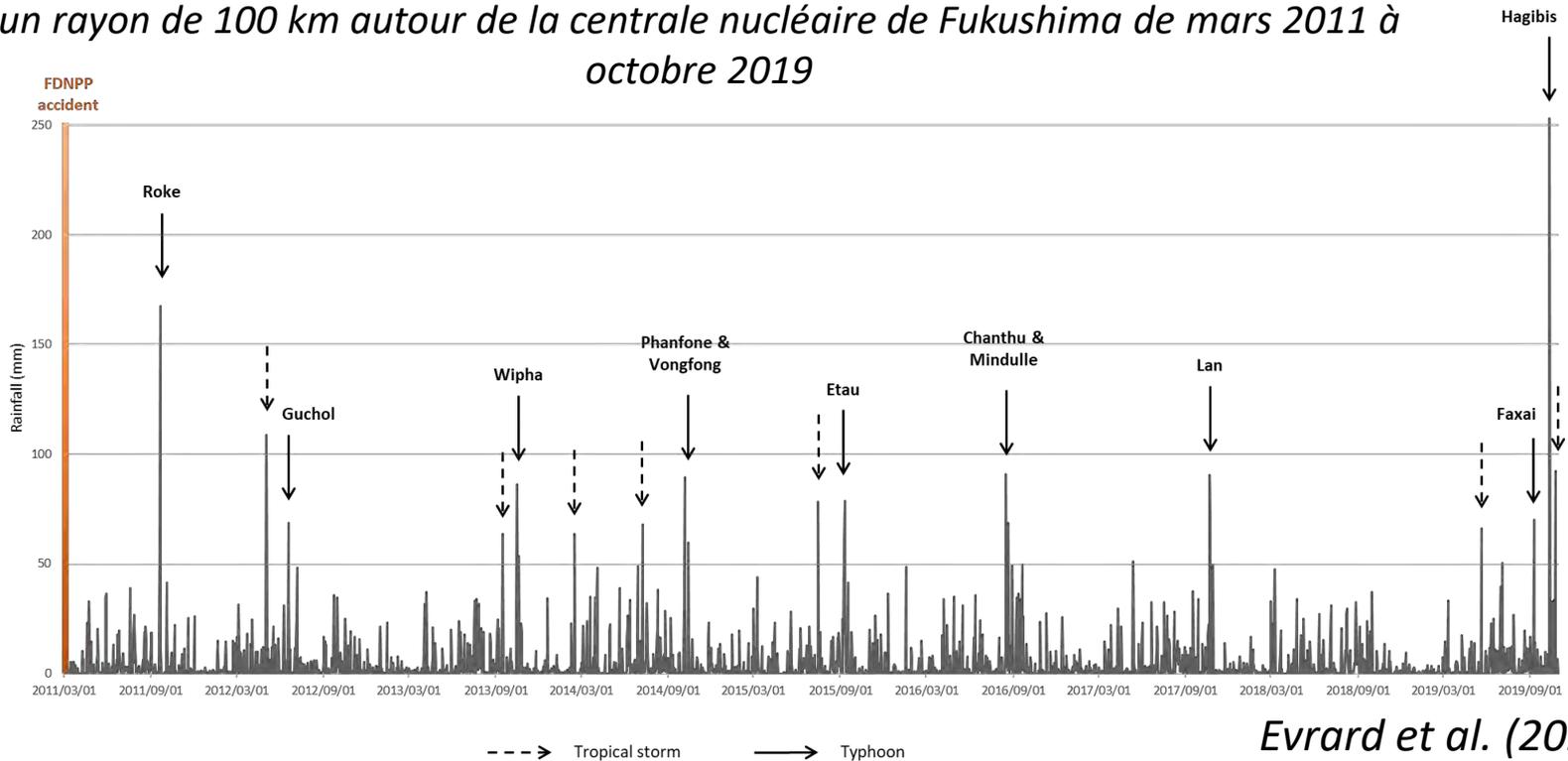
<https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.928594>

# Une pluviométrie marquée par les typhons



Dégâts du typhon Hagibis (octobre 2019)

Moyenne des précipitations journalières de 38 stations météorologiques localisées dans un rayon de 100 km autour de la centrale nucléaire de Fukushima de mars 2011 à octobre 2019

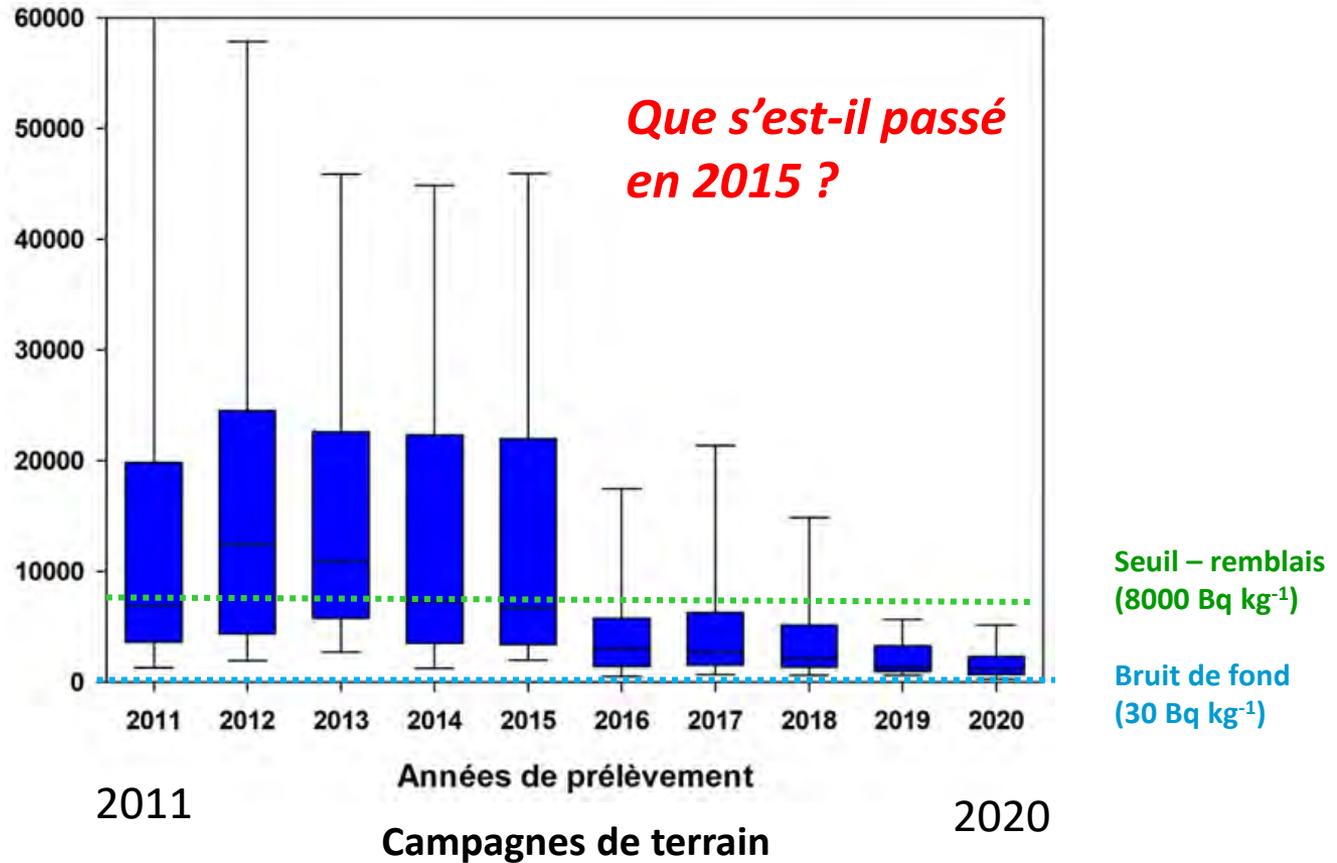


Evrard et al. (2020)

# Forte baisse des concentrations en $^{137}\text{Cs}$ dans les laisses de crue entre 2011 et 2020

Contamination des rivières

Concentrations en  $^{137}\text{Cs}$  dans les sédiments déposés par les crues ( $\text{Bq kg}^{-1}$ )

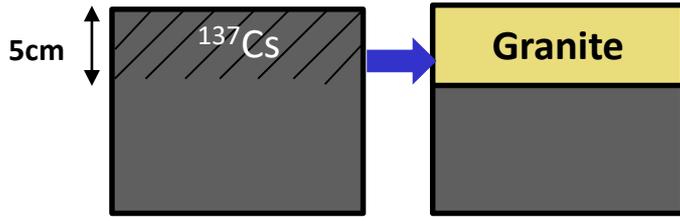


# Comment expliquer cette baisse?





# Impact de la décontamination des sols



Le sol superficiel concentrant le  $^{137}\text{Cs}$  a été remplacé par du **granite concassé**



- Baisse des niveaux de  $^{137}\text{Cs}$  de  $\sim 80\%$ ;
- 9000 km<sup>2</sup> traités, 20 millions de m<sup>3</sup> de déchets, coût estimé à 24 milliards d'€

