

**IRSN**

INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

*Faire avancer la sûreté nucléaire*

# Les conséquences de l'accident de Fukushima sur l'environnement terrestre

Didier CHAMPION, Philippe RENAUD

11 juin 2013



*Congrès national 2013 - Bordeaux-Lac*

**Synthèse des travaux menés par l'IRSN depuis 2 ans sur l'accident de Fukushima et ses conséquences, présentée dans 3 articles de la revue Radioprotection :**

- ◆ CHAMPION et al. (2013). **The IRSN's earliest assessments of the Fukushima accident's consequences for the terrestrial environment in Japan.** Radioprotection, 48, pp 1137  
*doi:10.1051/radiopro/2012052*
- ◆ RENAUD et al. (soumis 2013). **Contamination of Japanese foodstuffs of terrestrial origin after the Fukushima nuclear accident and related dose assessments Part 1: foodstuff contamination.** Radioprotection
- ◆ RENAUD et al. (soumis 2013). **Contamination of Japanese foodstuffs of terrestrial origin after the Fukushima nuclear accident and related dose assessments Part 2: ingestion dose assessments for the first year after the accident.** Radioprotection

**Sujets abordés :**

- ◆ **Accident de Fukushima : les rejets atmosphériques et leur dispersion**
- ◆ **La formation des dépôts radioactifs et leur évolution depuis 2 ans**
- ◆ **Impact sur les productions agricoles et les denrées d'origine naturelle**

**Les conséquences dosimétriques potentielles sur les populations seront présentées à la session 3 (11 juin 14h)**

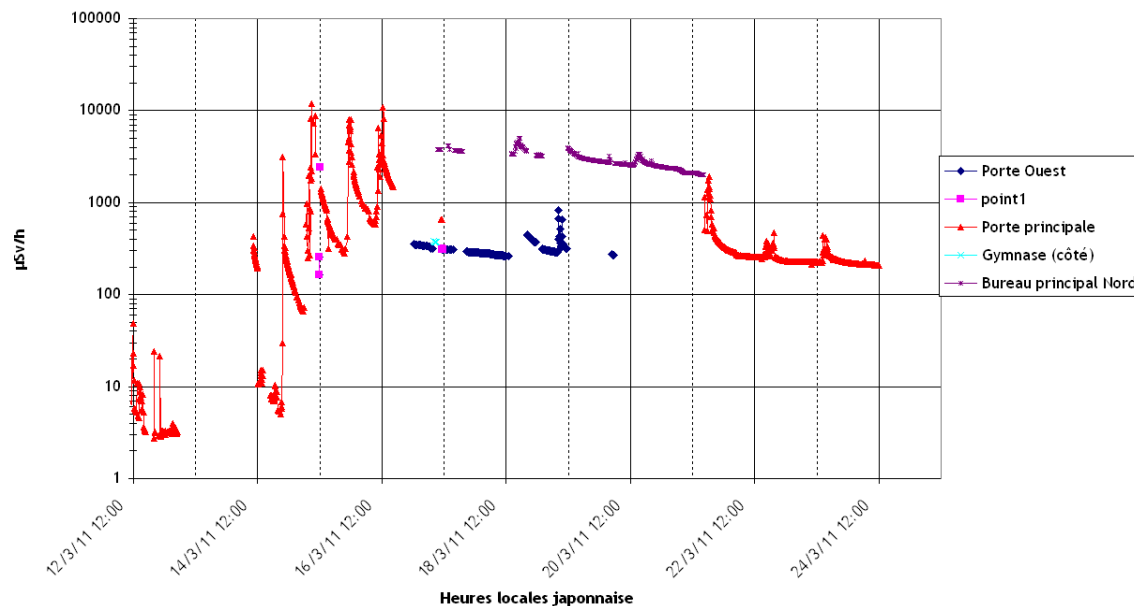
# Les rejets radioactifs dans l'air et leur dispersion atmosphérique



## Aspects méthodologiques

- ➔ Les rejets atmosphérique lors d'un accident ne se mesurent pas à la source mais s'évaluent de façon indirecte, à l'aide de données techniques « installation » et « environnement » ⇒ « **Terme source** »
- ➔ Pendant l'accident : recueil et interprétations des informations et données techniques venant du site de Fukushima Dai-ichi  
⇒ **Méthode « Diagnostic/pronostic » appliquée au CTC-IRSN**

Débit de dose ambiant mesuré en divers points du site de Fukushima Daiichi

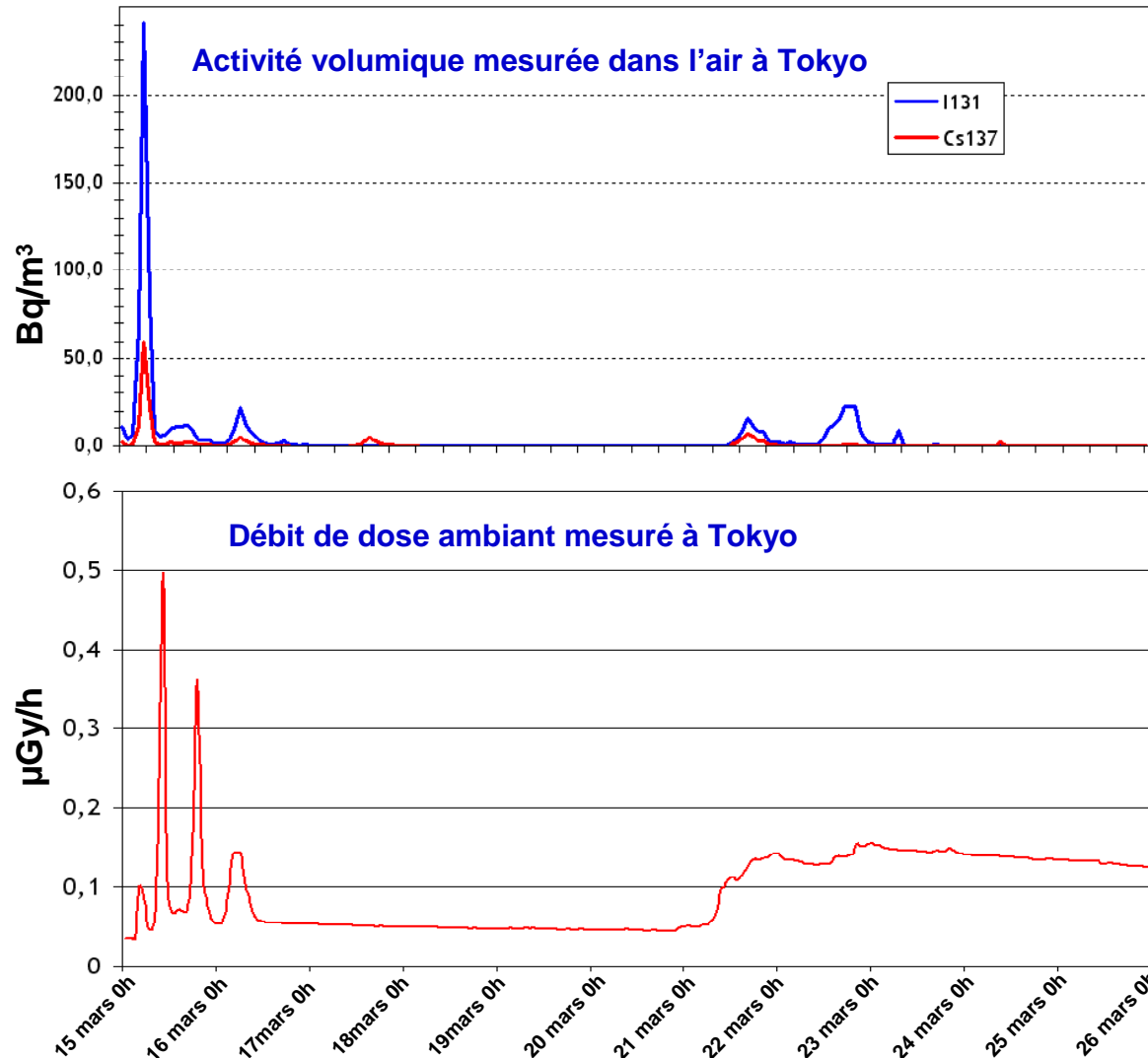


## Aspects méthodologiques

➔ Pendant et après l'accident : interprétation des données des balises de télémétrie du débit de dose ambiant et des stations de prélèvement d'aérosols distantes du site

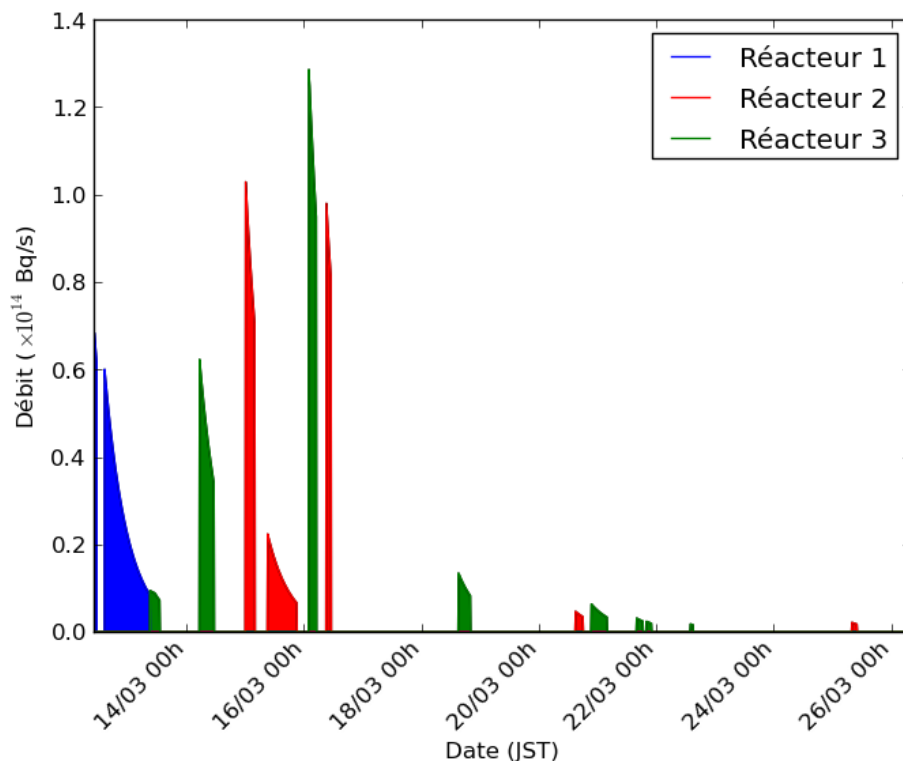
⇒ Ajustement du terme source en cohérence avec les observations environnementales

⇒ Développement de méthodes de modélisation inverse de la dispersion atmosphérique (travaux IRSN 2011-2012)



# Estimation des rejets radioactifs dans l'atmosphère

Catégorie de radionucléides	Pronostic IRSN-CTC du 12 mars 2011 (non publié)	Diagnostic IRSN-CTC du 22 mars 2011 (publié irsn.fr)	NISA (Nuclear and Industrial Safety Agency) Juin 2011	IRSN - Travaux 2011 (Mathieu et al. 2012)	IRSN Modélisation inverse (Saulnier et al. 2012)
Gaz rares	3400 PBq	2080 PBq	11000 PBq (Xe-133)	6550 PBq	12100 PBq (Xe-133)
Iodes / I-131	1300 PBq	182 PBq / 90 PBq	162 PBq / 160 PBq	408 PBq / 197 PBq	- / 103 PBq
Césiums / Cs-137	90 PBq	26 PBq / 10 PBq	33 PBq / 15 PBq	58 PBq / 21 PBq	- / 16 PBq
Tellures	500 PBq	76 PBq	5 PBq	145 PBq	-



**L'estimation des rejets atmosphériques reste imprécise pour les épisodes de rejet dispersés au-dessus du Pacifique (13-14 mars et 16-19 mars)**

⇒ Voir exposé de *Saunier et al.* de la session 3

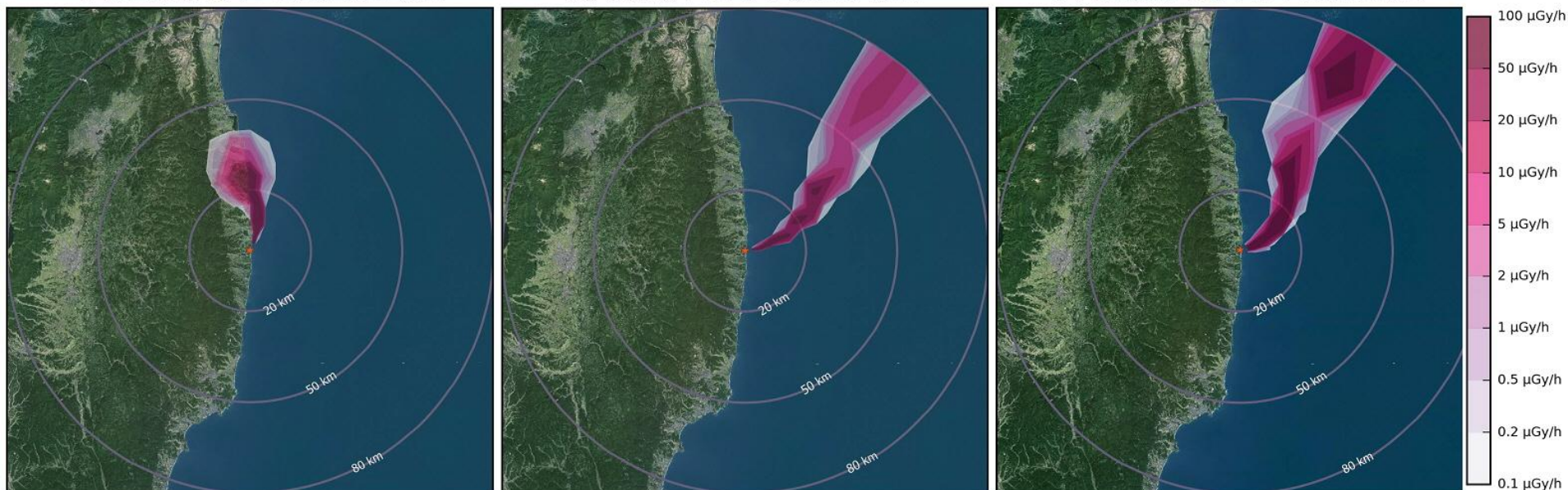
# Dispersion atmosphérique des rejets

Modélisation du débit de dose ambiant dû au panache radioactif (hors contribution des dépôts radioactifs - modèle IRSN pX - Echelle locale)

12 mars 2011 à 20h00 JST

13 mars 2011 à 6h00 JST

14 mars 2011 à 11h00 JST

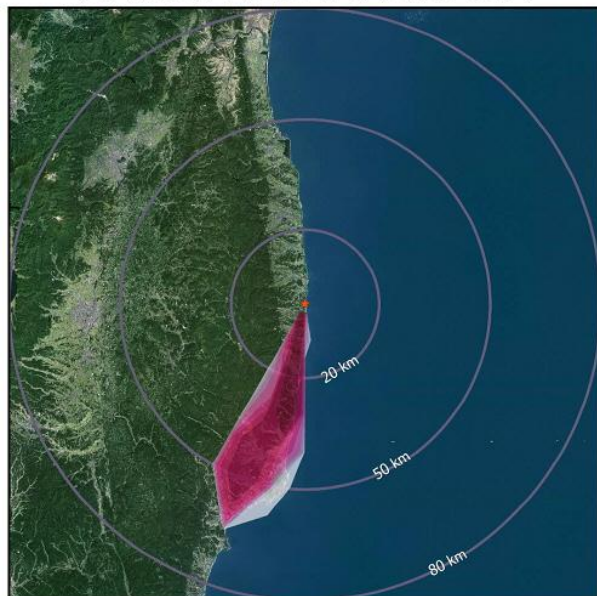


**1<sup>ère</sup> phase de rejet (du 12 au 14 mars) :**  
vers le nord de Fukushima Dai-ichi et au-dessus du Pacifique

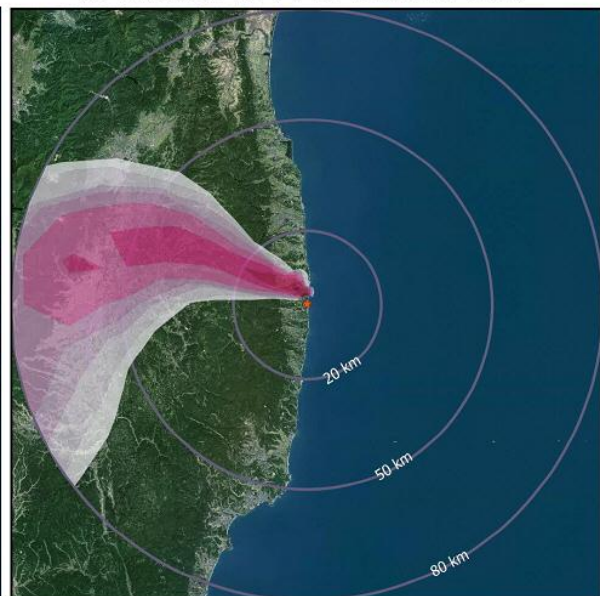
# Dispersion atmosphérique des rejets

Modélisation du débit de dose ambiant dû au panache radioactif (hors contribution des dépôts radioactifs - modèle IRSN pX - Echelle locale)

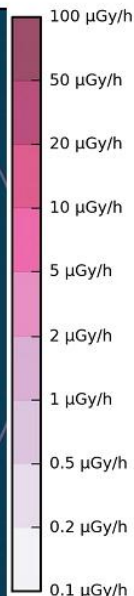
15 mars 2011 à 04h00 JST



15 mars 2011 à 19h00 JST



16 mars 2011 à 05h00 JST



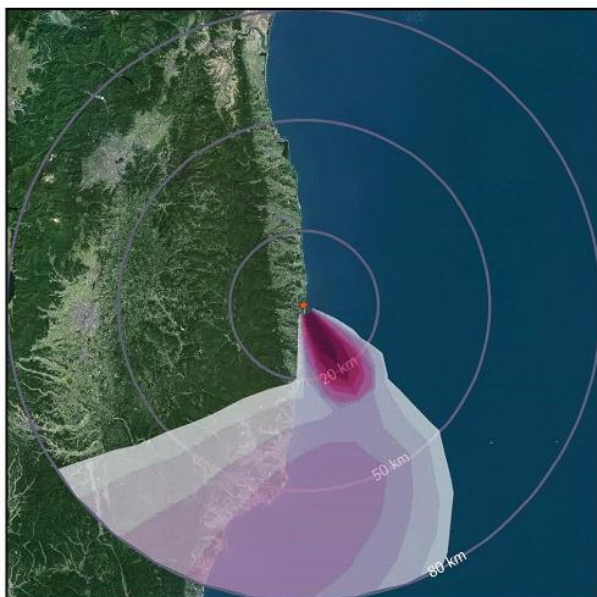
**2<sup>ème</sup> phase de rejet (du 15 au 16 mars matin) :**  
**1<sup>er</sup> épisode de contamination terrestre au Japon**



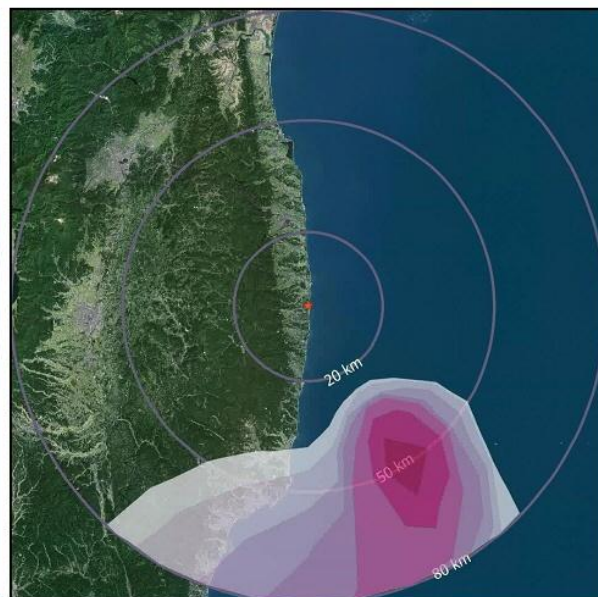
# Dispersion atmosphérique des rejets

Modélisation du débit de dose ambiant dû au panache radioactif (hors contribution des dépôts radioactifs - modèle IRSN pX - Echelle locale)

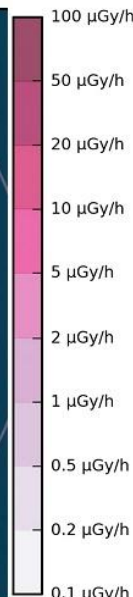
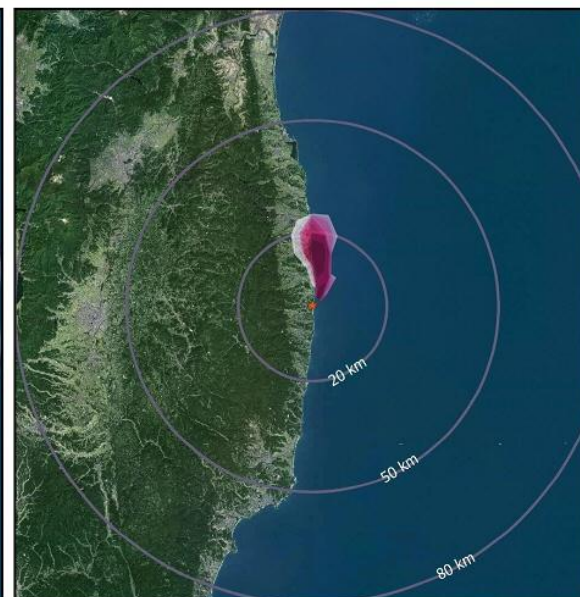
16 mars 2011 à 11h00 JST



16 mars 2011 à 13h00 JST



18 mars 2011 à 20h00 JST



**3<sup>ème</sup> phase de rejet (du 16 mars après-midi au 19 mars) :**  
À nouveau au-dessus du Pacifique  
La fréquence des rejets diminue

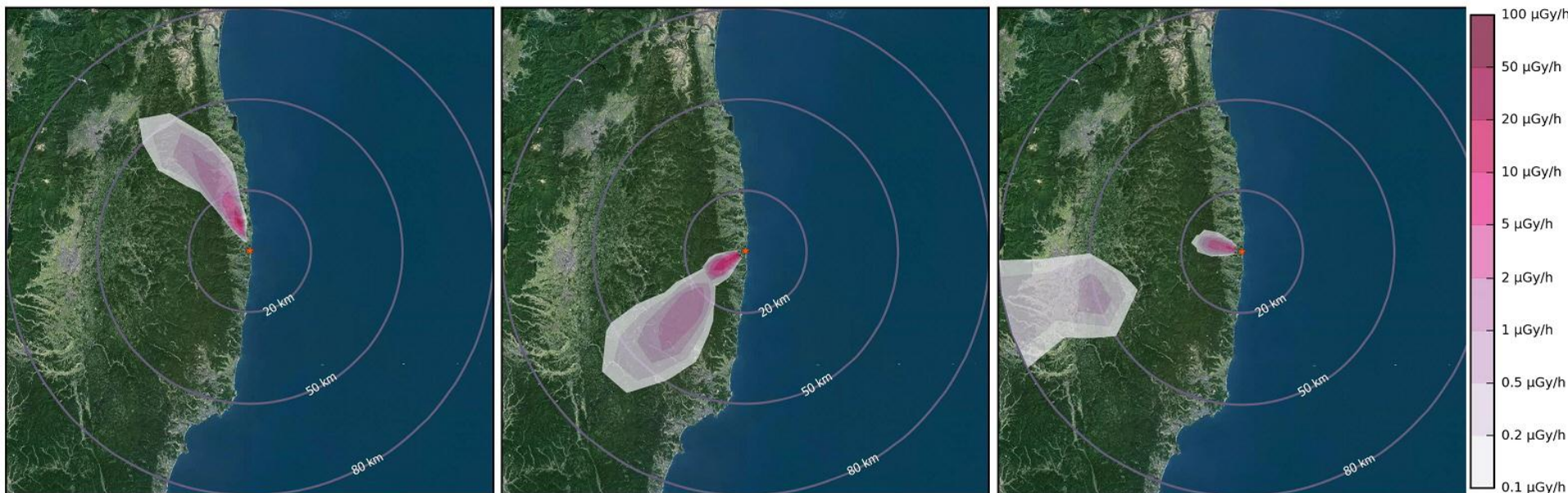
# Dispersion atmosphérique des rejets

Modélisation du débit de dose ambiant dû au panache radioactif (hors contribution des dépôts radioactifs - modèle IRSN pX - Echelle locale)

20 mars 2011 à 19h00 JST

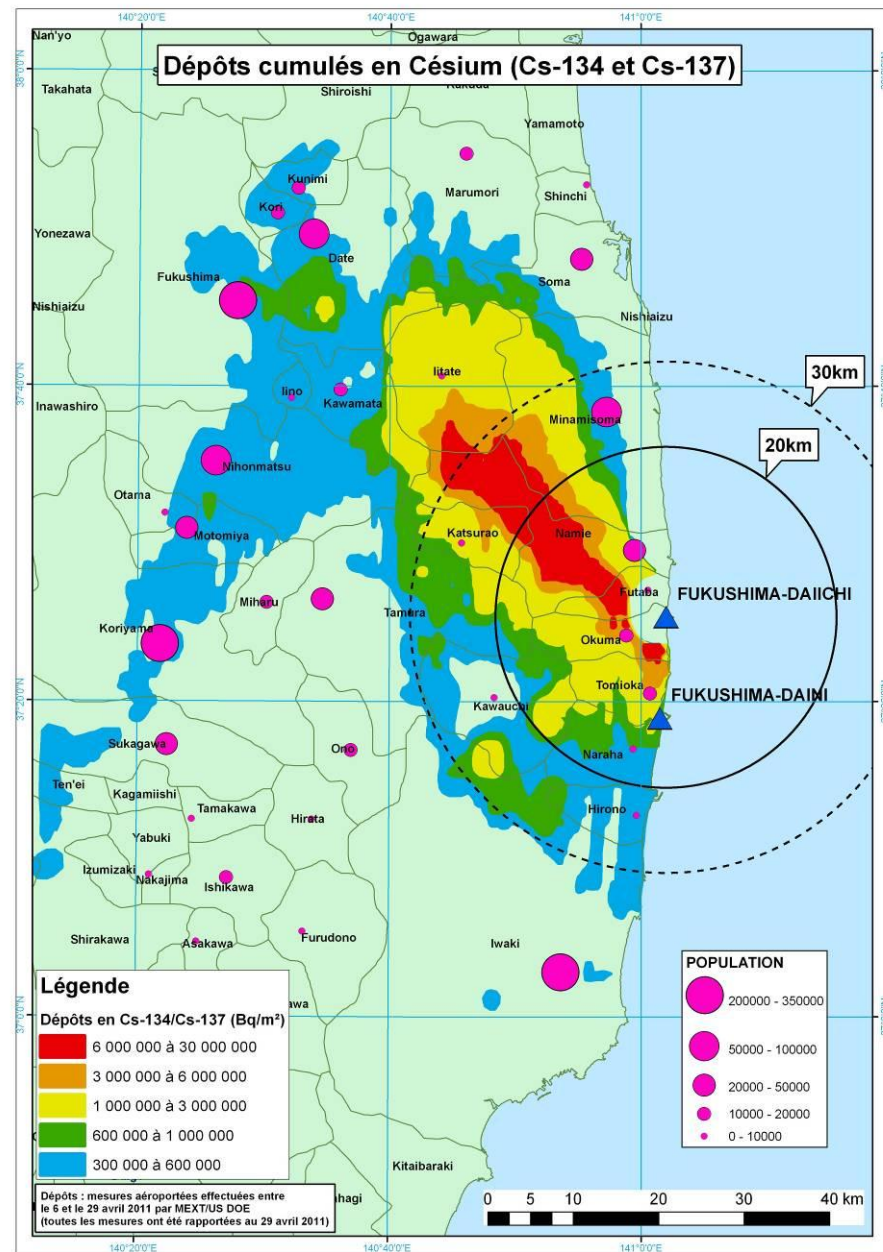
21 mars 2011 à 22h00 JST

22 mars 2011 à 15h00 JST

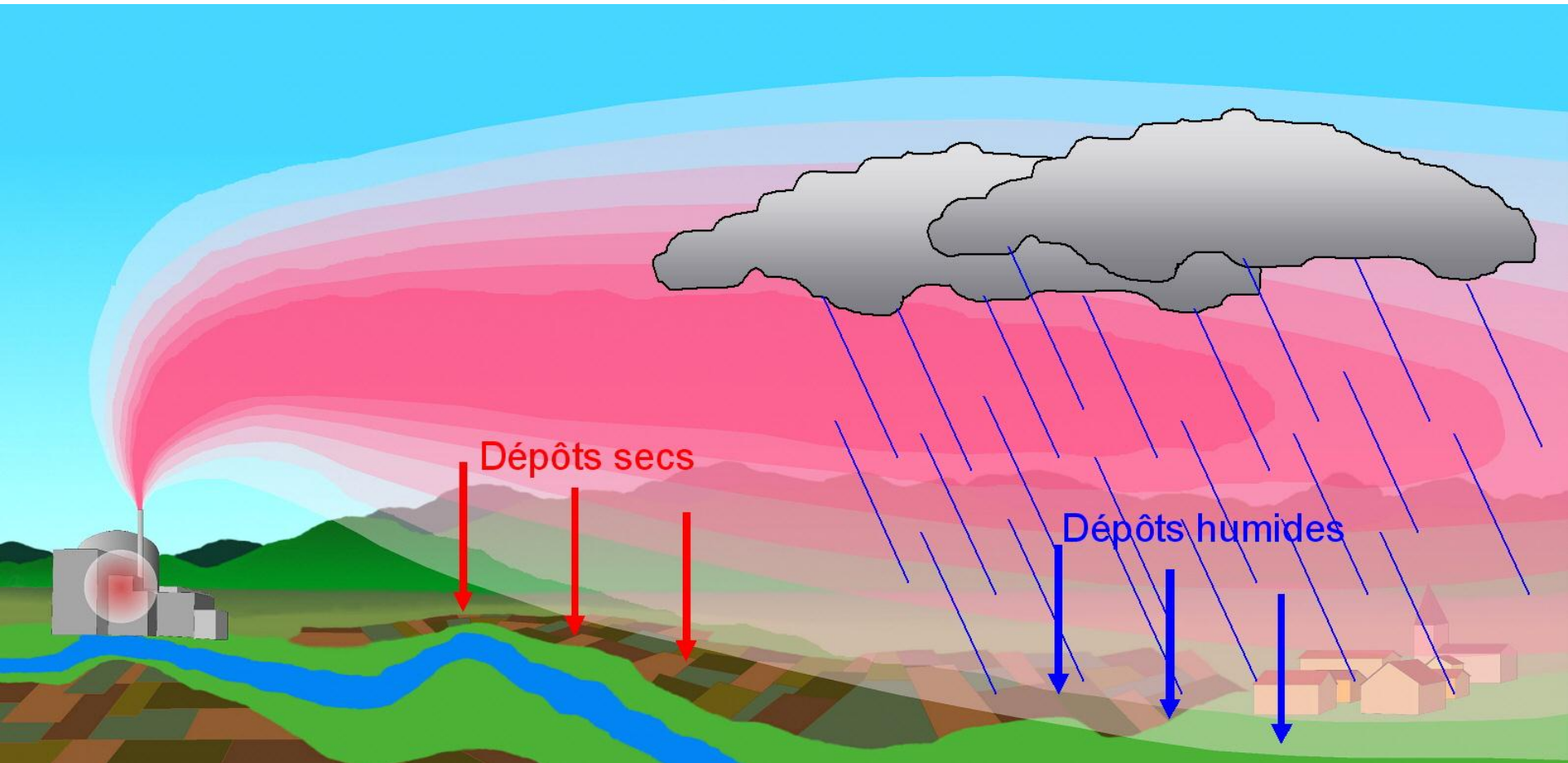


**4<sup>ème</sup> phase de rejet (du 20 mars en soirée au 22 mars) :**  
**2<sup>ème</sup> épisode de contamination terrestre au Japon**