*Evrard et al. (2019)*



# Où trouve-t-on aujourd'hui la contamination radioactive résiduelle?



Dans le réservoir des barrages

*Irrigation, pêche,...*

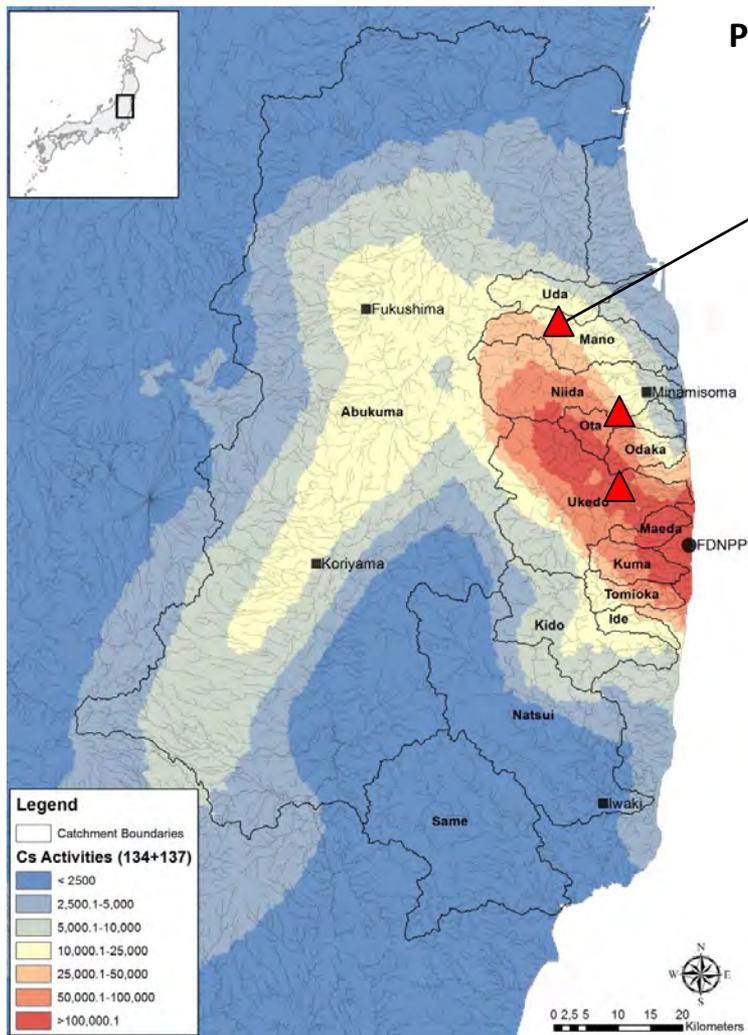


Dans les forêts

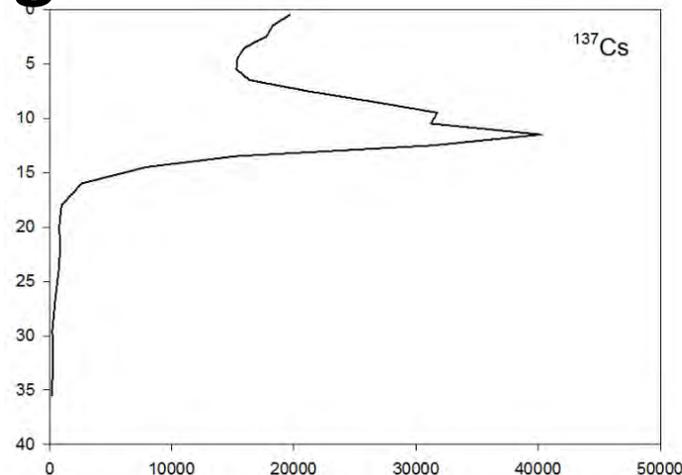
*Couvrent ~75% de la surface*



# Accumulation de sédiments contaminés dans le réservoir des barrages de Fukushima



Prof. (cm)



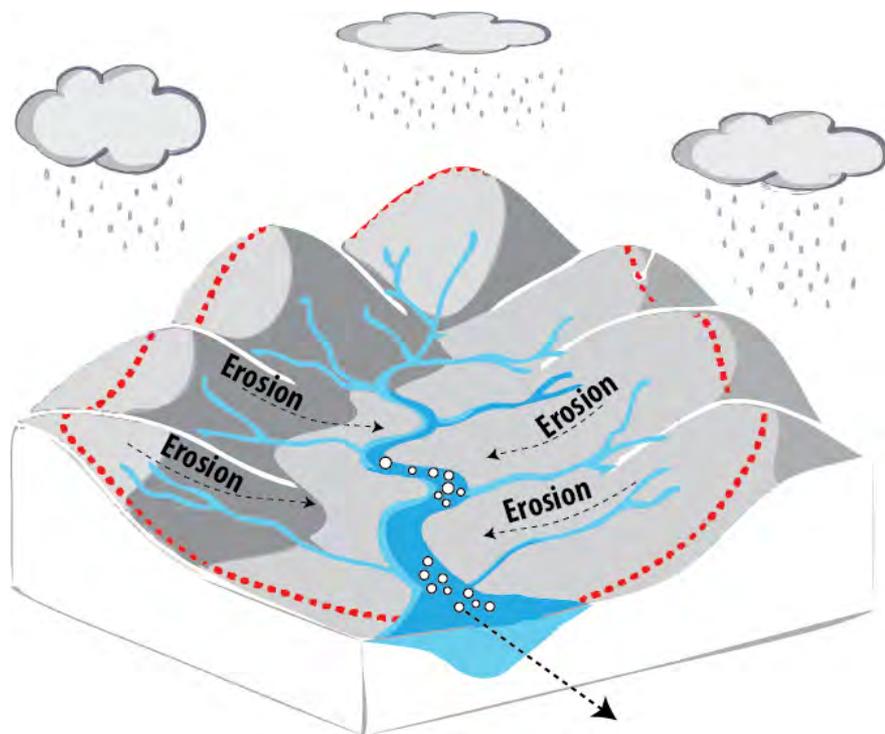
*Mano Dam*



**137Cs (Bq/kg)**



# Apport du traçage sédimentaire



1

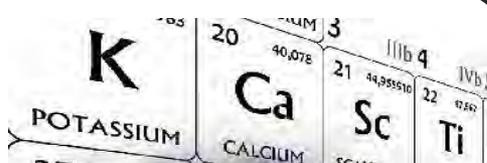
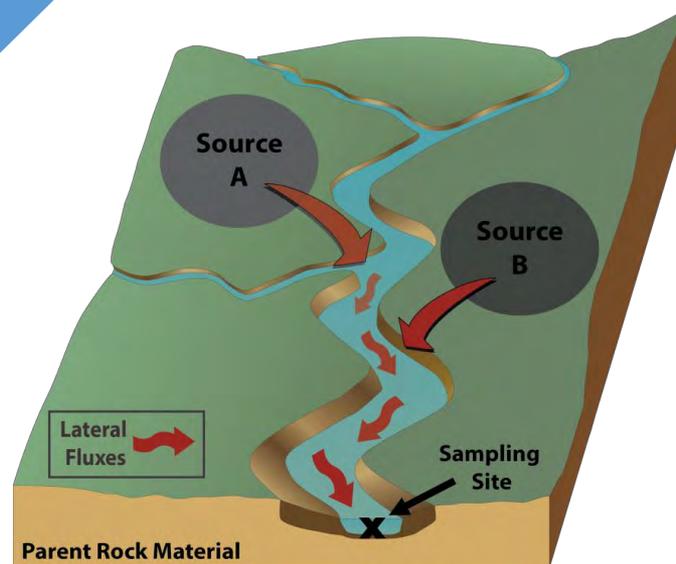
- Analyse de propriétés diagnostiques dans les sources et les sédiments

2

- Sélection de la combinaison optimale de traceurs discriminants

3

- Construction de modèles de mélange pour quantifier la contribution des sources



# D'où les sédiments qui s'accumulent dans le barrage proviennent-ils?



Forêts



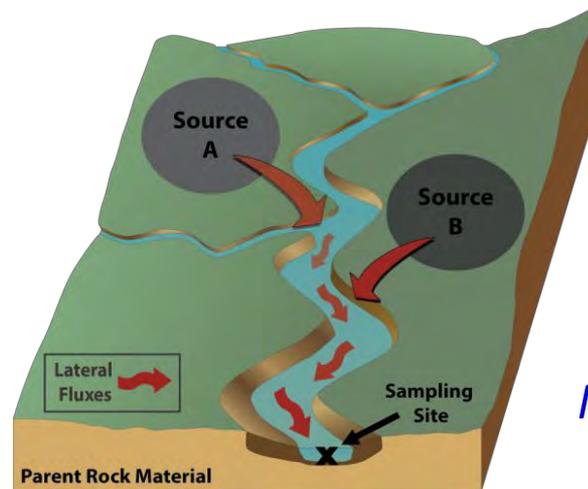
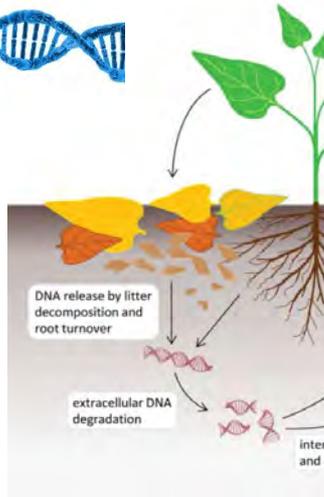
Zones cultivées



Glissements de terrain



ADN



Couleur

Matière organique, géochimie,...

Carteni et al. (2016),  
*Plant Signaling and Behaviour*

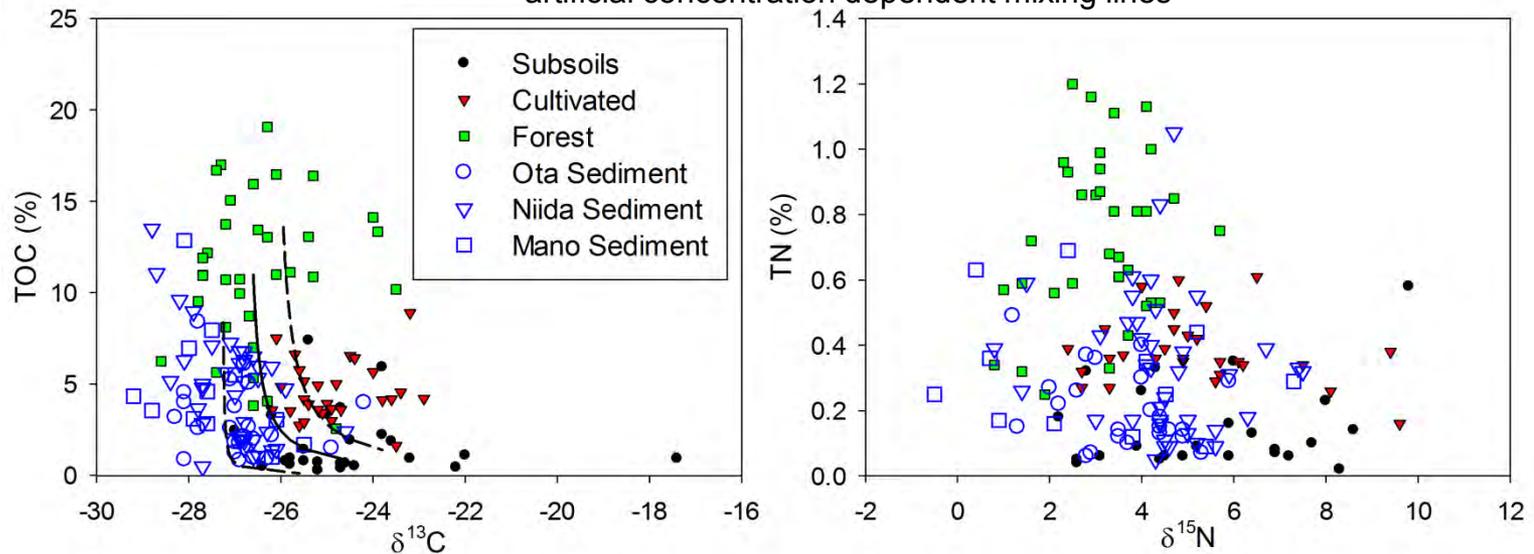
*Lacey et al. (2016); Evrard et al. (2019), etc.*