# Les dépôts radioactifs sur les terres japonaises



# La formation des dépôts radioactifs lors de la dispersion des rejets

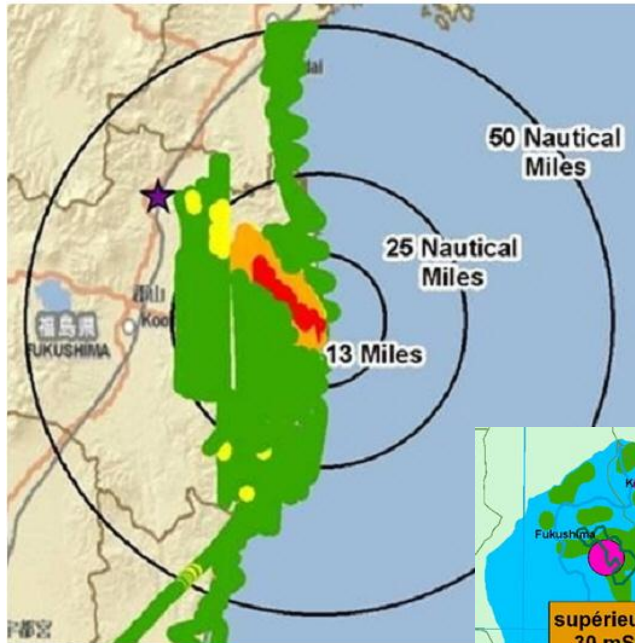


## Conséquences immédiates du dépôt radioactif :

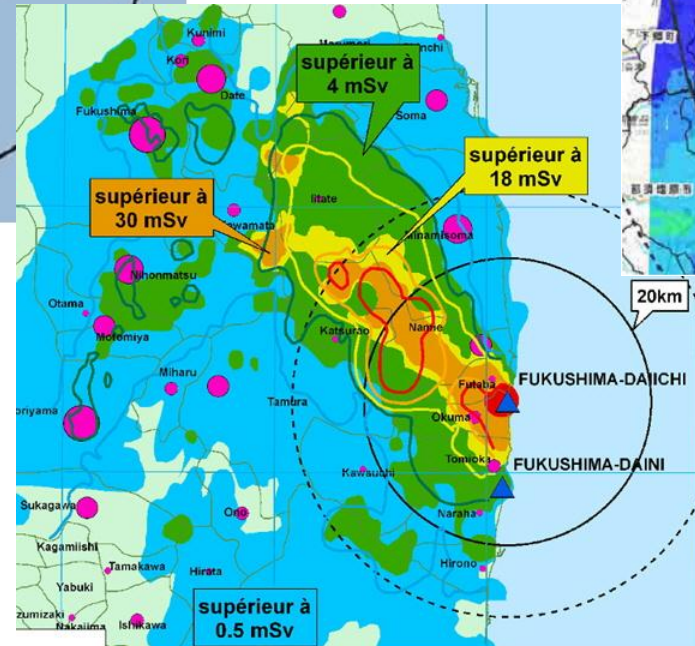
- Augmentation du débit de dose ambiant (en  $\mu\text{Sv/h}$ )
- Contamination des feuilles des végétaux = impact important sur la chaîne alimentaire

# Caractérisation des dépôts après l'accident de Fukushima

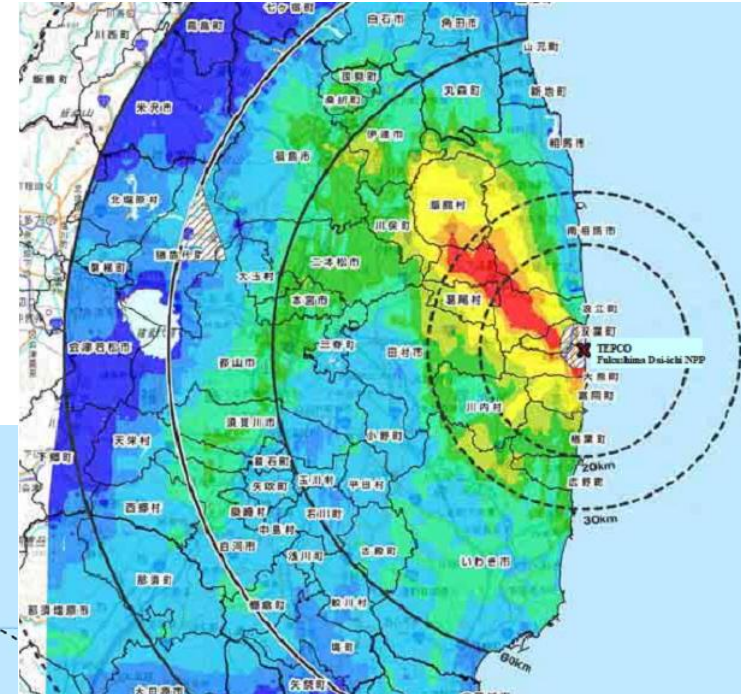
La cartographie des dépôts à l'aide de mesures de radioactivité prend du temps



22 mars 2011

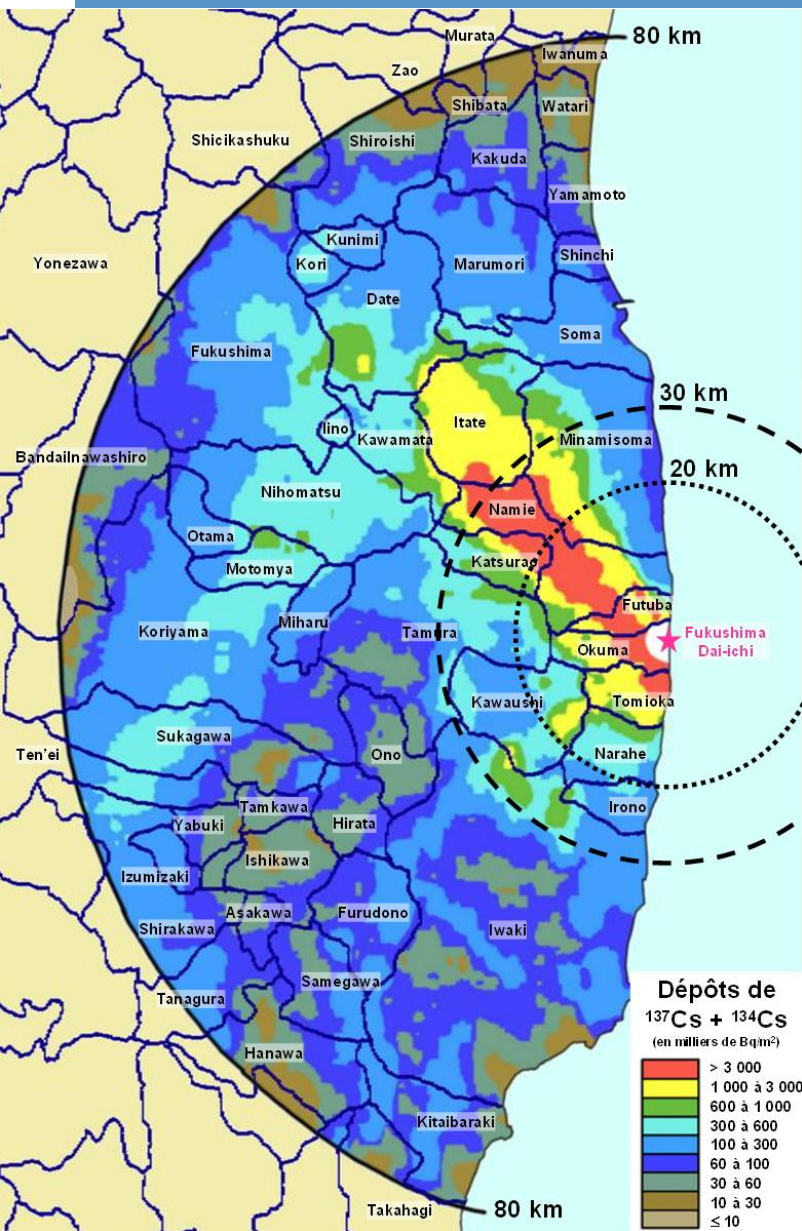


3 avril 2011

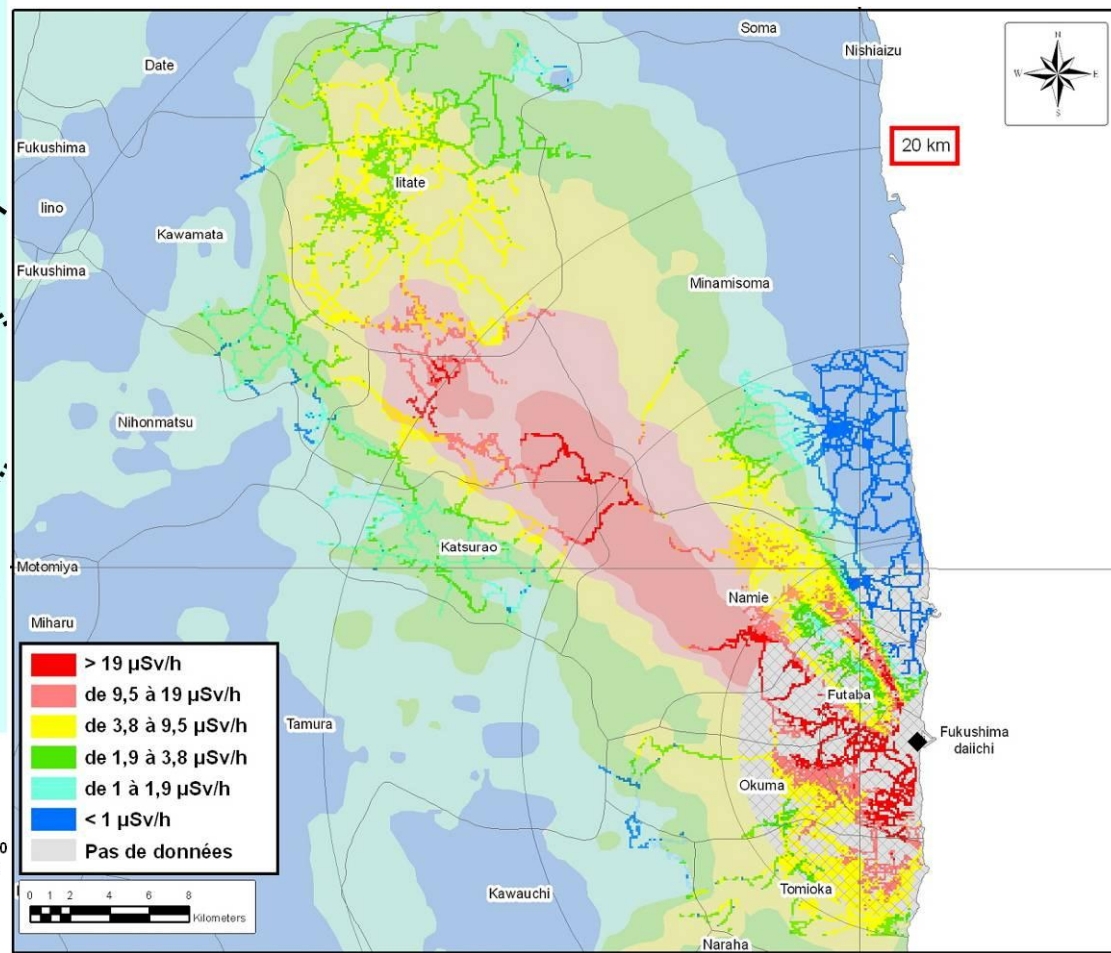


26 mai 2011

## Cartes des dépôts radioactifs fin 2011



Activité surfacique en césium



Débit de dose ambiant (1m au-dessus du sol)

# Origine des principaux dépôts à Fukushima

Progression d'un front pluvieux/neigeux dans la nuit du 15 au 16 mars, lors de la dispersion des rejets émis par le réacteur n°2

15 mars 2011 à 21h

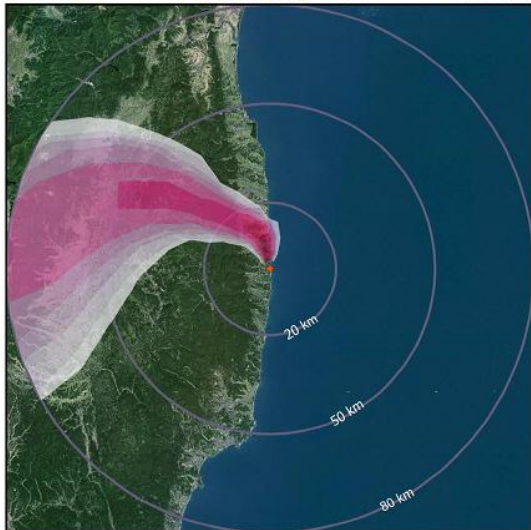
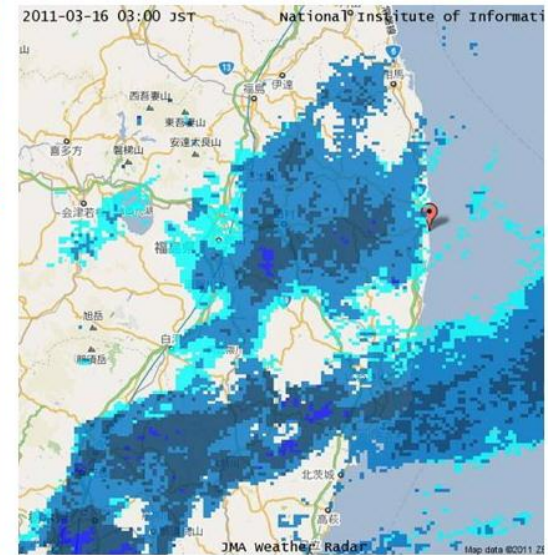


Progression du front pluvieux

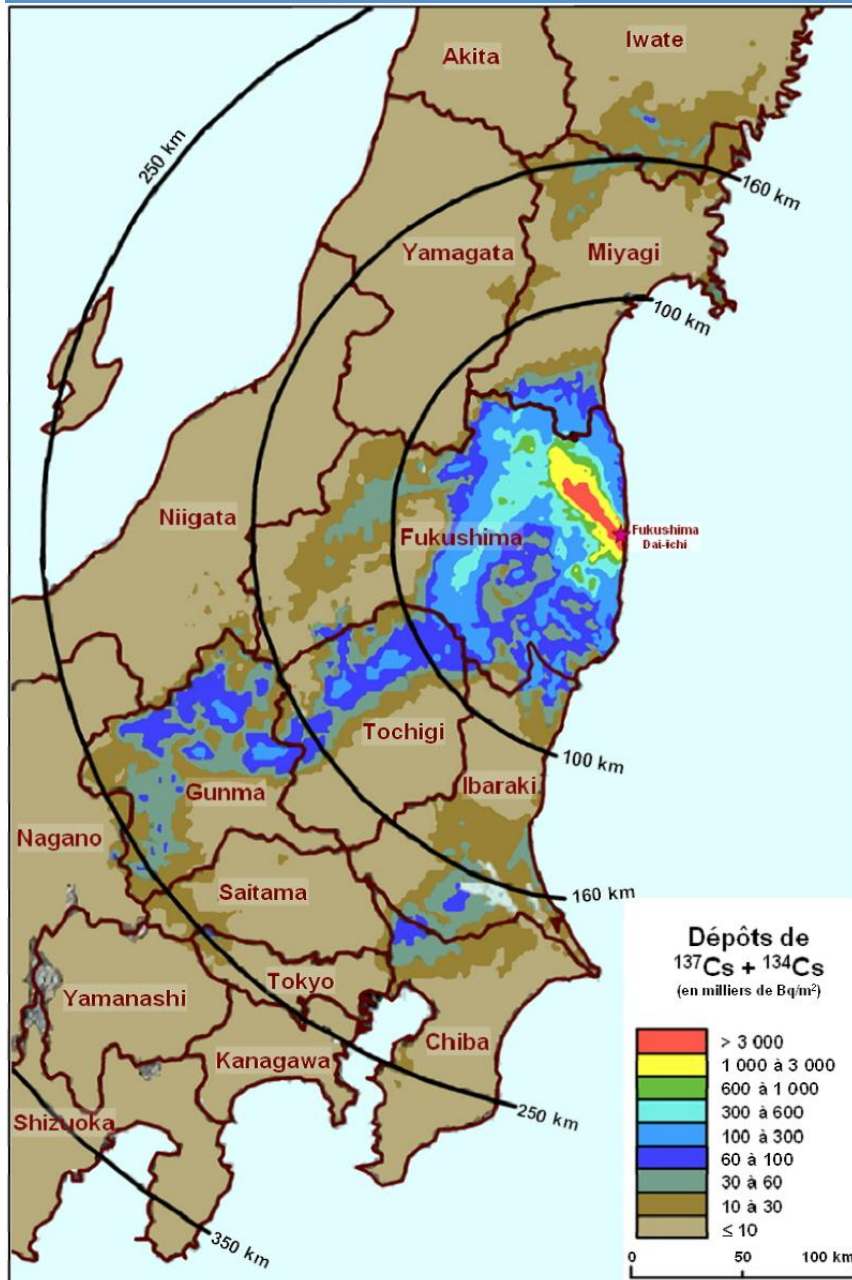
16 mars 2011 à 0h



16 mars 2011 à 3h



# Cartographie des dépôts de $^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$ à l'échelle du Japon



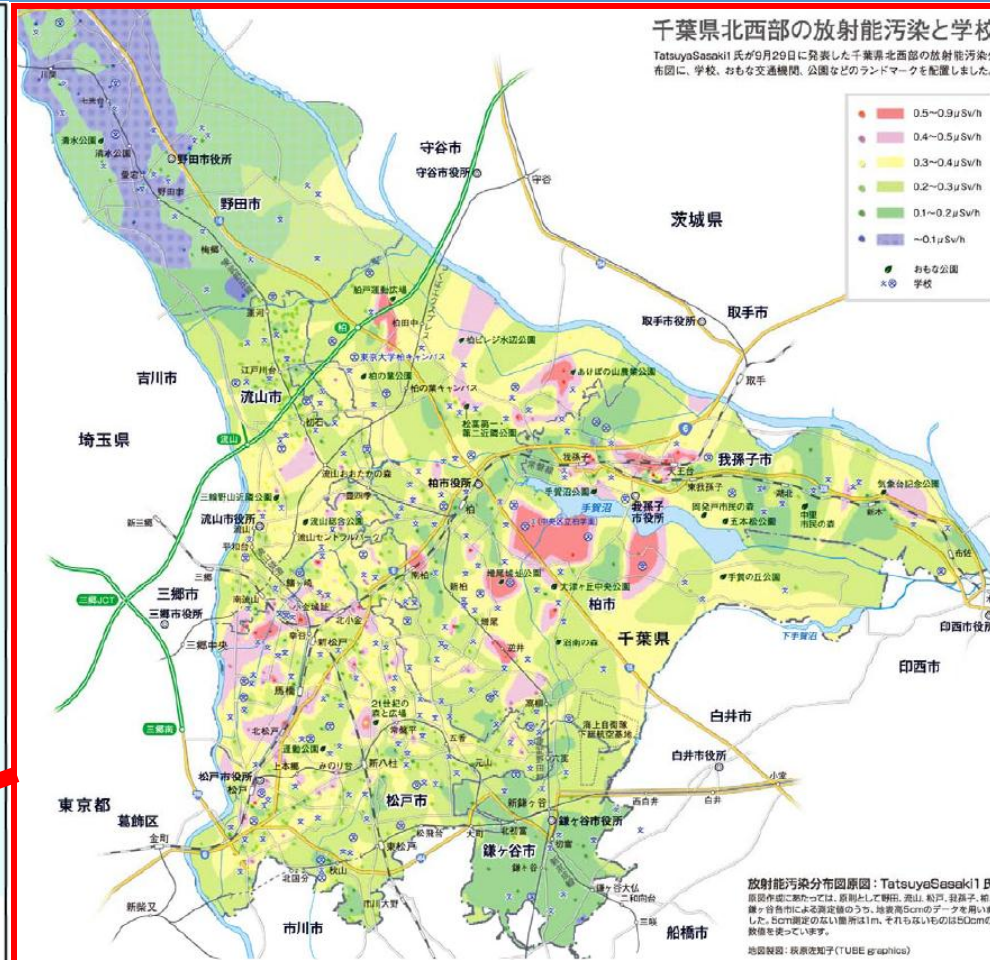
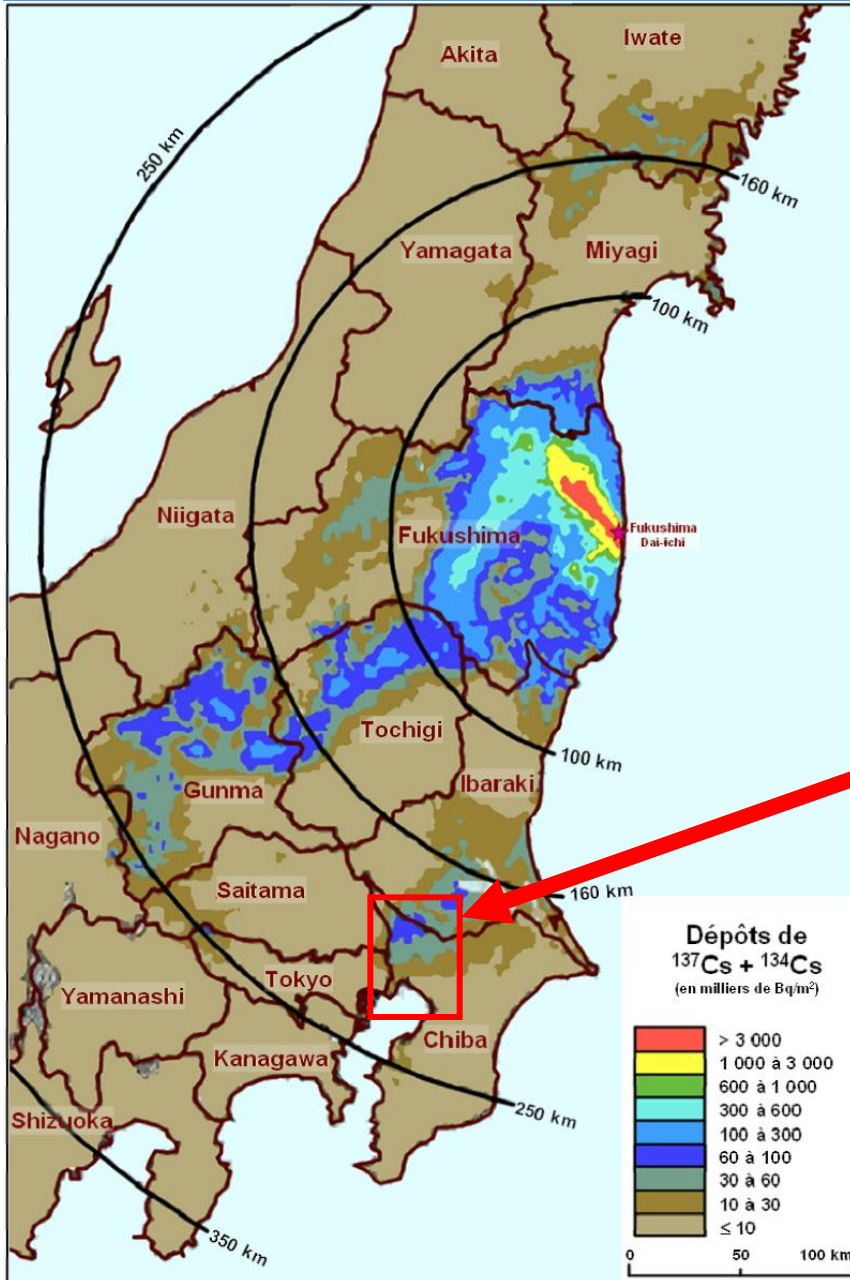
➔ Dépôts en « taches de léopard jusqu'à 250 km :

- en fonction des zones de pluie au moment de la dispersion des rejets
- Max = 29 MBq/m<sup>2</sup> ( $^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$ ) immédiatement à l'ouest de la centrale de Fukushima Dai-ichi

➔ De fortes variations locales non visibles sur cette carte (« points chauds » : effet du ruissellement de la pluie contaminée vers des points d'accumulation



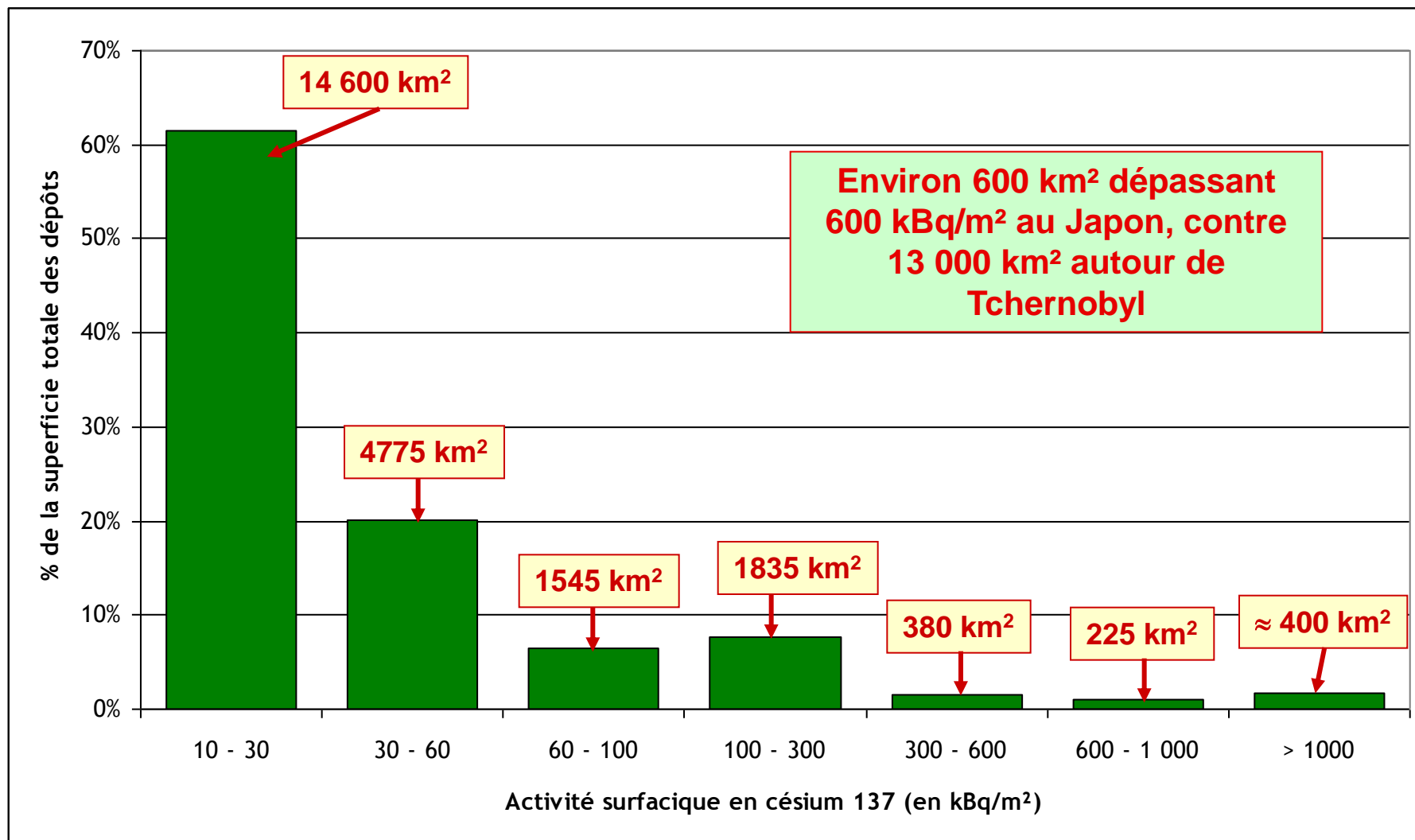
# Variation spatiale des dépôts à l'échelle locale



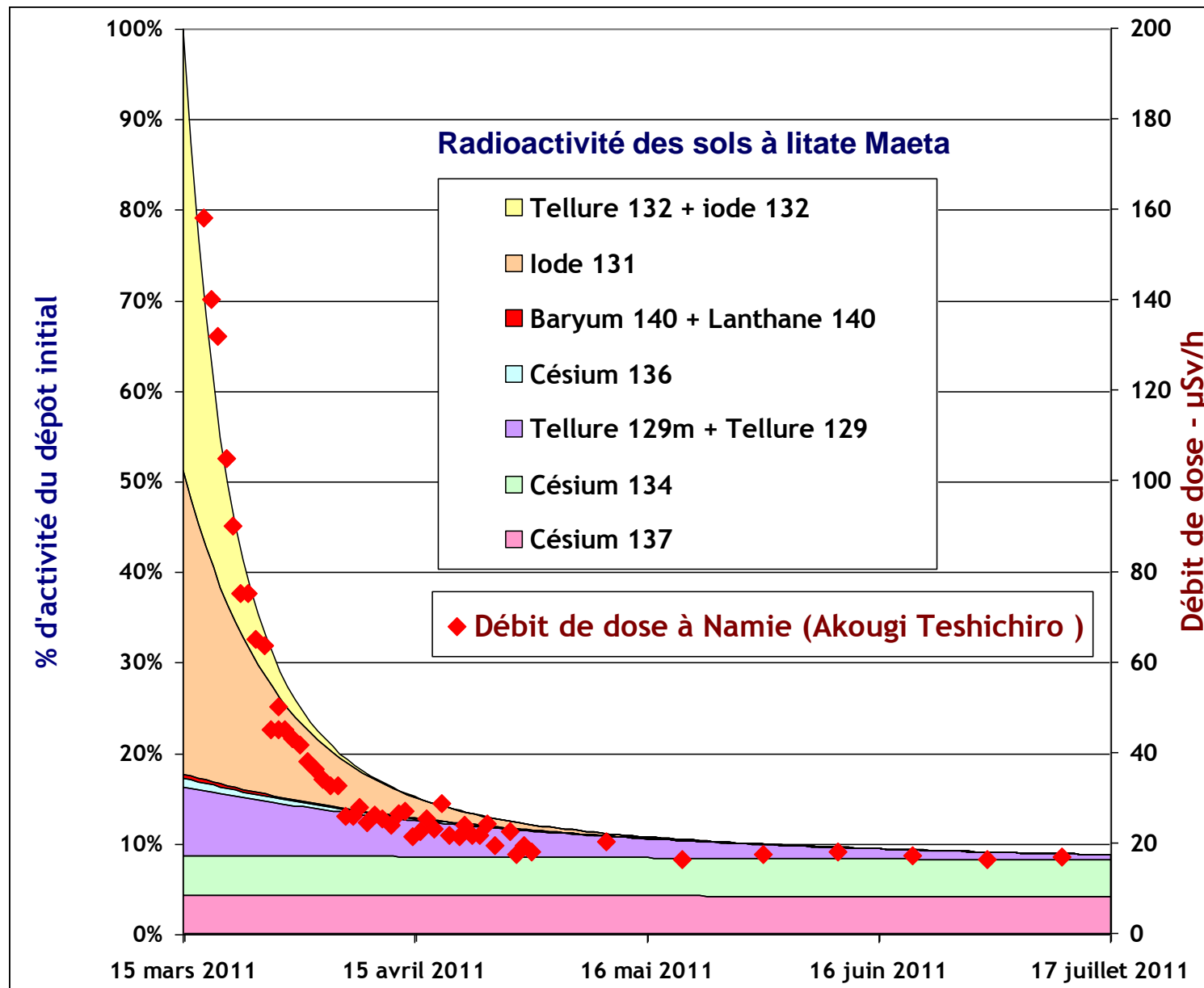
**Exemple de « points chauds » dans la préfecture de Chiba**