# D'où les sédiments qui s'accumulent dans le barrage proviennent-ils?



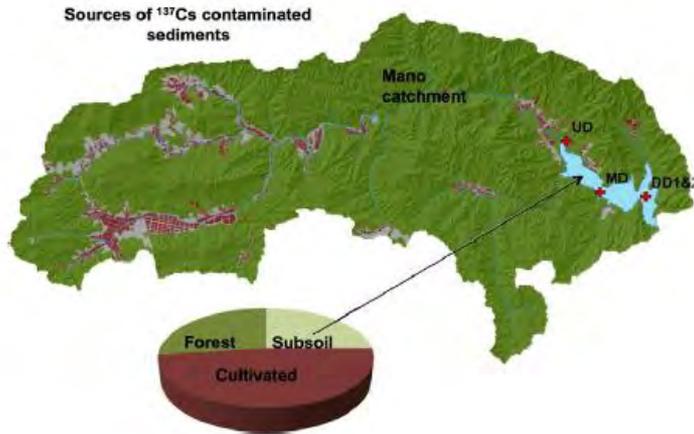
Sources and particulate matter parameters for the <math><63 \mu\text{m}</math> fraction with artificial concentration dependent mixing lines



Lacey et al. (2016)

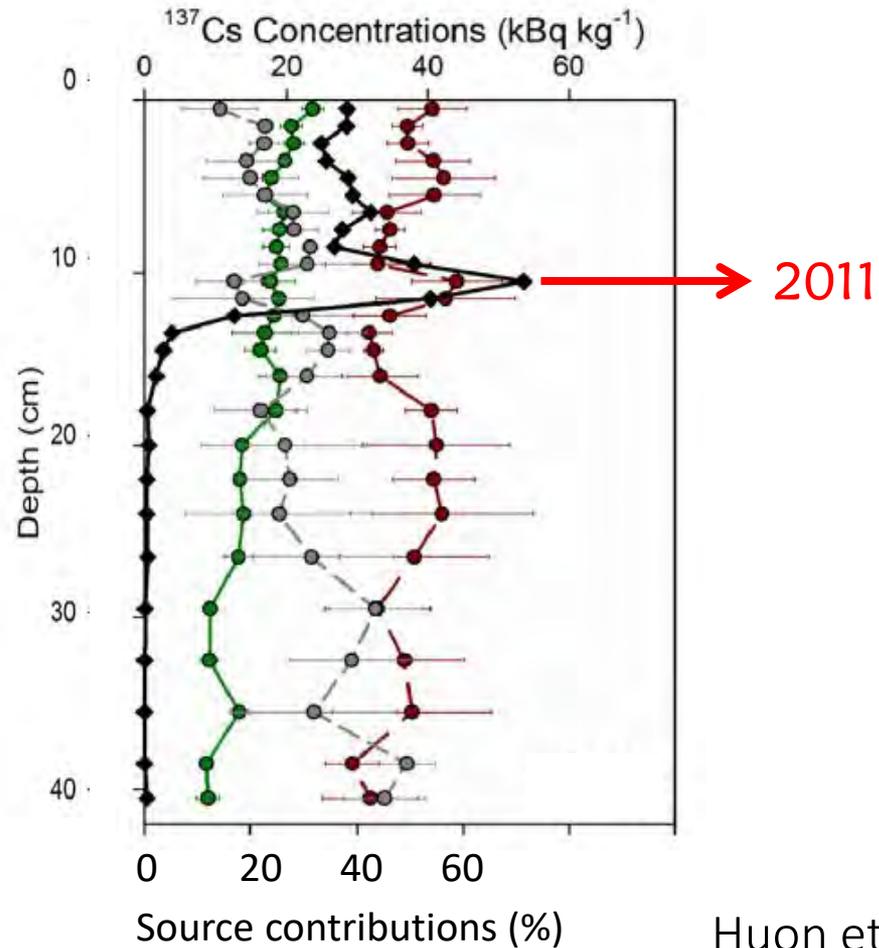


# D'où les sédiments qui s'accumulent dans le barrage proviennent-ils?



Sources de sédiments (%)

- Rizières/cultures
- Eboulements/berges
- Forêts



Huon et al. (2018)



# Traçage des sources de sédiments contaminés

Sols cultivés: 48% ( $\pm 10\%$ )



Forêts: 27% ( $\pm 10\%$ )

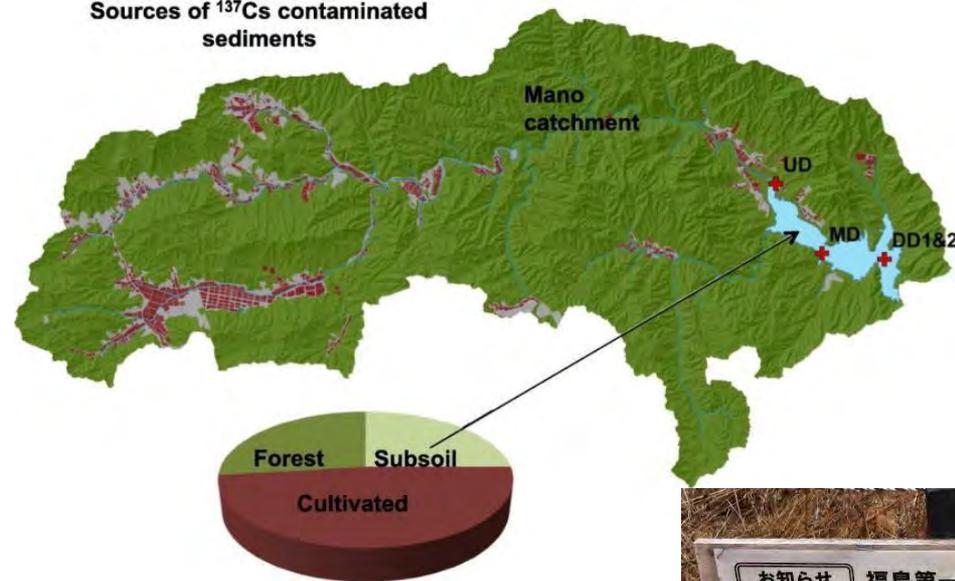


Glissements de terrain: 26% ( $\pm 8\%$ )



Mano Dam

Sources of  $^{137}\text{Cs}$  contaminated sediments

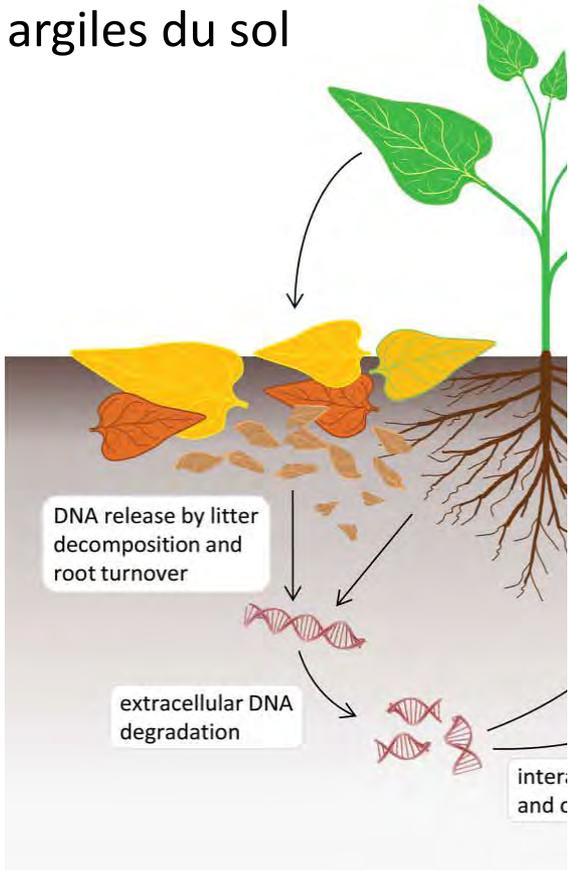


Huon et al. (2018)

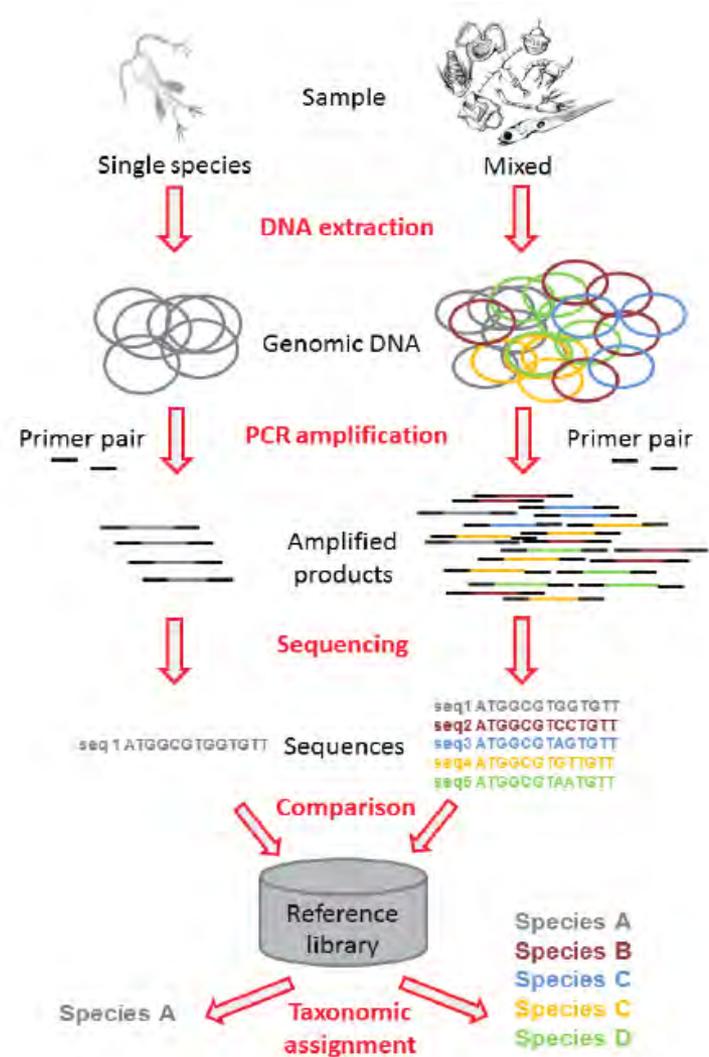
# Développement de nouveaux traceurs



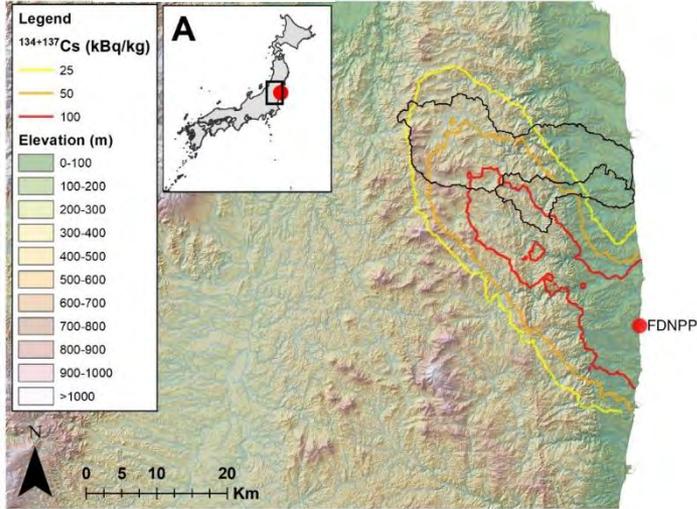
ADN extracellulaire des plantes qui se fixe aux argiles du sol



Carteni et al. (2016),  
*Plant Signaling and Behaviour*



# L'ADN environnemental comme traceur



**B**



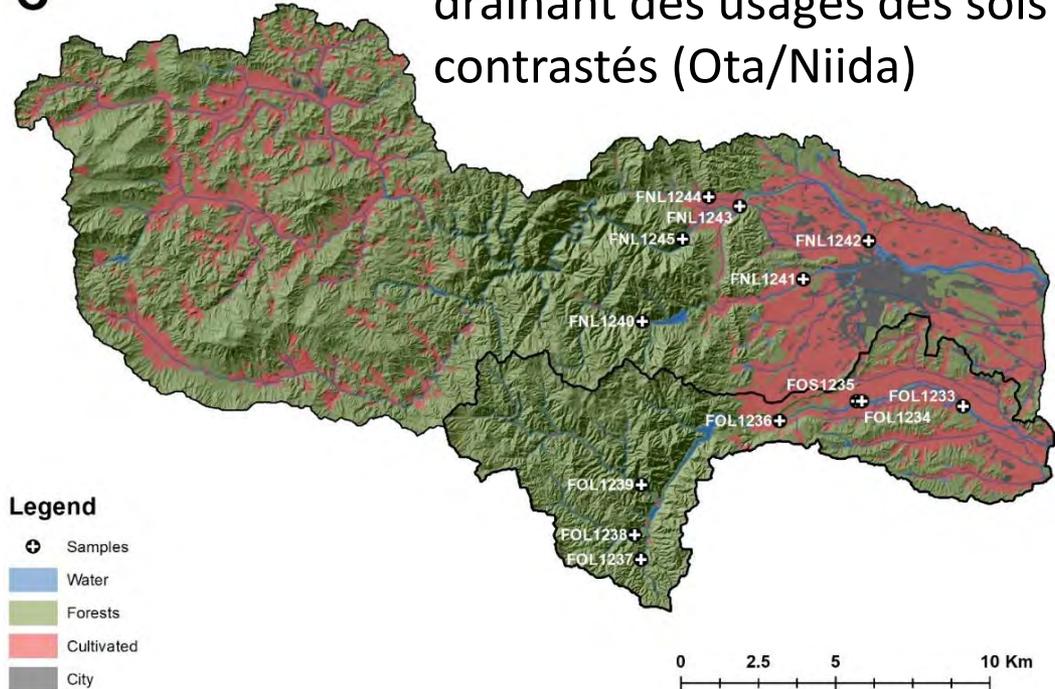
Short Communication

Environmental DNA provides information on sediment sources: A study in catchments affected by Fukushima radioactive fallout

Olivier Evrard<sup>a,\*,1</sup>, J. Patrick Lacey<sup>b,1</sup>, Gentile Francesco Ficetola<sup>c,d</sup>, Ludovic Gielly<sup>e</sup>, Sylvain Huon<sup>e</sup>, Irène Lefèvre<sup>a</sup>, Yuichi Onda<sup>f</sup>, Jérôme Poulenard<sup>g</sup>



**C**



Collecte de laisses de crue en juin 2017



# L'ADN environnemental comme traceur

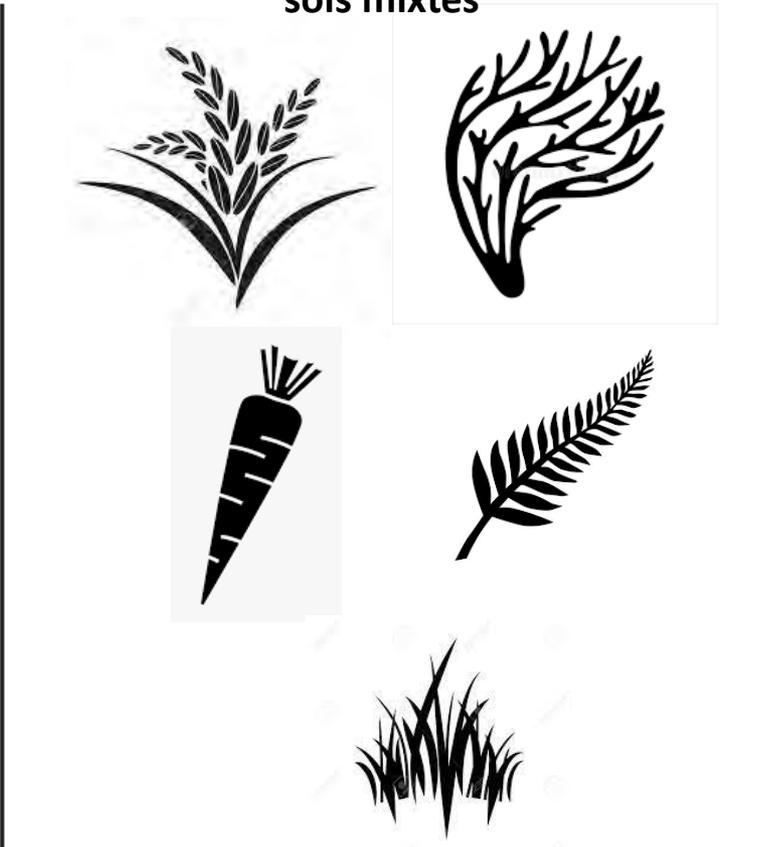


Cette méthode fournit une discrimination plus détaillée des sources.

Rivière drainant des zones  
cultivées



Rivière drainant des usages des  
sols mixtes



Rivière drainant des  
zones forestières



# L'ADN environnemental comme traceur



Difficultés inattendues dans les bassins de Fukushima

- Forte contribution des glissements de terrain aux sédiments



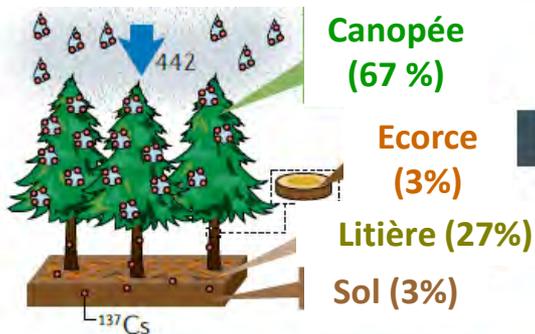
- Terres agricoles abandonnées après l'accident en 2011
- Dégradation de l'ADN dans les dépôts exposés à l'air libre



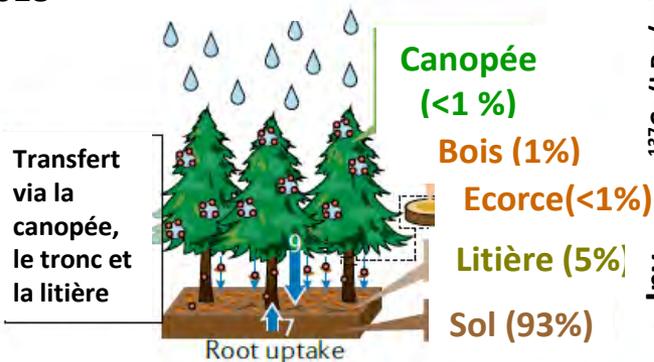
# Transferts de radionucléides dans les forêts

## Exemple du cèdre japonais

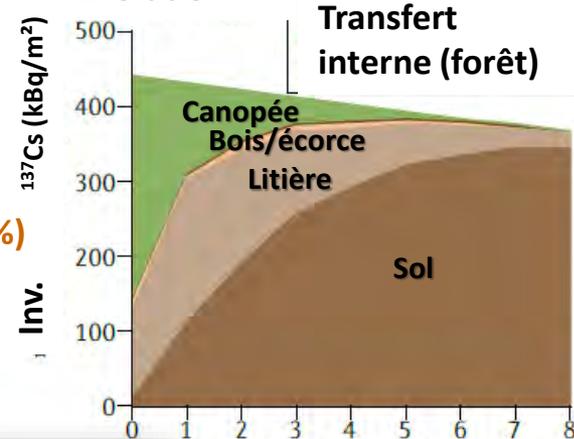
Retombées initiales (2011)