# Superficie des zones de dépôt de césium 137

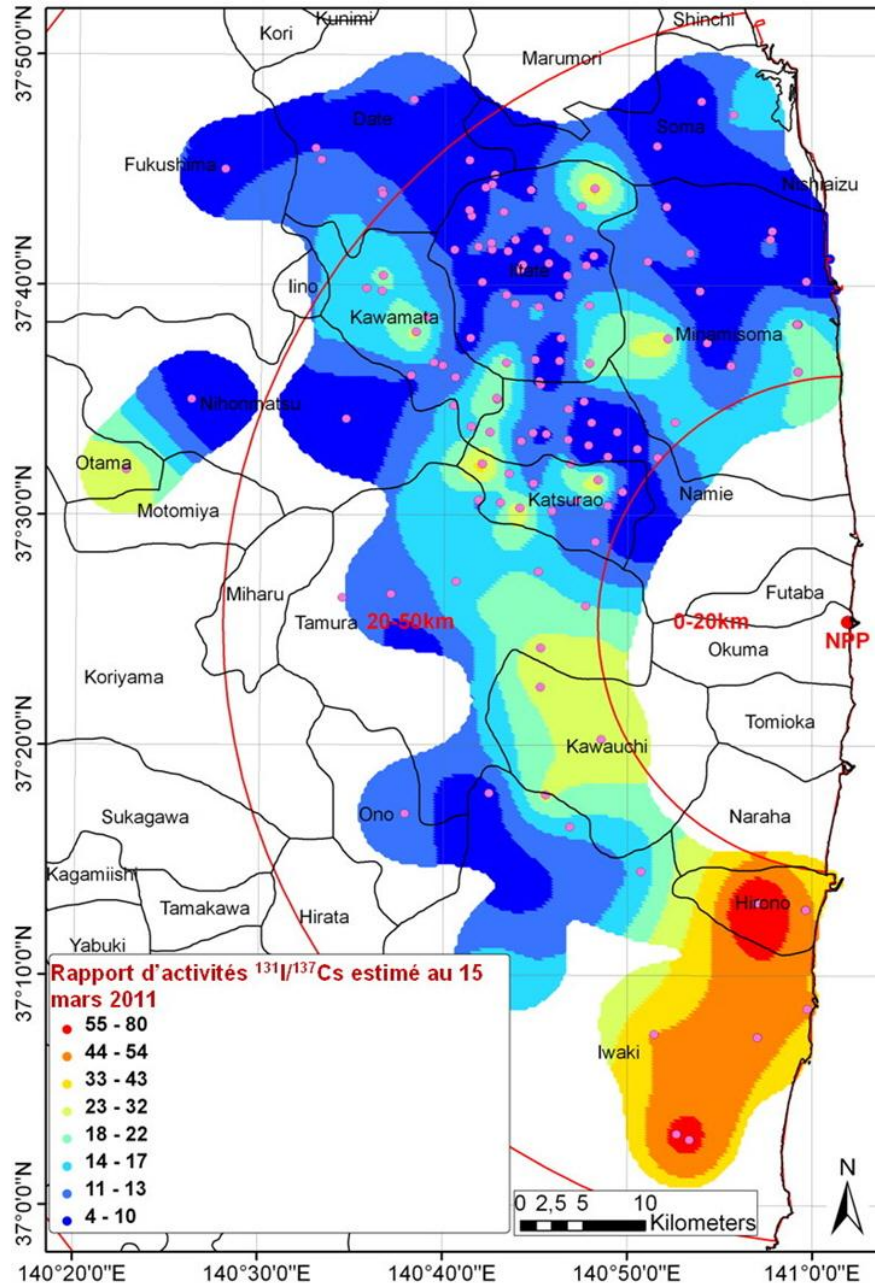
Près de 24 000 km<sup>2</sup> avec un dépôt de césium 137 > 10 000 Bq/m<sup>2</sup>



# Évolution de la composition et de l'activité des dépôts



# Variations spatiales de la composition isotopique initiale des dépôts

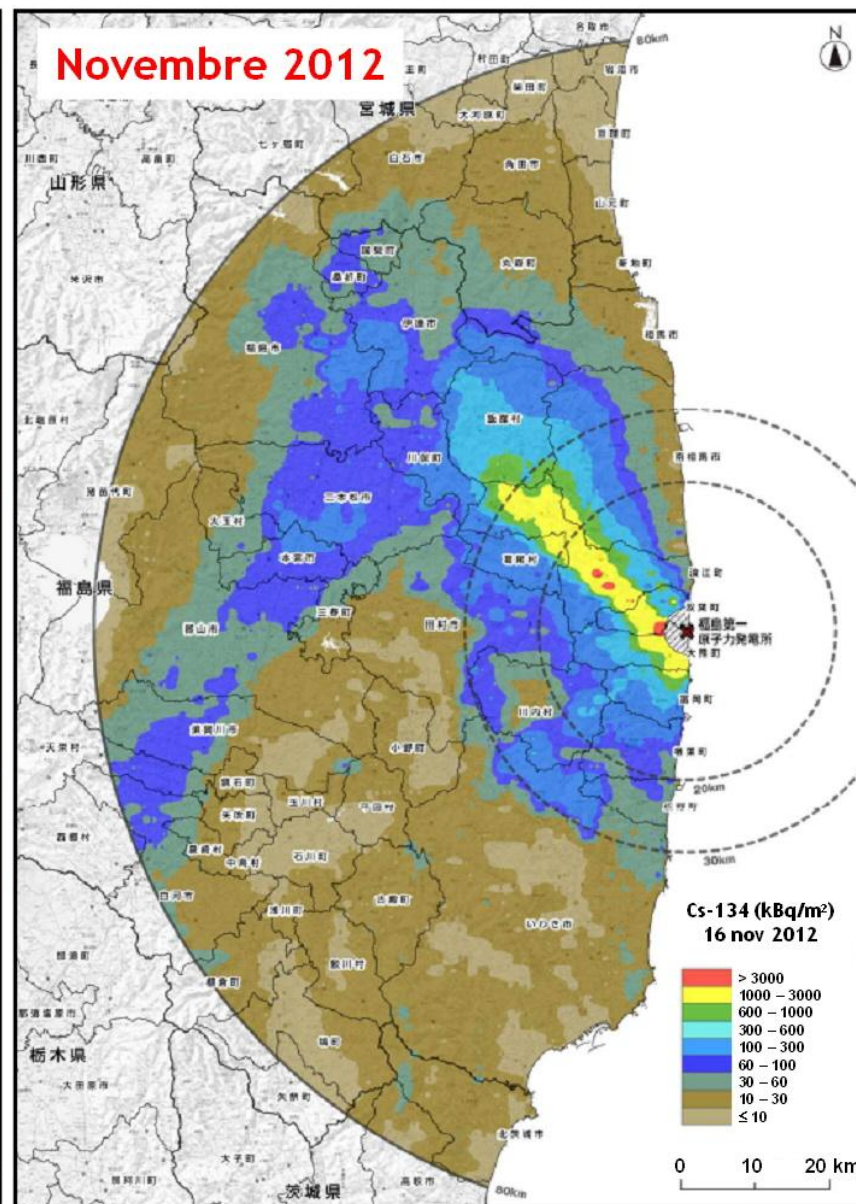
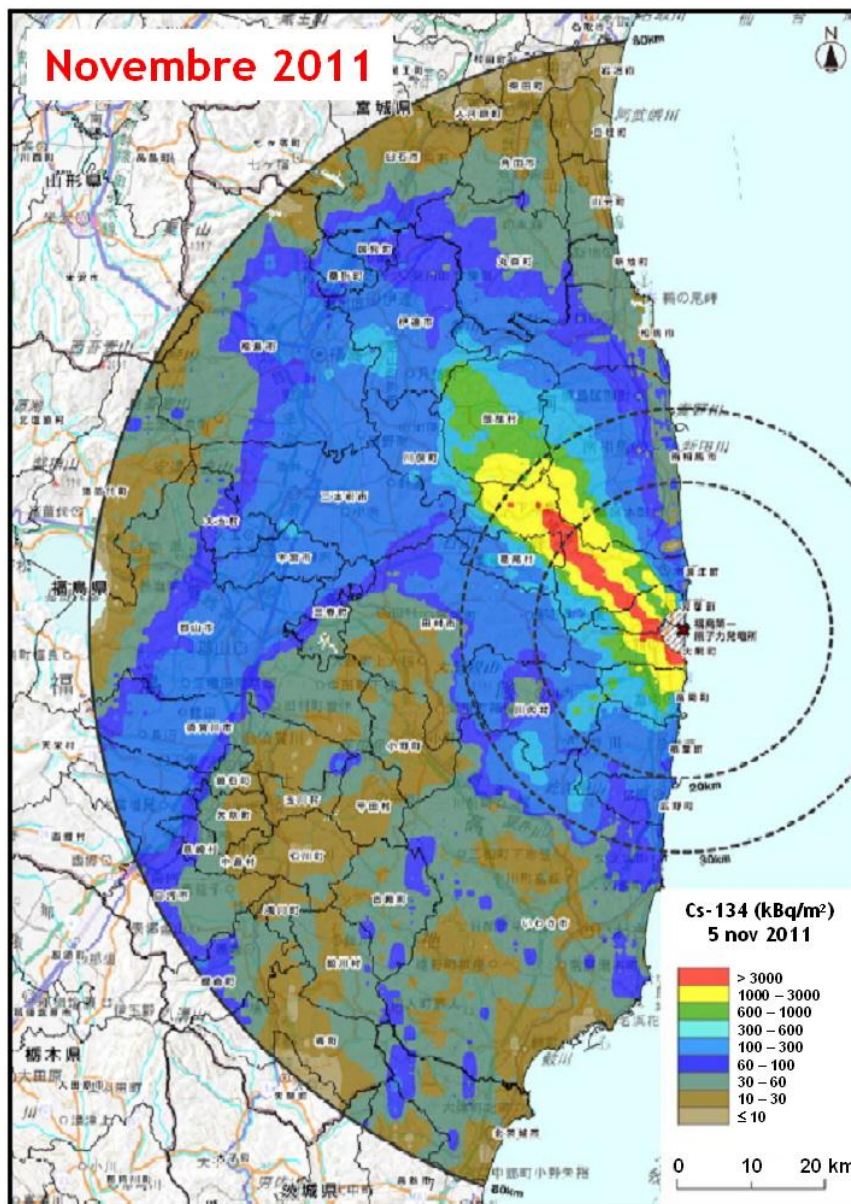


➔ Des ratios  $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$  variables en fonction du lieu

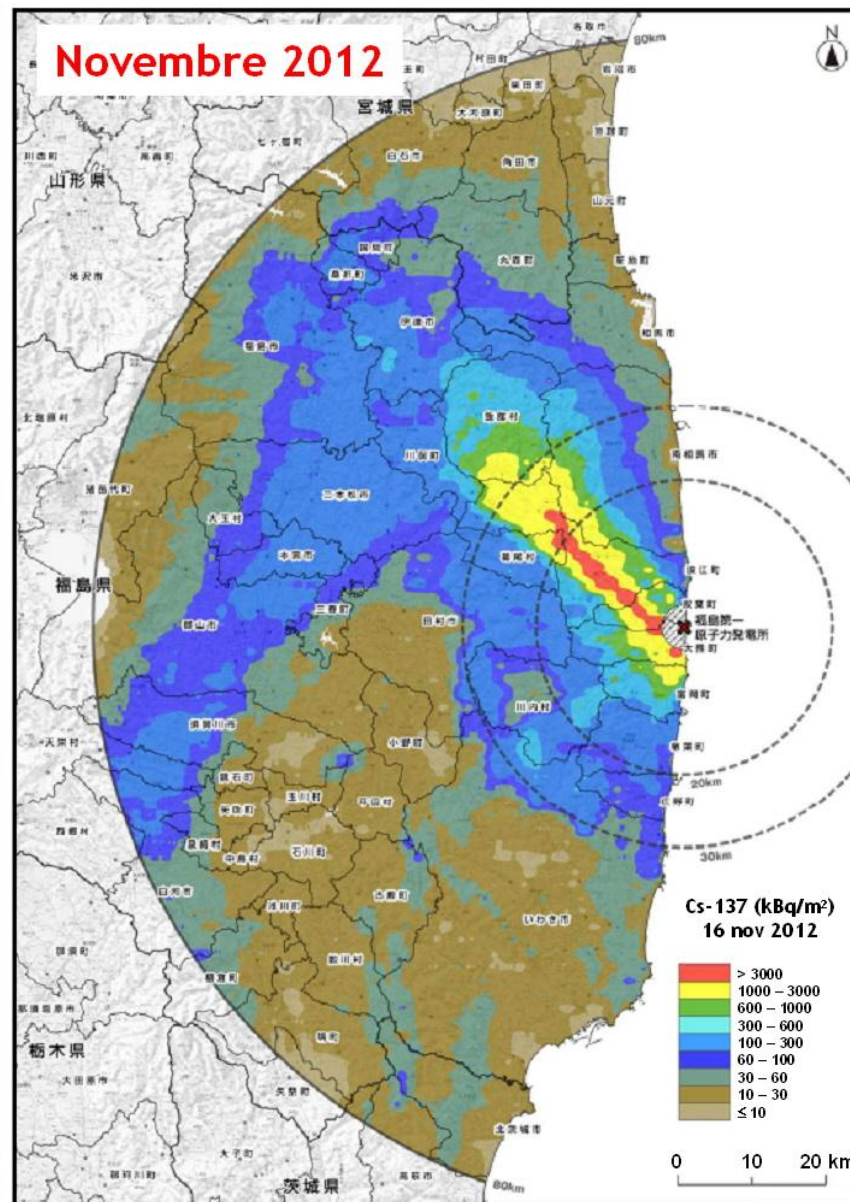
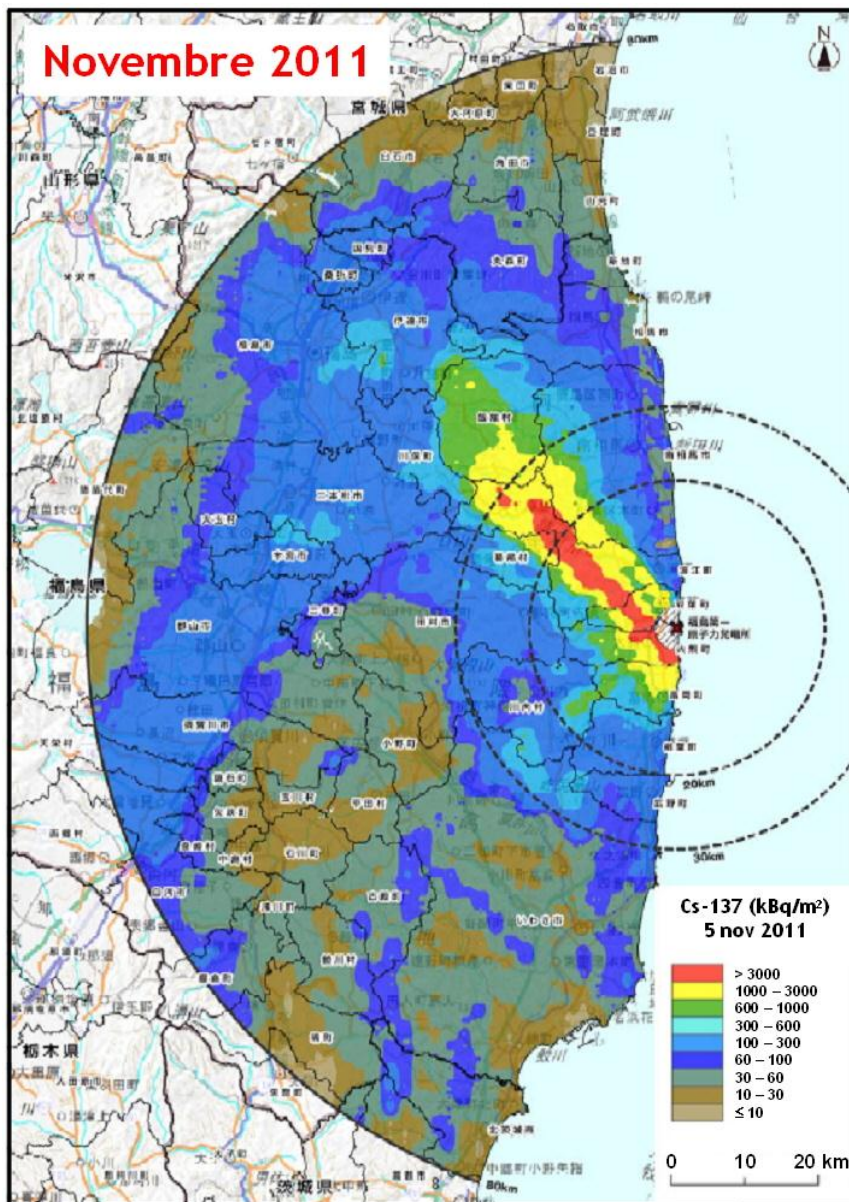
- Ratio  $\approx 8$  à  $12$  dans le lobe principal Nord-Ouest
- Ratio  $\approx 50$  au sud de la centrale (Hirono, Iwaki)

➔ Variations dues probablement à la part de dépôt sec dans le dépôt total

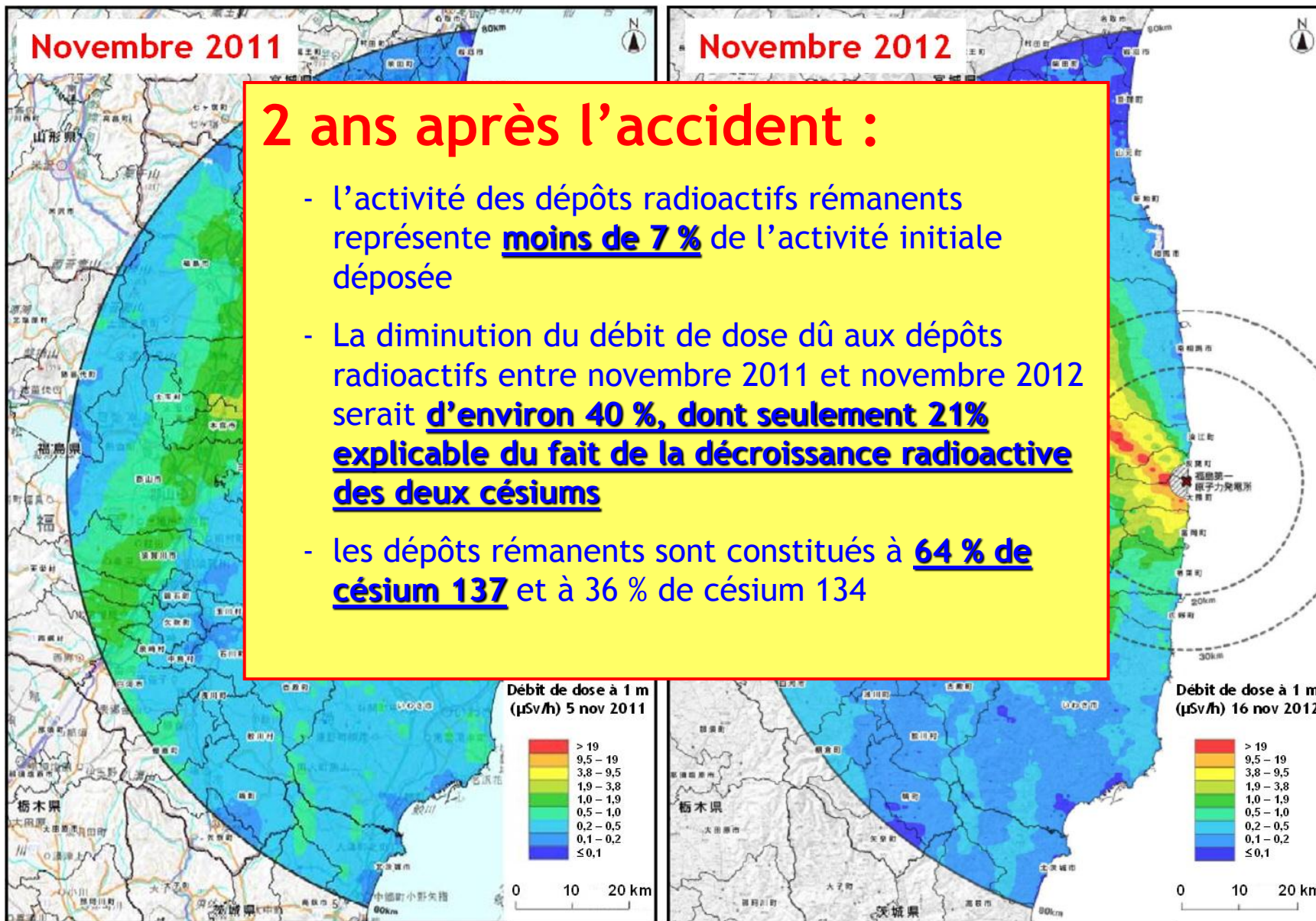
## Césium 134



## Césium 137



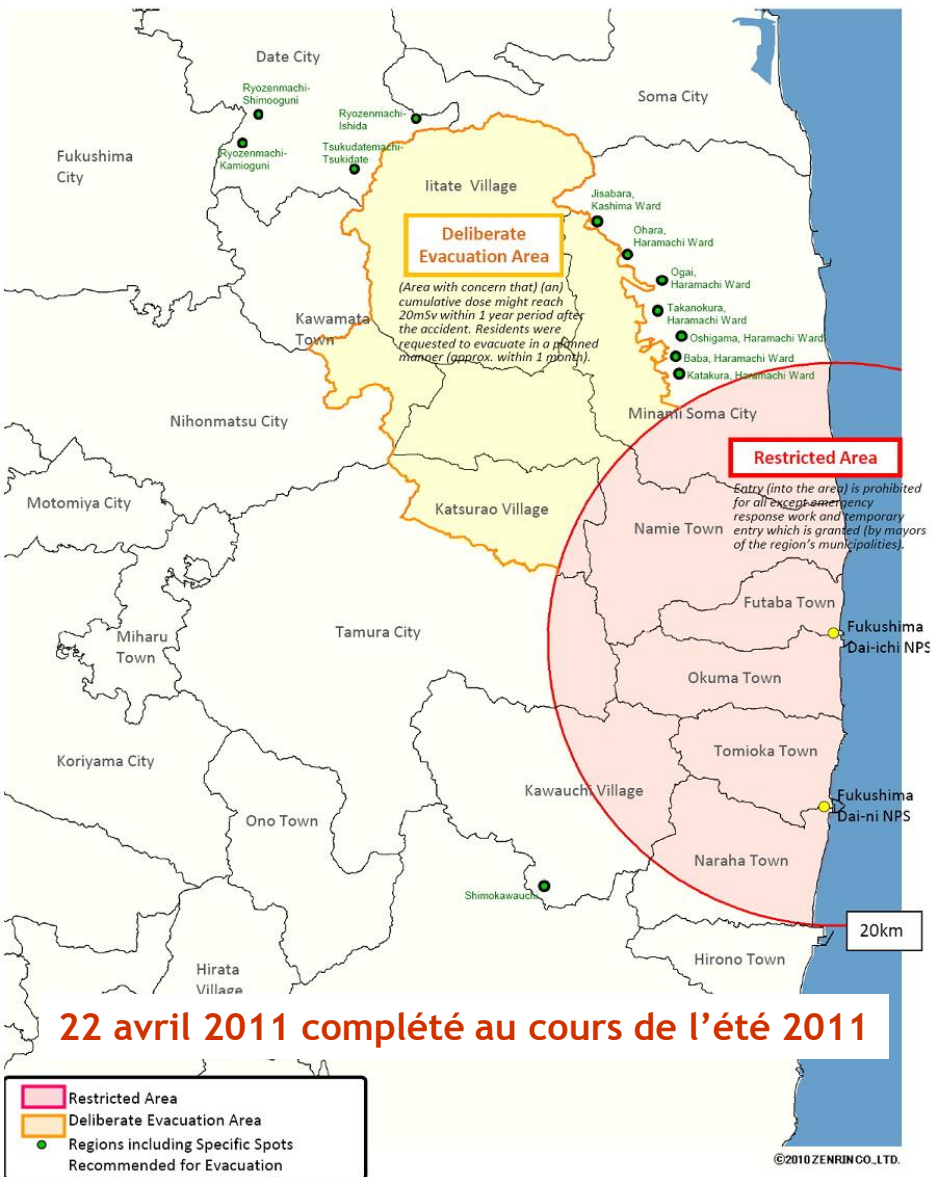
## Débit de dose à 1 m



# Zonage post-accidentel mis en place au Japon et évolution

Restricted Area, Deliberate Evacuation Area

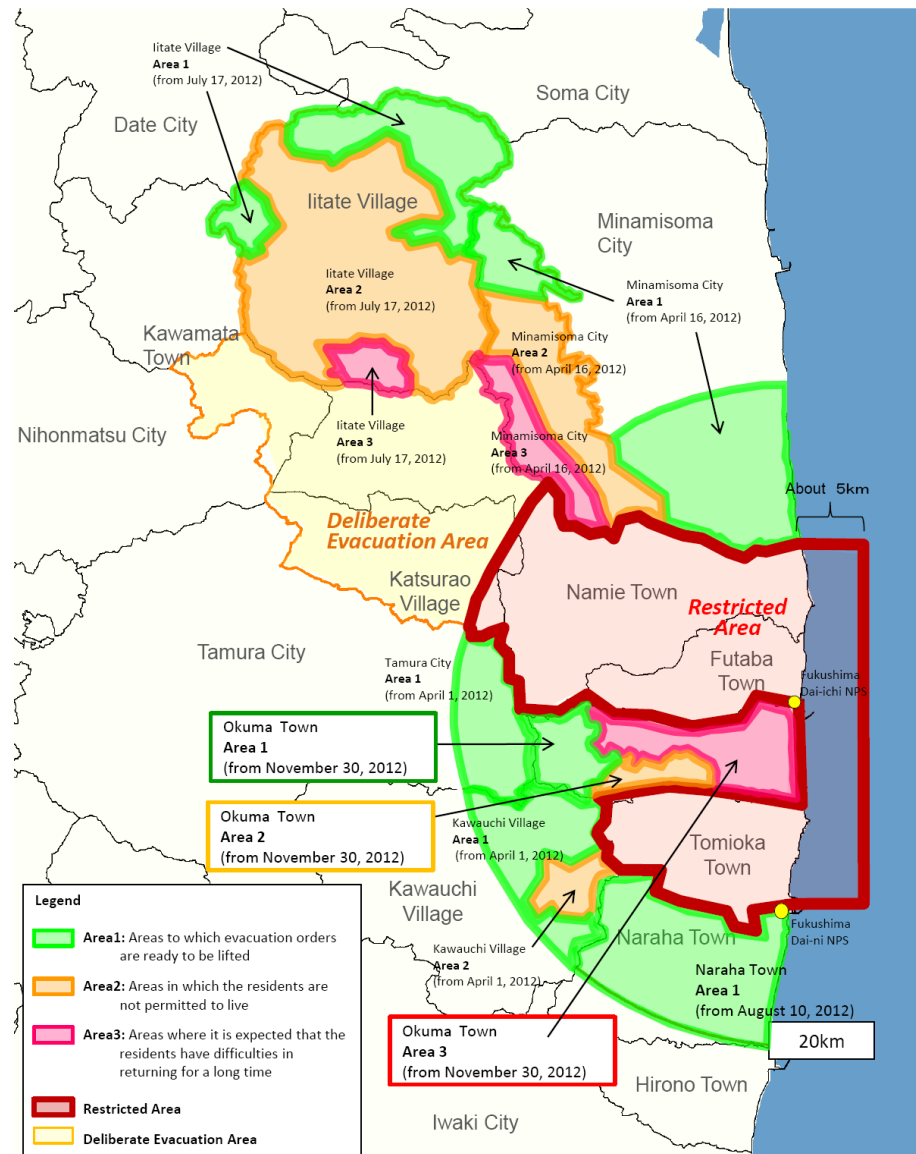
And Regions including Specific Spots Recommended for Evacuation (As of September 30, 2011)



22 avril 2011 complété au cours de l'été 2011

Restricted areas and areas to which evacuation orders have been issued

(November 30, 2012)

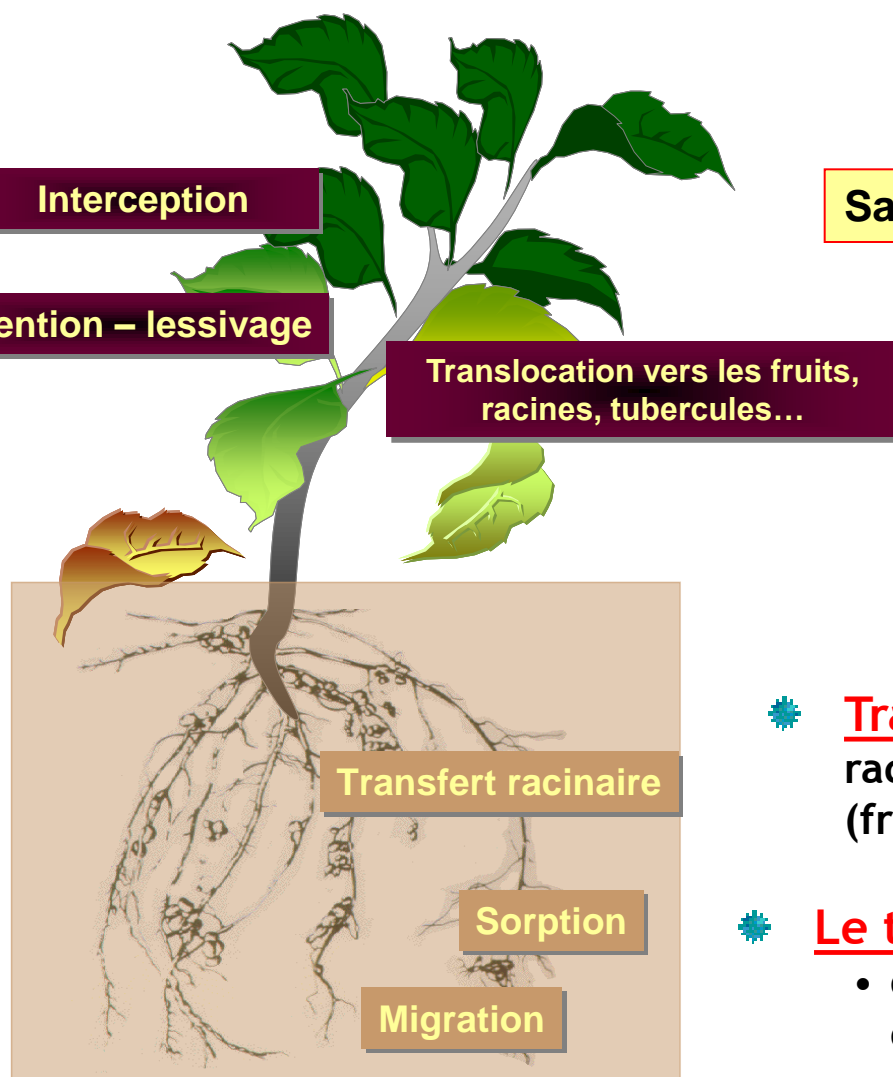


Évolution du zonage en novembre 2012



# Les conséquences sur les productions agricoles





- **L'interception par les feuilles (transfert foliaire) dépend :**
  - de la surface des feuilles (⇒ stade de développement végétale)
  - du rendement de croissance
  - du type de dépôt (sec/humide)
  - du radionucléide déposé

Saison

- **Rétection / Lessivage :** fixation irréversible du radionucléide sur la plante / perte de radionucléide par lessivage de la pluie

- **Translocation :** déplacement des radionucléides vers des organes de réserve (fruits, racine, bois, tubercule...)

- **Le transfert racinaire dépend :**
  - de l'activité massique du radionucléide dans les sols
  - de la biodisponibilité du radionucléide



Phénomène négligeable au cours des premiers mois suivant le dépôt

# Le contexte agro-climatique de mars 2011 au Japon

- ➔ **Fin d'hiver** en zone tempérée, avec des précipitations pluvio-neigeuses lors des dépôts radioactifs
- ➔ Les **cultures maraichères** (légumes et fraises) sont les seules en cours de production, notamment sous serres
- ➔ A quelques rares exceptions, les **arbres fruitiers** n'ont ni feuilles, ni fleurs
- ➔ Certaines **céréales** sont en places mais sont loin de la floraison (en mai)
- ➔ Quelques **végétaux semi-naturels et arbustes** à l'origine de denrées spécifiques ont des feuilles (bambous, théiers, aralia...)