2018



Evolution



Années après l'accident

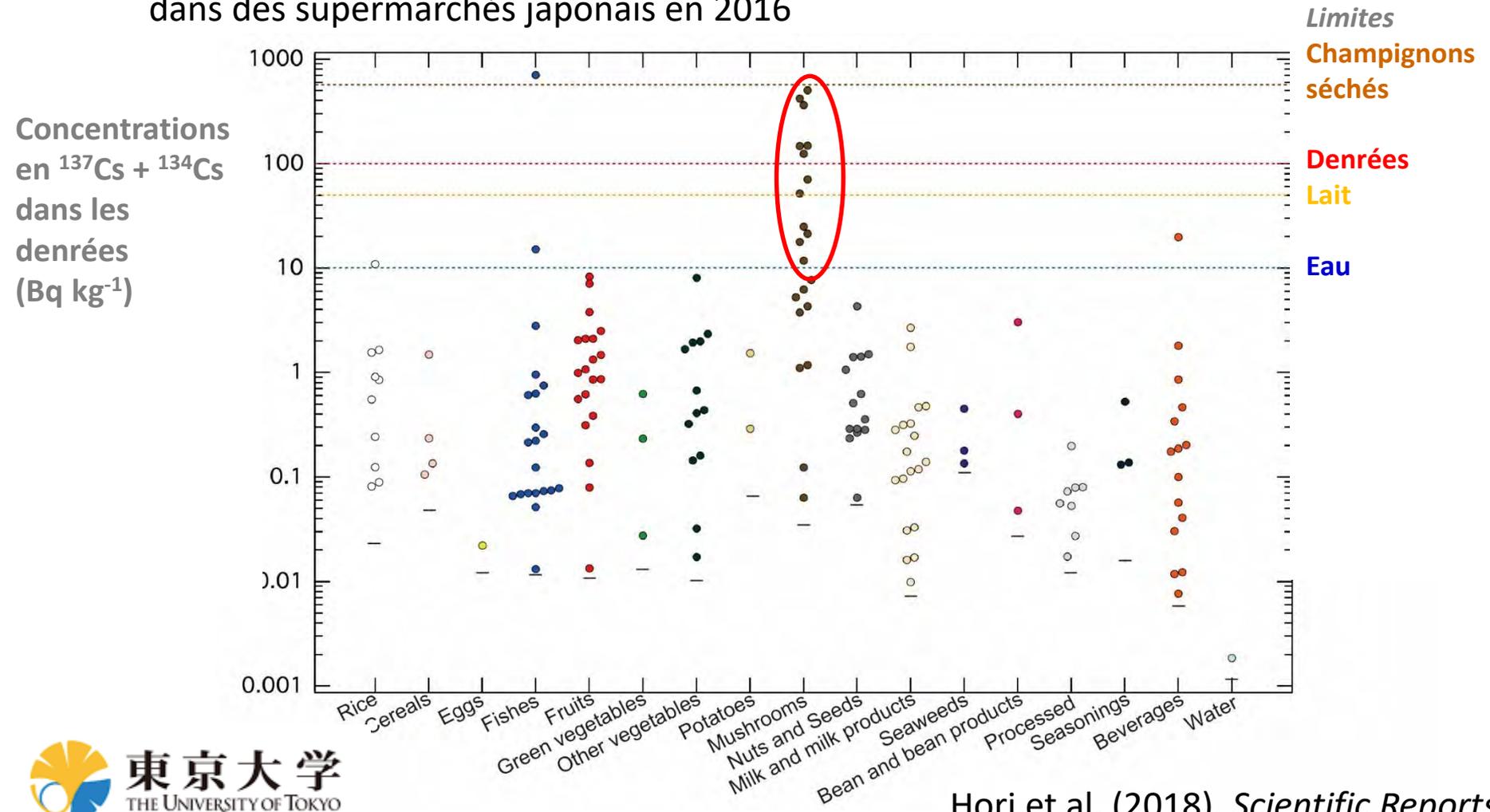
*Onda et al.,  
Nature Reviews (2020)*

Clichés pris après  
le typhon Hagibis  
(2019)



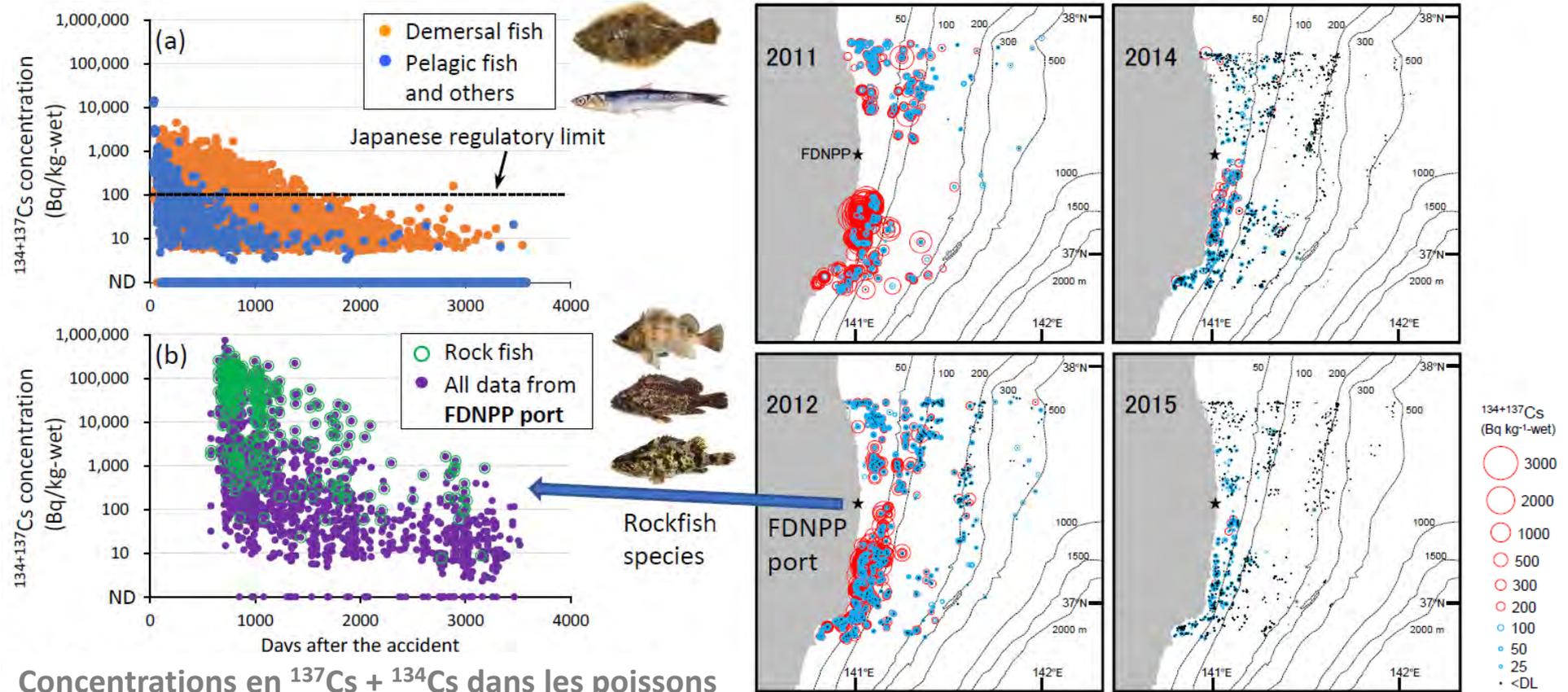
# Des questions sur l'alimentation

Analyse du  $^{137}\text{Cs}$  (et  $^{134}\text{Cs}$ ) dans 259 denrées alimentaires achetées en ligne ou dans des supermarchés japonais en 2016



# Des questions sur la pêche

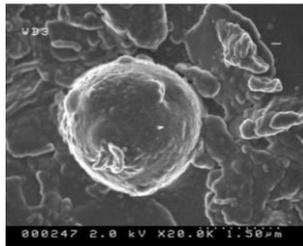
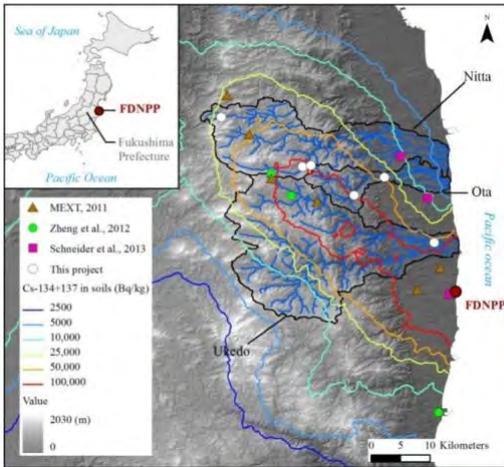
Données de contamination (a) de la Préfecture de Fukushima et (b) de TEPCO



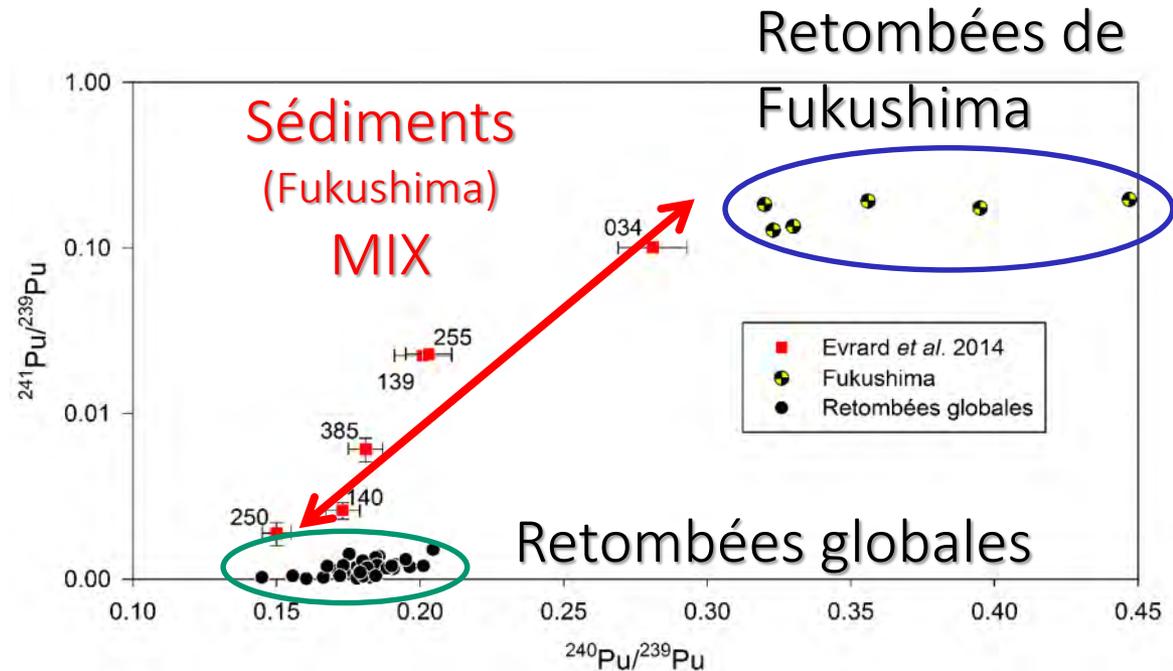
Wada et al. (2016)

# Y a-t-il d'autres isotopes plus rémanents ?

- Analyse des isotopes du plutonium par spectrométrie de masse (CEA/DAM).
- Détection d'**ultra-traces de Pu** dans les dépôts de crue des rivières de Fukushima



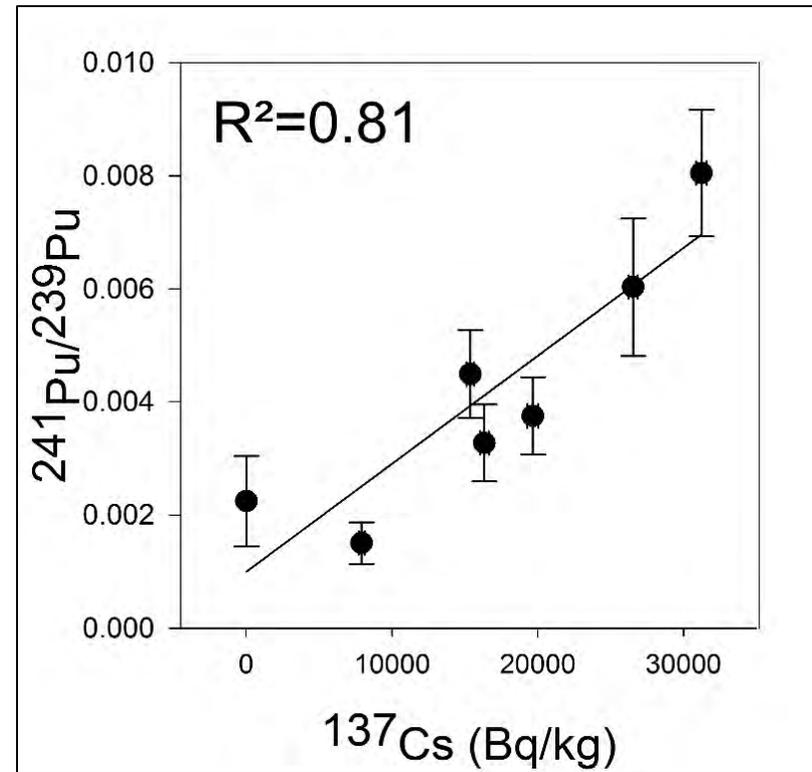
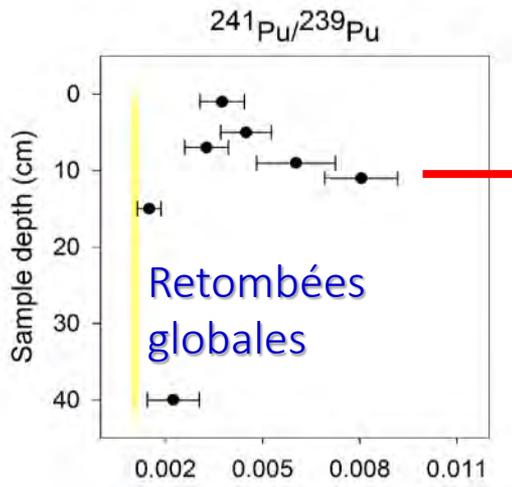
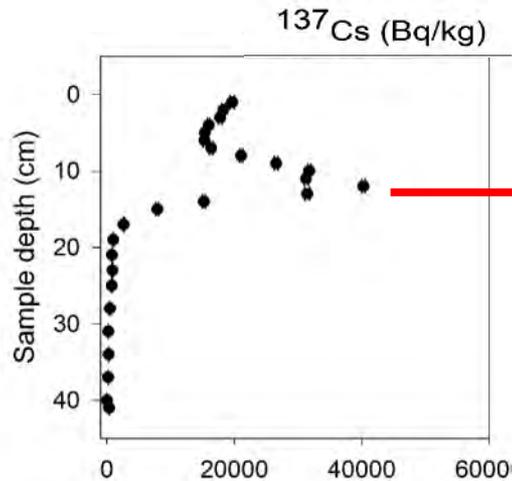
Yamaguchi et al. (2016)



Evrard et al., *ES&T* (2014)



# Comportement du plutonium dans les sédiments

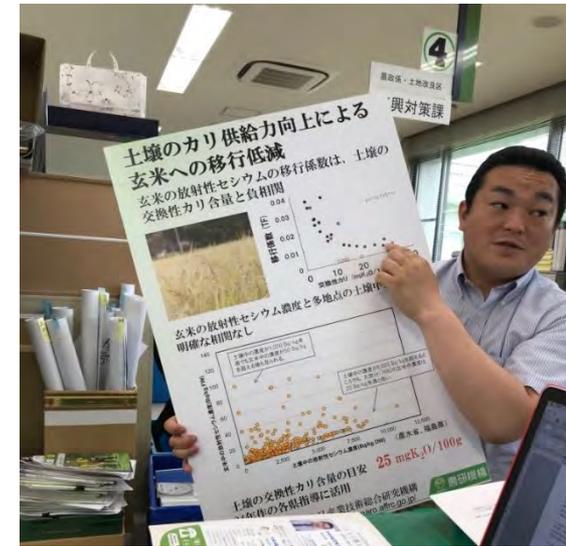


Jaegler et al. (2018)



# Des questions sur la reprise agricole

- Quid de la fertilité des sols?



- Transfert résiduel vers les plantes?



Riz  
Sarrasin  
etc.



Cultures  
non-  
alimentaires

# Impact du débordement d'une rivière dans des champs décontaminés

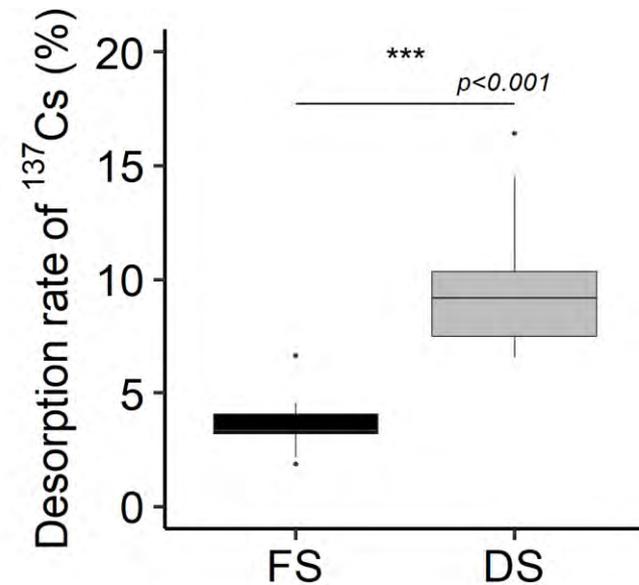
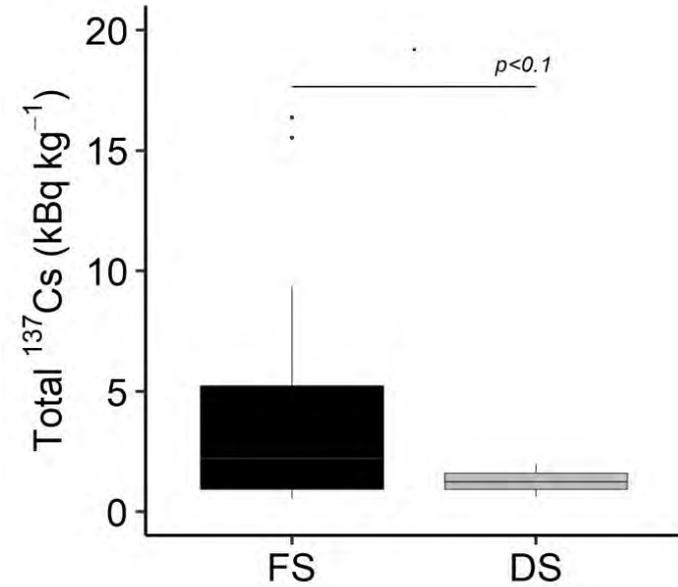
AVANT LE TYPHON