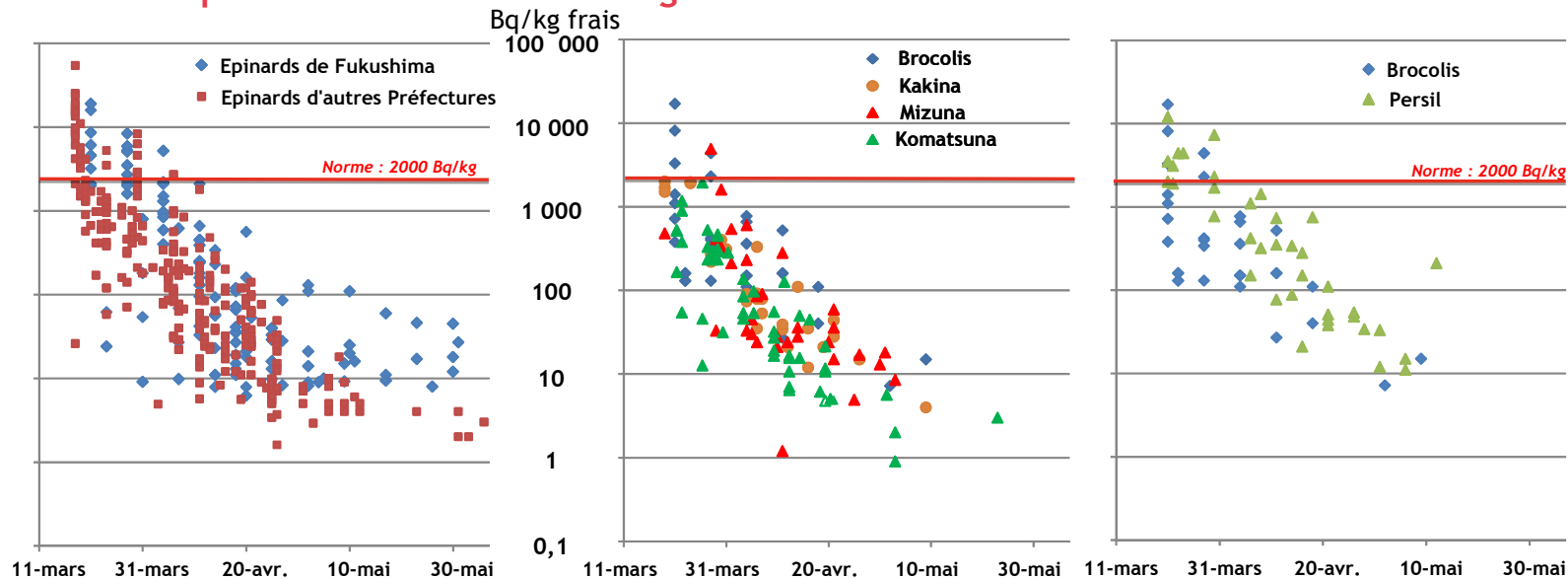
La vallée de Kawamata en début mars



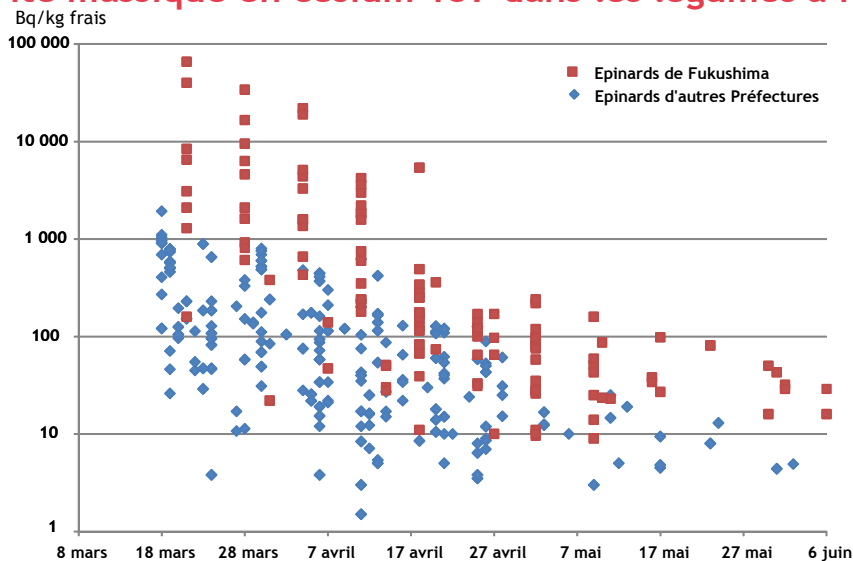
En mars 2011, les légumes-feuilles, notamment les épinards, sont de loin les denrées les plus sensibles aux retombées atmosphériques radioactives

# Contamination des légumes-feuilles après l'accident

## Activité massique en iode 131 dans les légumes à feuilles



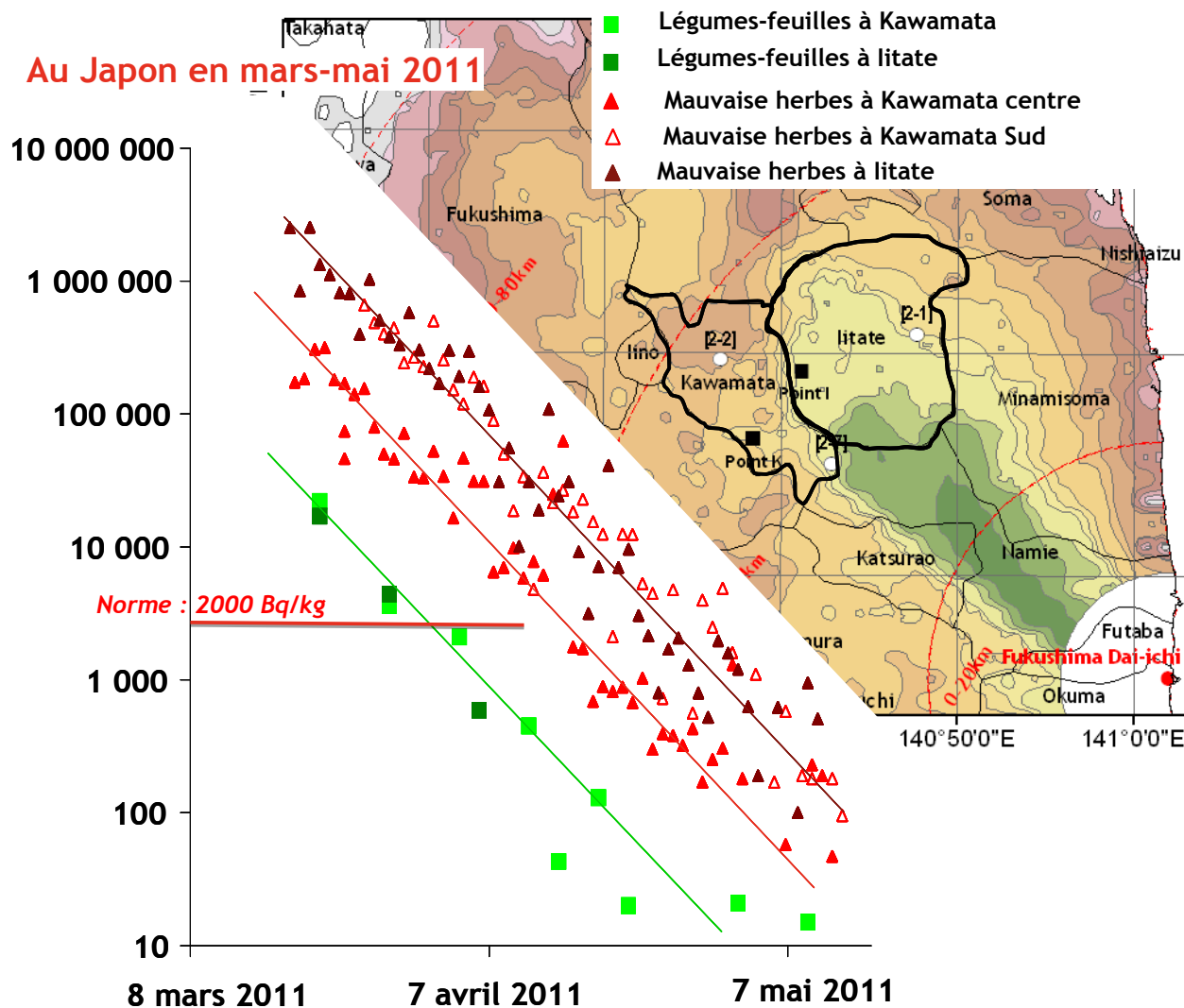
## Activité massique en césium 137 dans les légumes à feuilles



⇒ Activités diminuées d'un facteur 100 à 1000 en 3 mois et disparition de l'iode 131 au-delà de fin mai 2011

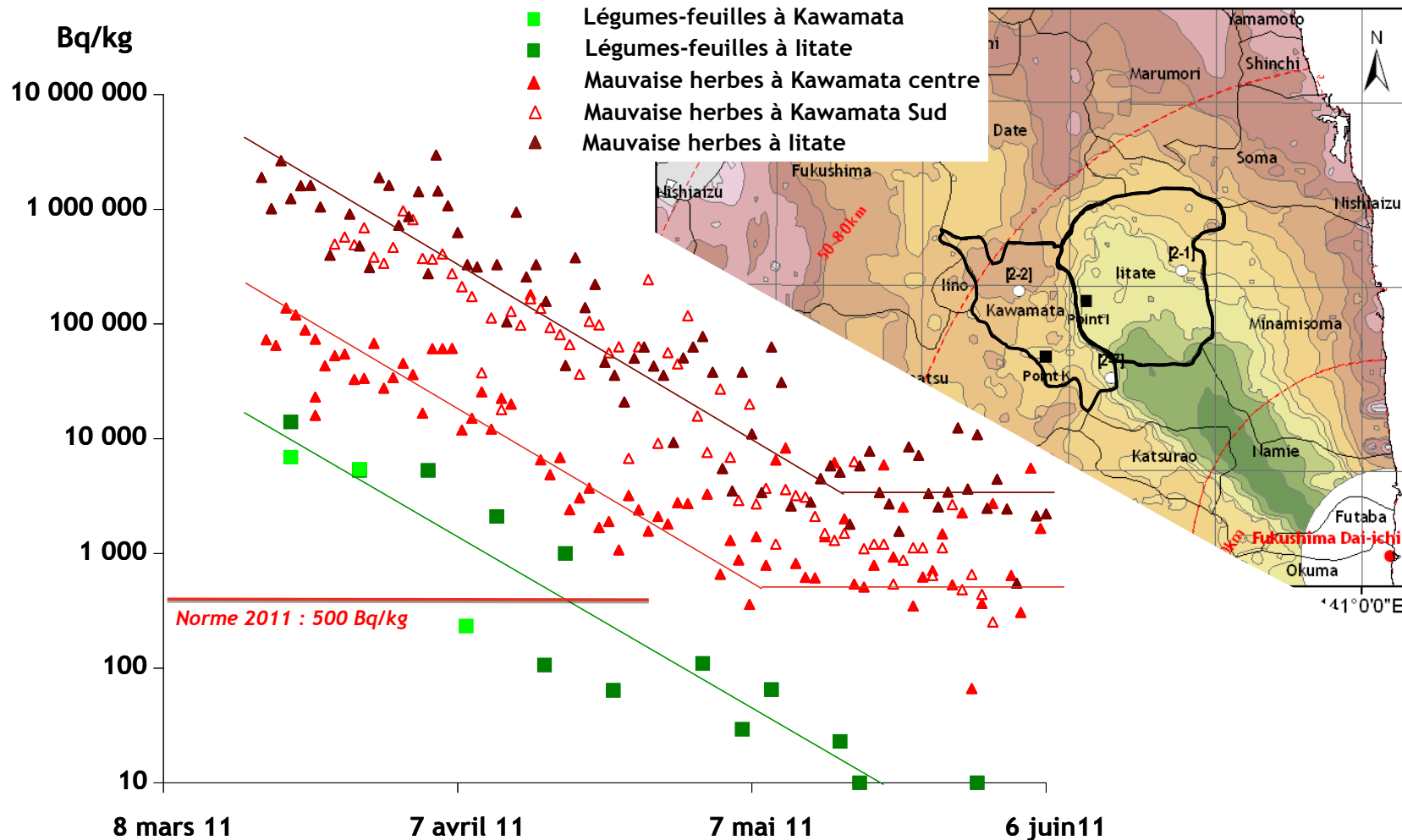
## Comparaison de la contamination des légumes-feuilles et des « mauvaises herbes » (adventices) à Iitate et Kawamata

Évolution de l'activité massique en iode 131 dans les végétaux à feuilles en mars-avril 2011 (Bq/kg frais)



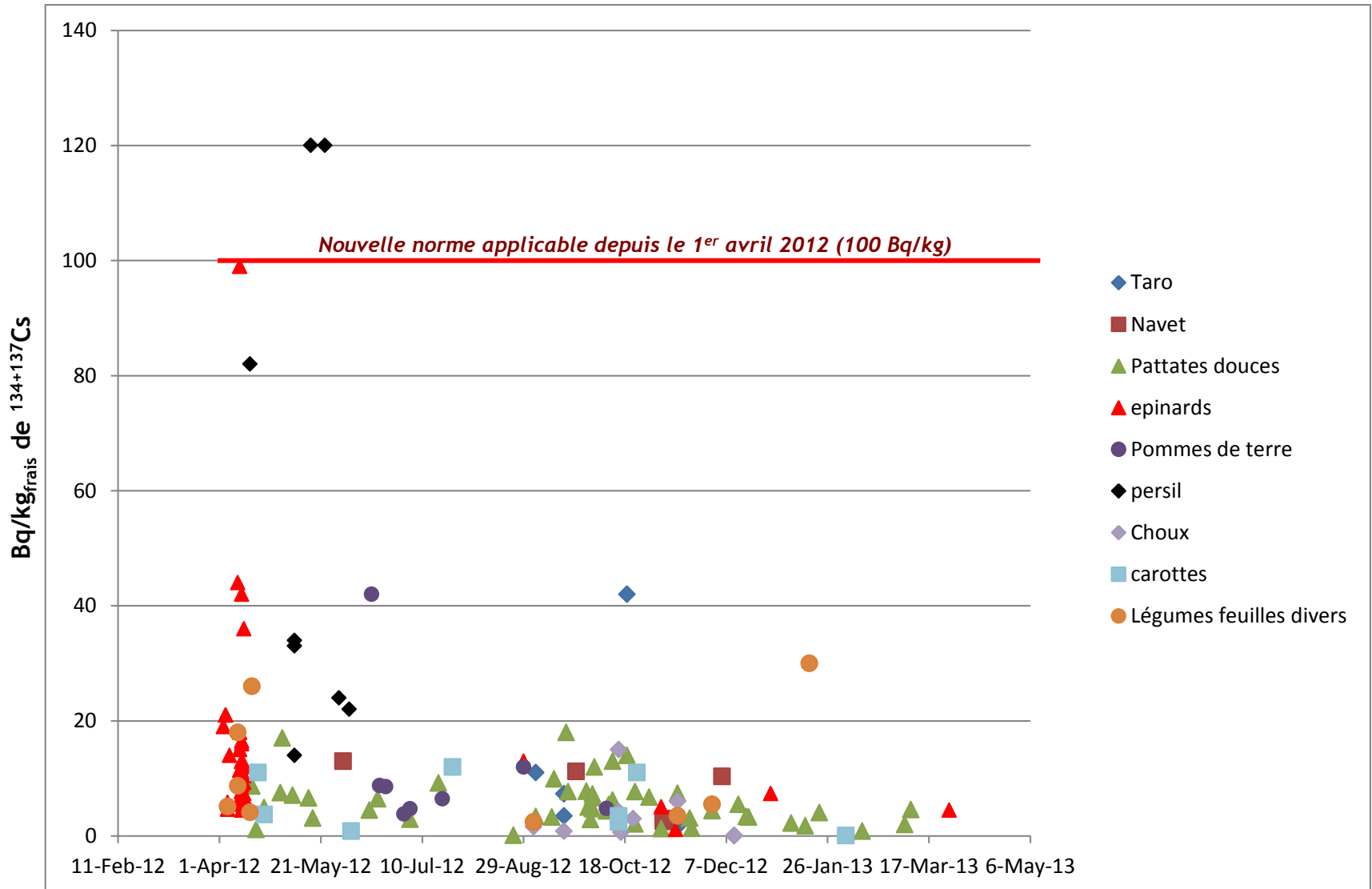
## Comparaison de la contamination des légumes-feuilles et des « mauvaises herbes » (adventices) à Iitate et Kawamata

Évolution de l'activité massique en césium 137 dans les végétaux à feuilles en mars-mai 2011 (Bq/kg frais)