APRES LE TYPHON



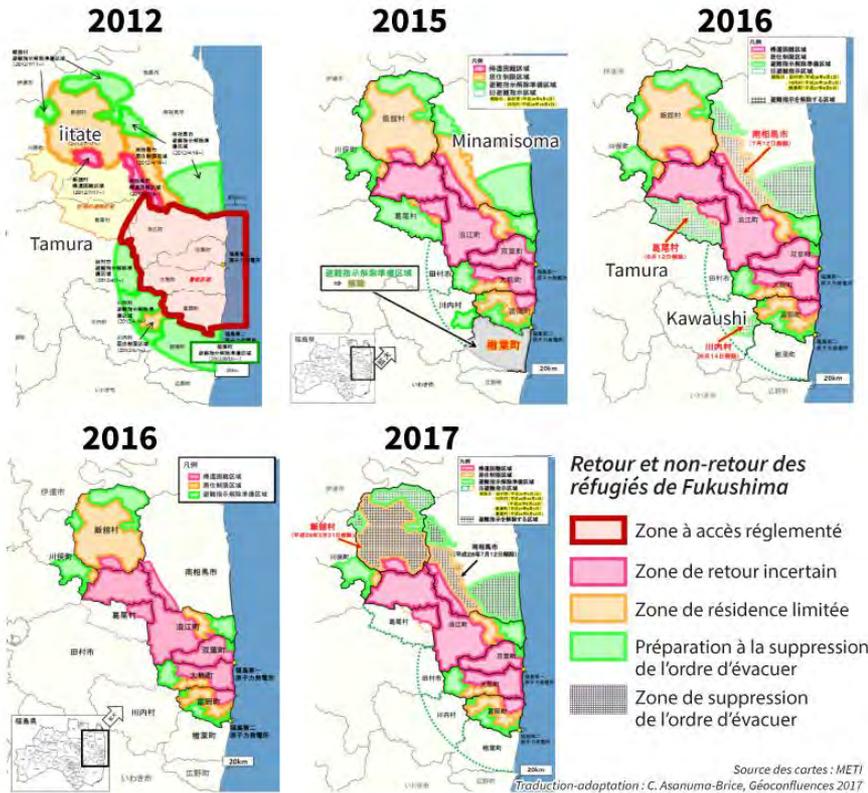
Dépôt de sédiments après une crue débordante



Asano et al. (*en cours d'évaluation*)



# Evolution des limites de la « zone difficile au retour »



Peu de gens sont rentrés après la réouverture (souvent <15%)

Les résidents les plus âgés sont rentrés

Défi pour la reprise (ex. agriculture)

**Réouverture progressive de la zone difficile au retour sans décontamination en 2023?**



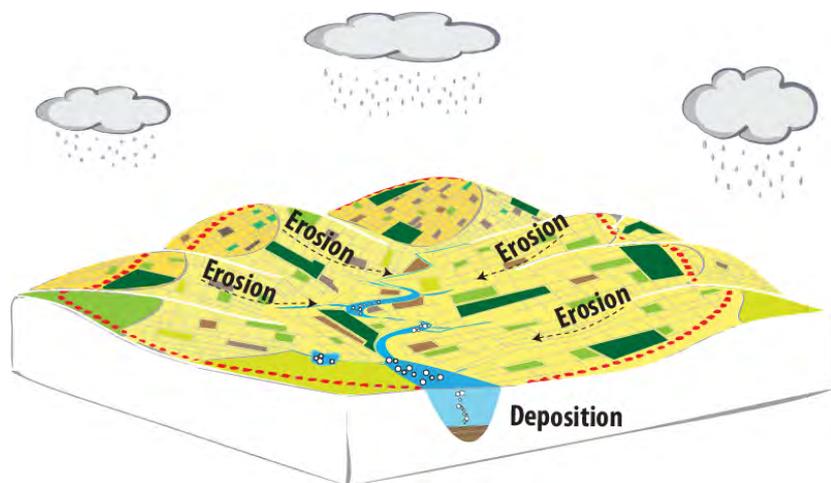
<http://mitatelab.cnrs.fr/>



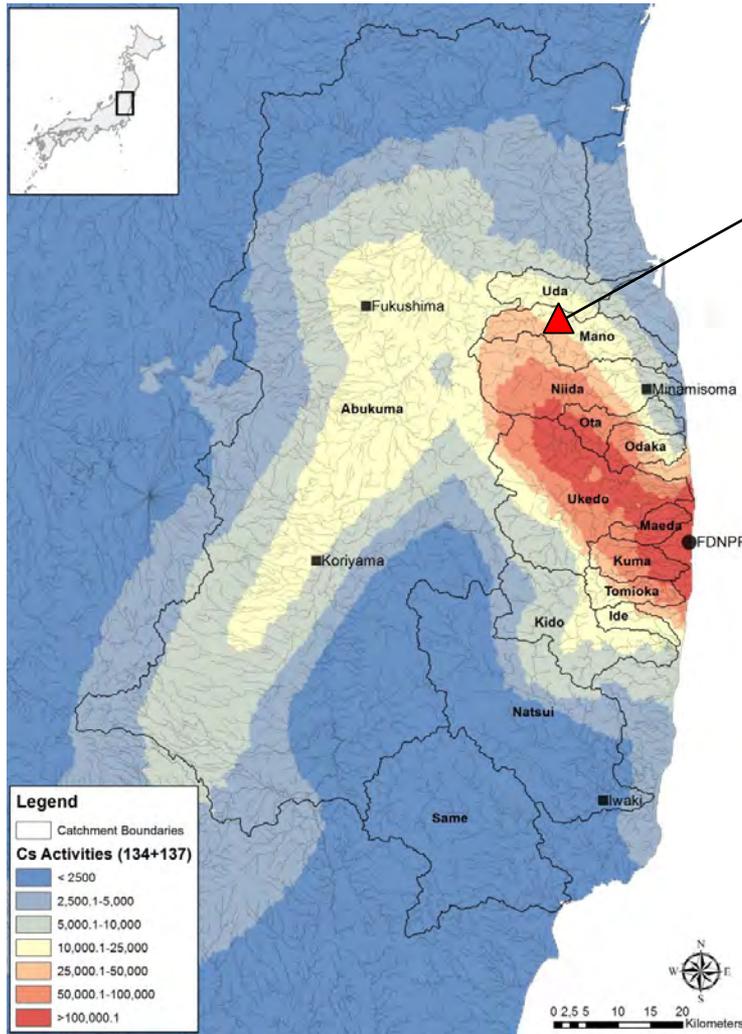
# De la phytoremédiation aux produits biosourcés



- Phytoremédiation classique peu efficace (Evrard et al., 2019)
- Sélection d'une espèce de Miscanthus sans transfert du  $^{137}\text{Cs}$  du sol vers les parties aériennes de la plante
- Protection du sol contre l'érosion
- Production de bioplastiques / bioénergie



# Activités de recherche en cours



Collecte d'archives sédimentaires dans le barrage de la Mano en juin 2021



Bassins versants **décontaminés**

Bassins versants **non-décontaminés**

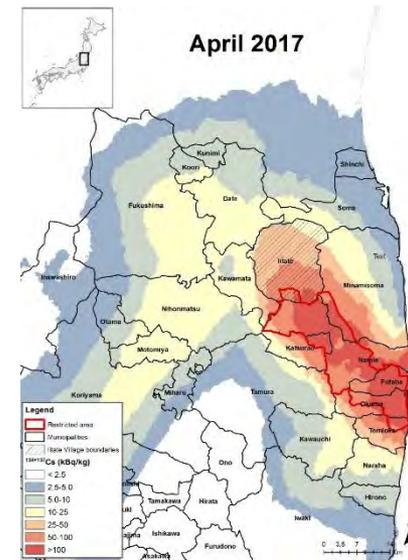


**COVID-19**  
CORONAVIRUS 2019-nCoV



# Conclusions et perspectives

- Les bassins côtiers drainant le panache radioactive initial ont connu des transferts massifs de contamination principalement lors des typhons
- Les sols cultivés – qui constituaient la principale source de contamination aux rivières – ont été décapés
- Le devenir des radionucléides résiduels provenant des forêts reste un défi
- Des incertitudes demeurent sur la reprise d'activités





**Merci pour votre attention!**  
**ありがとうございます**



<http://mitatelab.cnrs.fr/>



@EvrardOlivier



evrardol



olivier.evrard@cea.fr

# Emissions de radionucléides

**Nuclear Disaster**

## Comparison of Estimated Amounts of Released Radionuclides between Chernobyl and Fukushima Daiichi NPS Accidents

Nuclides	Half-life <sup>a</sup>	Boiling point <sup>b</sup> °C	Melting point °C	Release into the environment: PBq <sup>*</sup>		Fukushima Daiichi/ Chernobyl
				Chernobyl <sup>d</sup>	Fukushima Daiichi <sup>e</sup>	
Xenon (Xe)-133	5 days	-108	-112	6500	11000	1.69
<b>Iodine (I)-131</b>	<b>8 days</b>	<b>184</b>	<b>114</b>	<b>~1760</b>	<b>160</b>	<b>0.09</b>
<b>Cesium (Cs)-134</b>	<b>2 years</b>	<b>678</b>	<b>28</b>	<b>~47</b>	<b>18</b>	<b>0.38</b>
<b>Cesium (Cs)-137</b>	<b>30 years</b>	<b>678</b>	<b>28</b>	<b>~85</b>	<b>15</b>	<b>0.18</b>
Strontium (Sr)-90	29 years	1380	769	~10	0.14	0.01
Plutonium (Pu)-238	88 years	3235	640	$1.5 \times 10^{-2}$	$1.9 \times 10^{-5}$	0.0012
Plutonium (Pu)-239	24100 years	3235	640	$1.3 \times 10^{-2}$	$3.2 \times 10^{-6}$	0.00024
Plutonium (Pu)-240	6540 years	3235	640	$1.8 \times 10^{-2}$	$3.2 \times 10^{-6}$	0.00018

Ratio of radionuclides accumulated in the reactor core at the time of the accidents that were released into the environment

Nuclides	Chernobyl <sup>f</sup>	Fukushima Daiichi <sup>g</sup>
Xenon (Xe)-133	Nearly 100%	Approx. 60%
Iodine (I)-131	Approx. 50%	Approx. 2-8%
Cesium (Cs)-137	Approx. 30%	Approx. 1-3%

\*PBq equals 1015Bq.

Sources: a: ICRP Publication 72 (1996); b and c (except for Np and Cm): Rikagaku Jiten 5th edition (1998); d: UNSCEAR 2008 Report, Scientific Annexes C, D and E; e: Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety (June 2011); f: UNSCEAR 2000 Report, ANNEX J; g: UNSCEAR 2013 Report, ANNEX A

<https://www.env.go.jp/en/chemi/rhm/basic-info/1st/02-02-05.html>

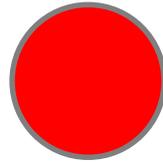


# Emissions accidentelles de radionucléides

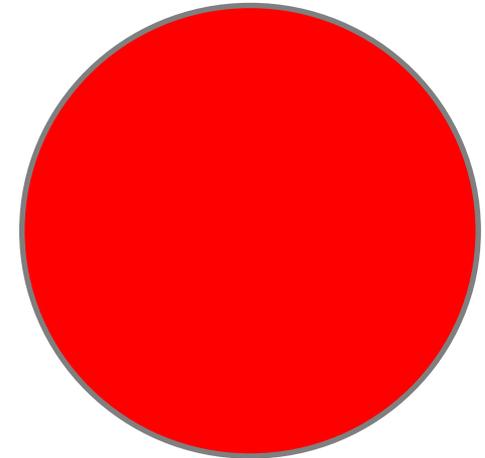
Dépôts totaux estimés de  $^{137}\text{Cs}$  en PBq ( $10^{15}\text{Bq}$ )



20 PBq  
Fukushima  
(6 PBq sur les  
terres)

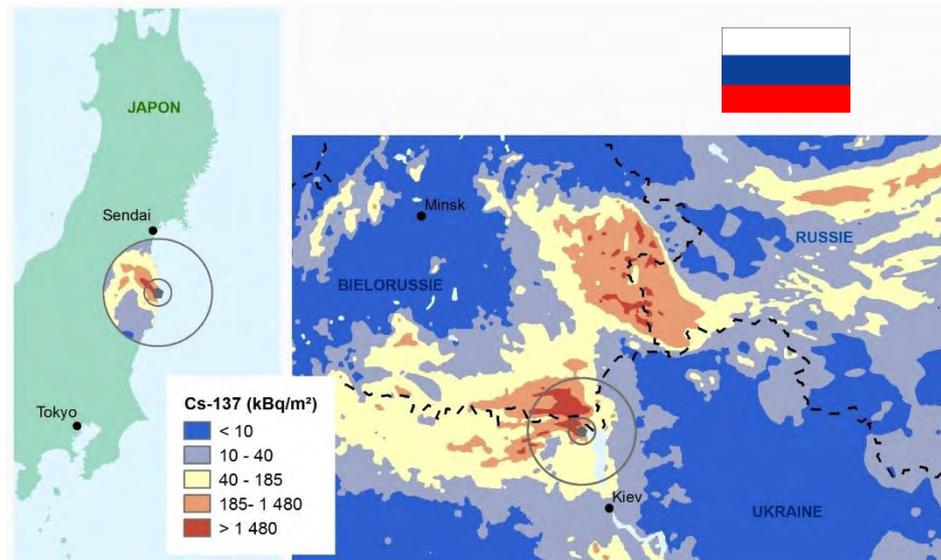


85 PBq  
Tchernobyl



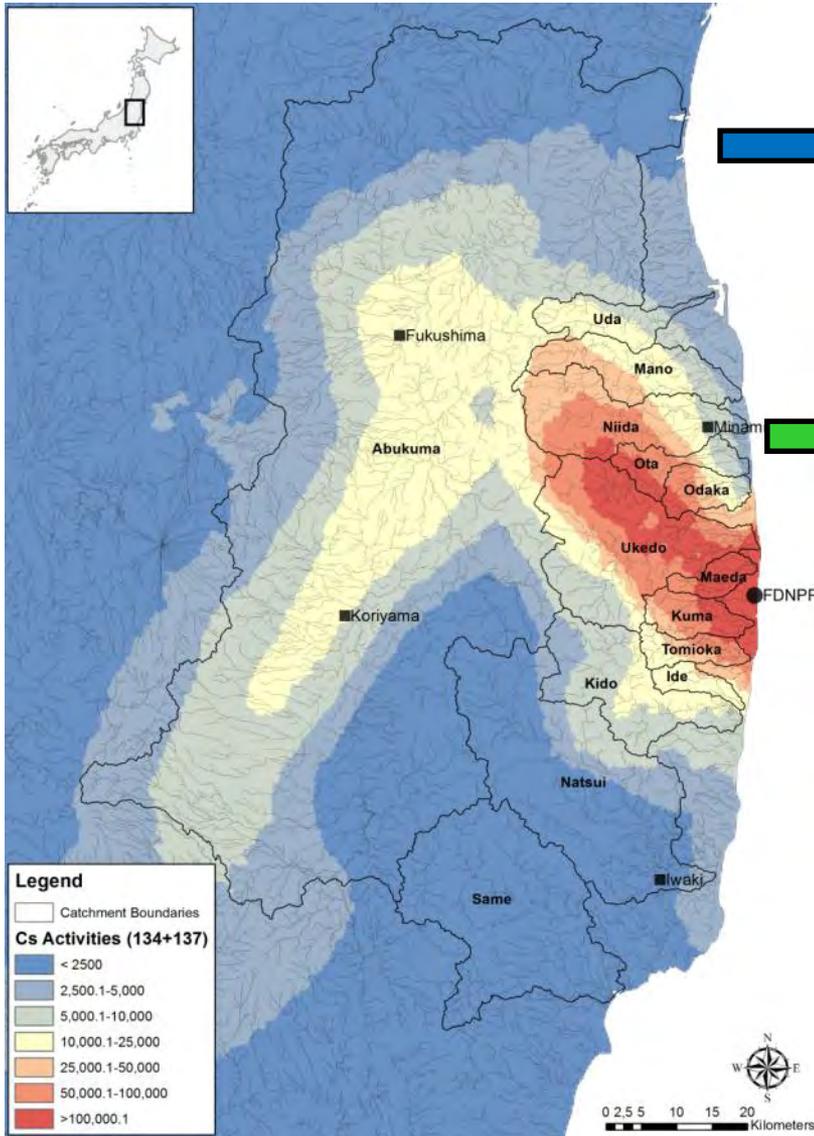
700 PBq  
Retombées globales  
(Hémisphère Nord)

*Aoyama et al. (2020)*



*Carte réalisée à partir des  
données de l'atlas  
européen (1998) et des  
données MEXT (2011)*

# Exports de radiocésium vers le Pacifique



**Fleuve Abukuma**  
3–10 TBq an<sup>-1</sup>

(Kitamura et al., 2014; Yamashiki et al., 2014)



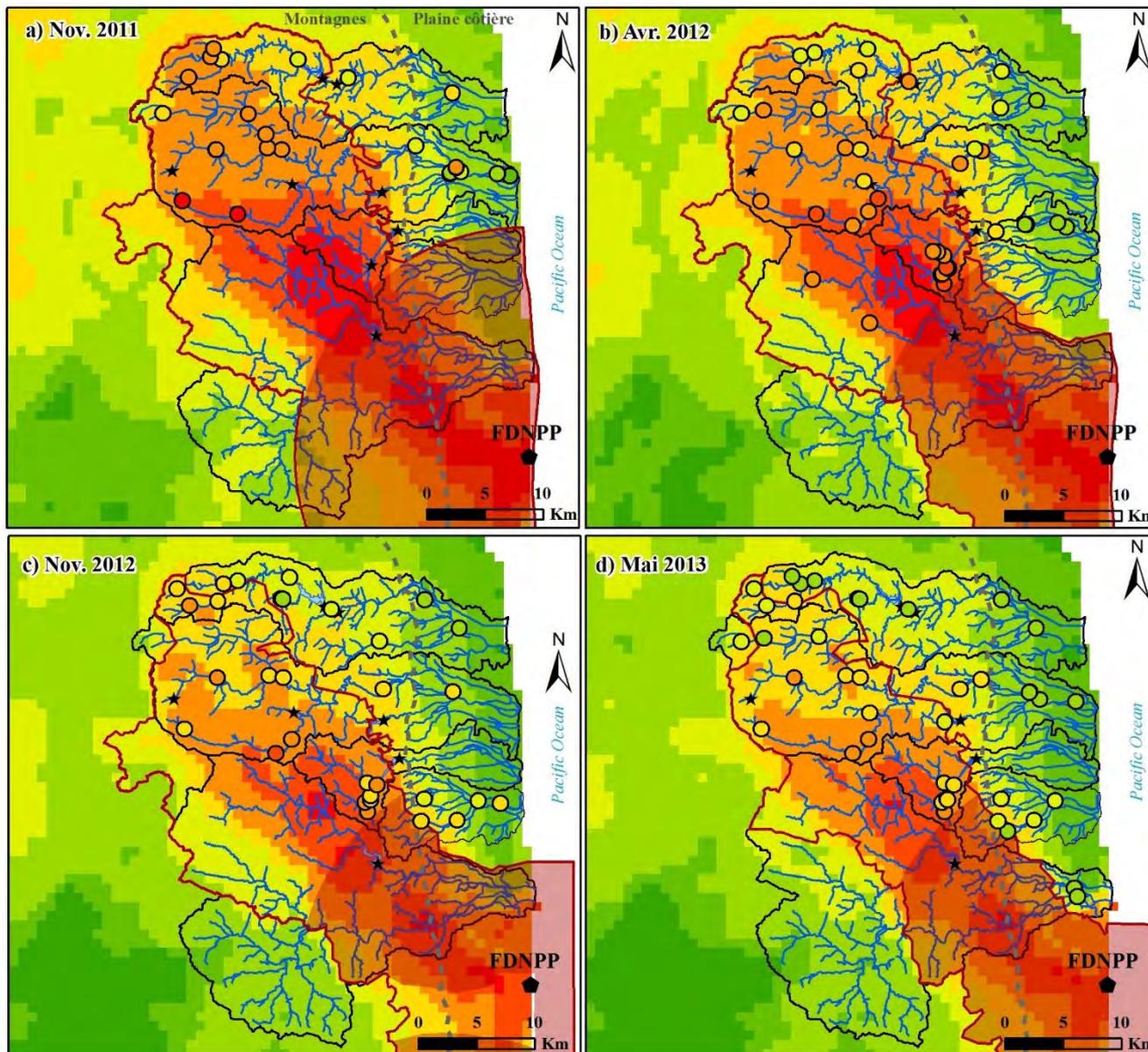
**Fleuves côtiers ~ 5 TBq an<sup>-1</sup>**  
(Kitamura et al., 2014)



**Emissions directes en mars 2011: 12–41 PBq**  
(Bailly du Bois et al., 2012)

**Fuites plus tardives**  
Juin 2011 – Sept 2012 : 17 TBq  
Août 2012: 24 TBq  
(Yamashiki et al., 2014)

$$1 \text{ TBq} = 10^{12} \text{ Bq}; 1 \text{ PBq} = 10^{15} \text{ Bq}$$



*Evrard et al. (2013)*