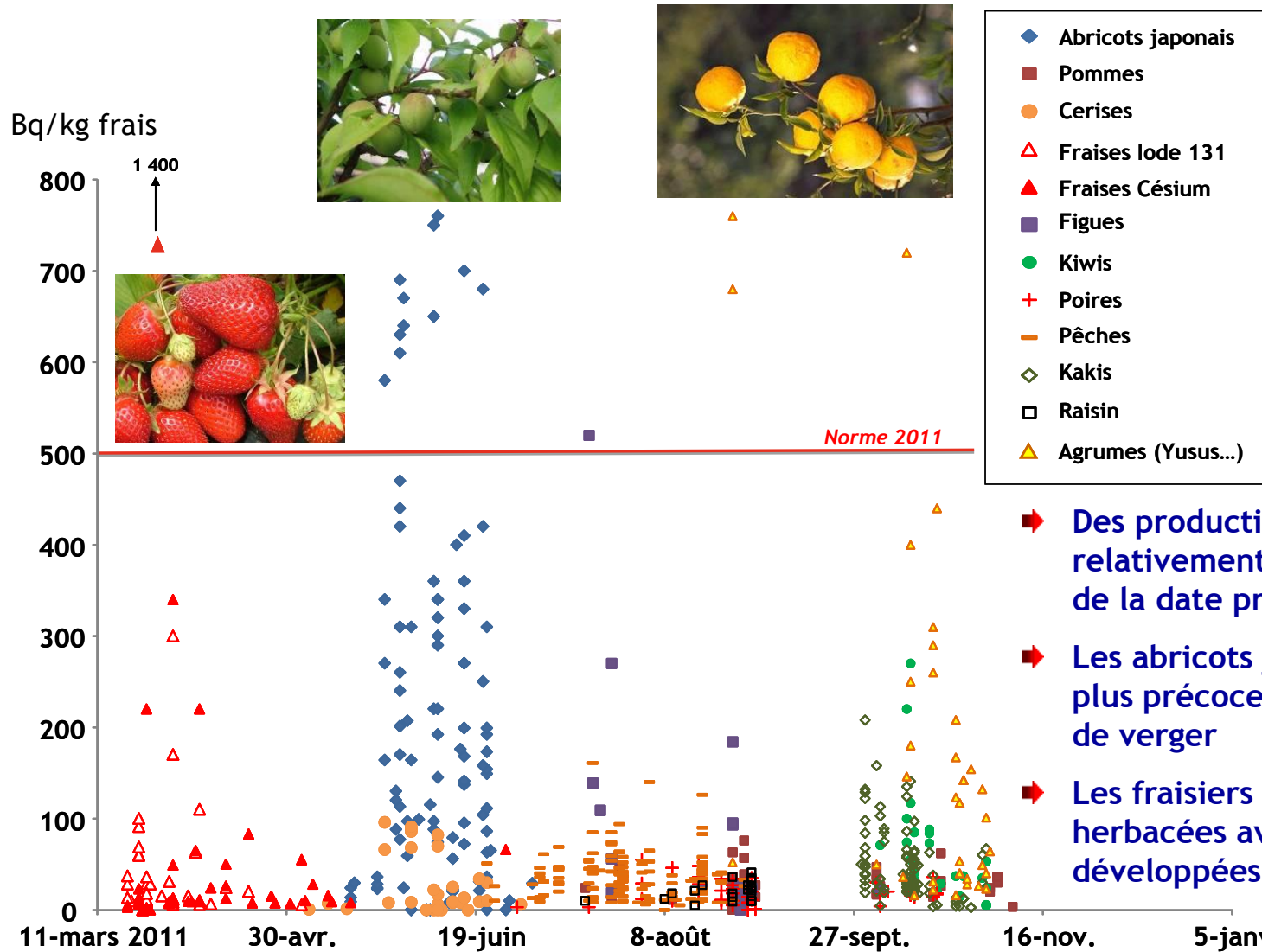
# Évolution de la contamination des légumes en 2012

## Activité massique en césium 134+137 dans les légumes en 2012 (toutes préfectures)



# Contamination des fruits

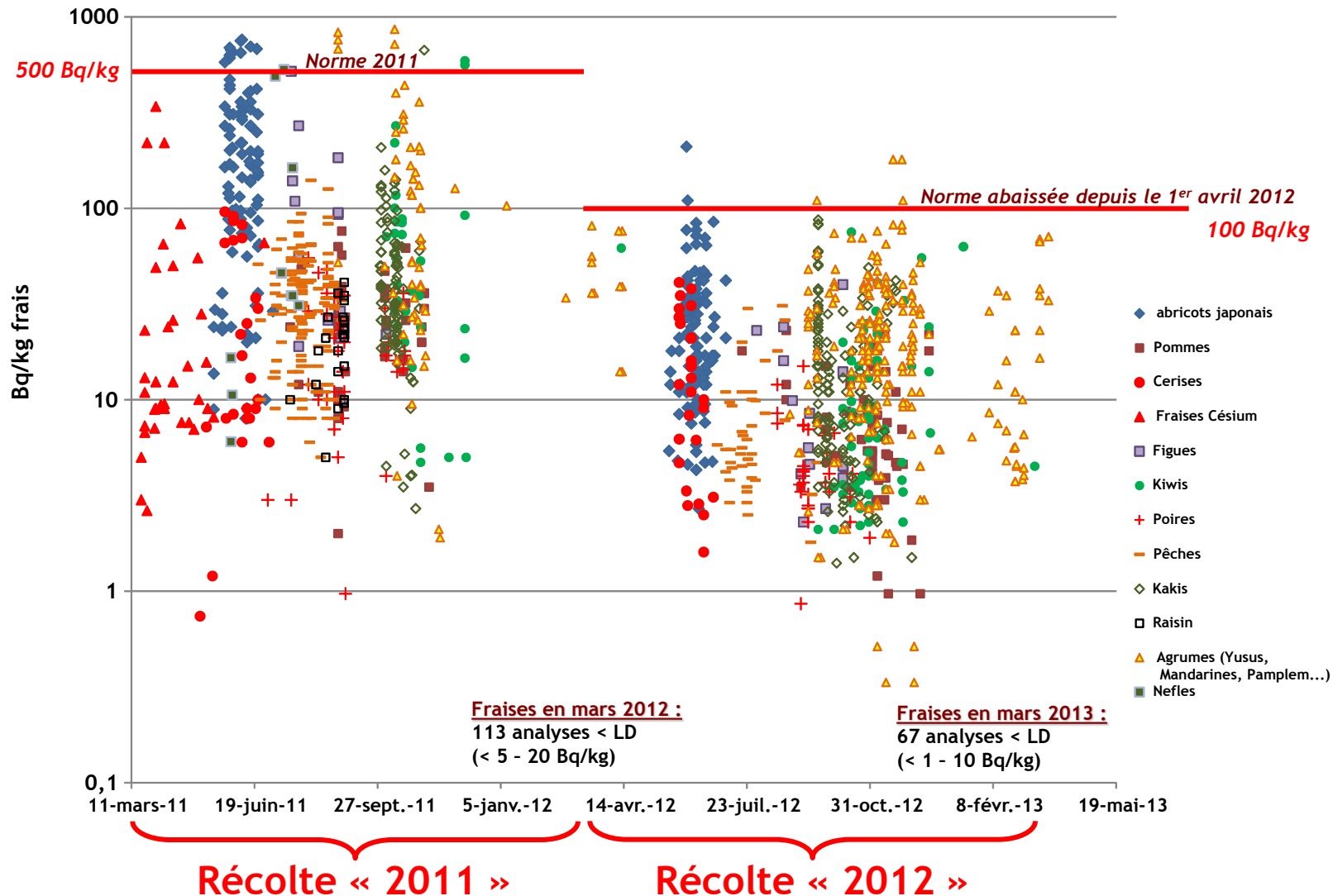
## Activité massique en césium 134+137 (et en iode 131 pour les fraise) dans les fruits en 2011 (toutes préfectures)



- ➡ Des productions fruitières relativement épargnées en raison de la date précoce des dépôts
- ➡ Les abricots japonais et les yusus plus précoces que les autres fruits de verger
- ➡ Les fraisiers sont des plantes herbacées avec des feuilles développées en mars



## Évolution de l'activité massique en césium 134+137 dans les fruits entre 2011 et 2012 (toutes préfectures)



# Contamination des productions de grande culture

## Activité massique en césium 134+137 dans le riz, autres céréales et productions assimilées en 2011 (toutes préfectures)

Bq/kg frais

800

700

600

500

400

300

200

100

0

30 avril

19 juin

08 août

27 sept.

16 novembre



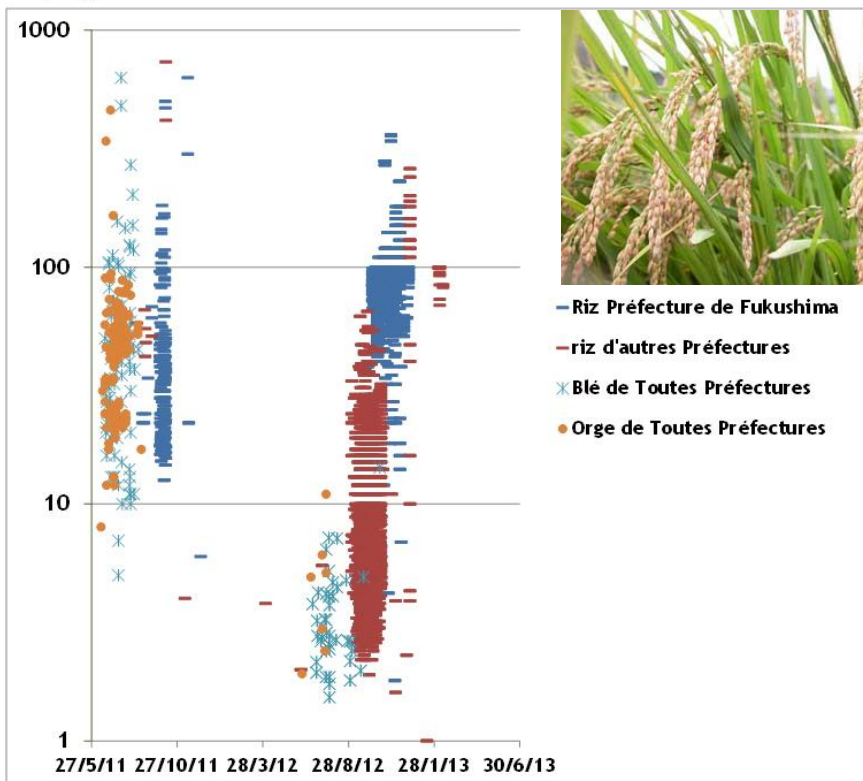
	Nb d'analyses	Nb > LD
◆ Riz	1720	301
■ Graines de soja	197	32
▲ Blé	237	104
× Sarrasin	200	26
- Orge	298	187
Maïs	73	2 (15 et 2 Bq/kg)

*Norme 2011*

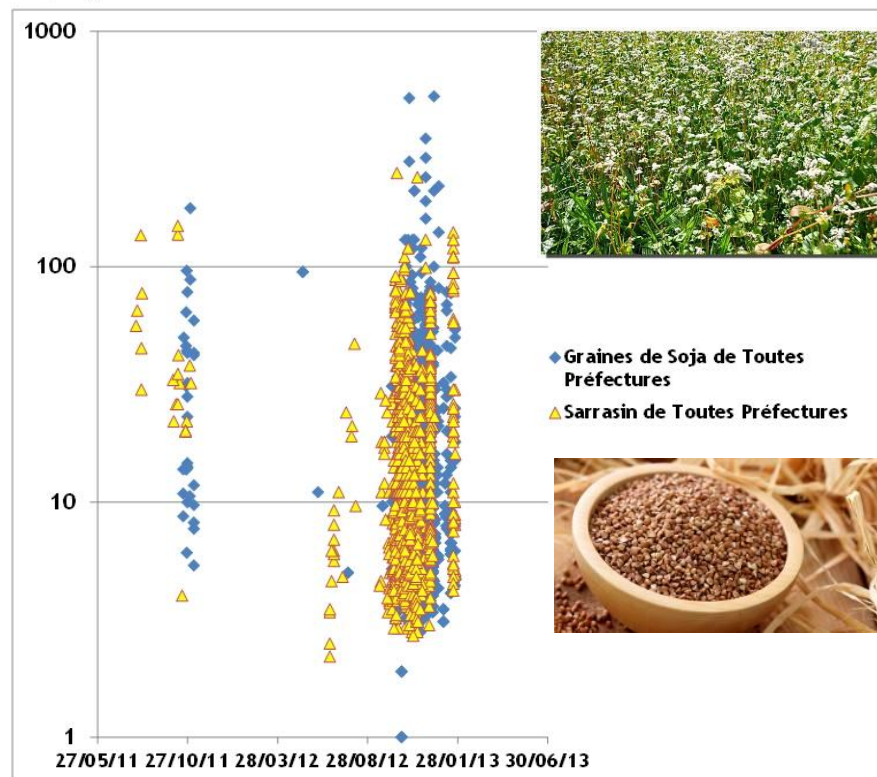
- ➔ Productions de grandes cultures peu impactées en raison de la date précoce de l'accident
- ➔ Sensibilité particulière du riz en raison de son mode de culture (immersion dans l'eau)

## Évolution de l'activité massique en césium 134+137 dans les productions de grande culture entre 2011 et 2012 (toutes préfectures)

Bq/kg frais



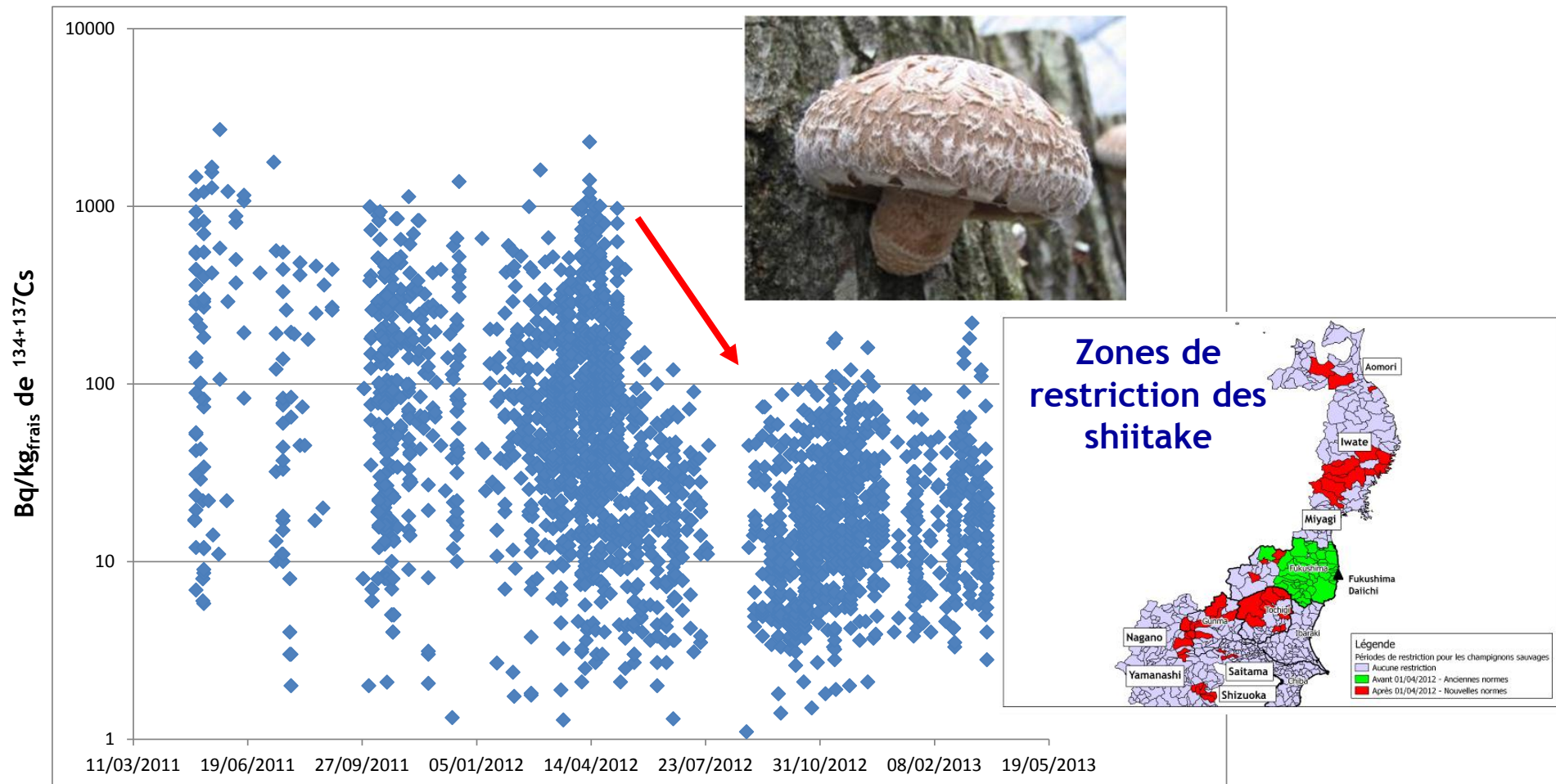
Bq/kg frais



- ➔ Une diminution des niveaux d'un ordre de grandeur pour le blé et l'orge
- ➔ Des niveaux stables entre 2011 et 2012 pour les graines de soja et le sarrasin
- ➔ Le riz de la Préfecture de Fukushima nettement plus contaminé que celui des autres Préfectures en 2012 (rôles des apports d'eau des montagnes ?)

# Contamination des champignons

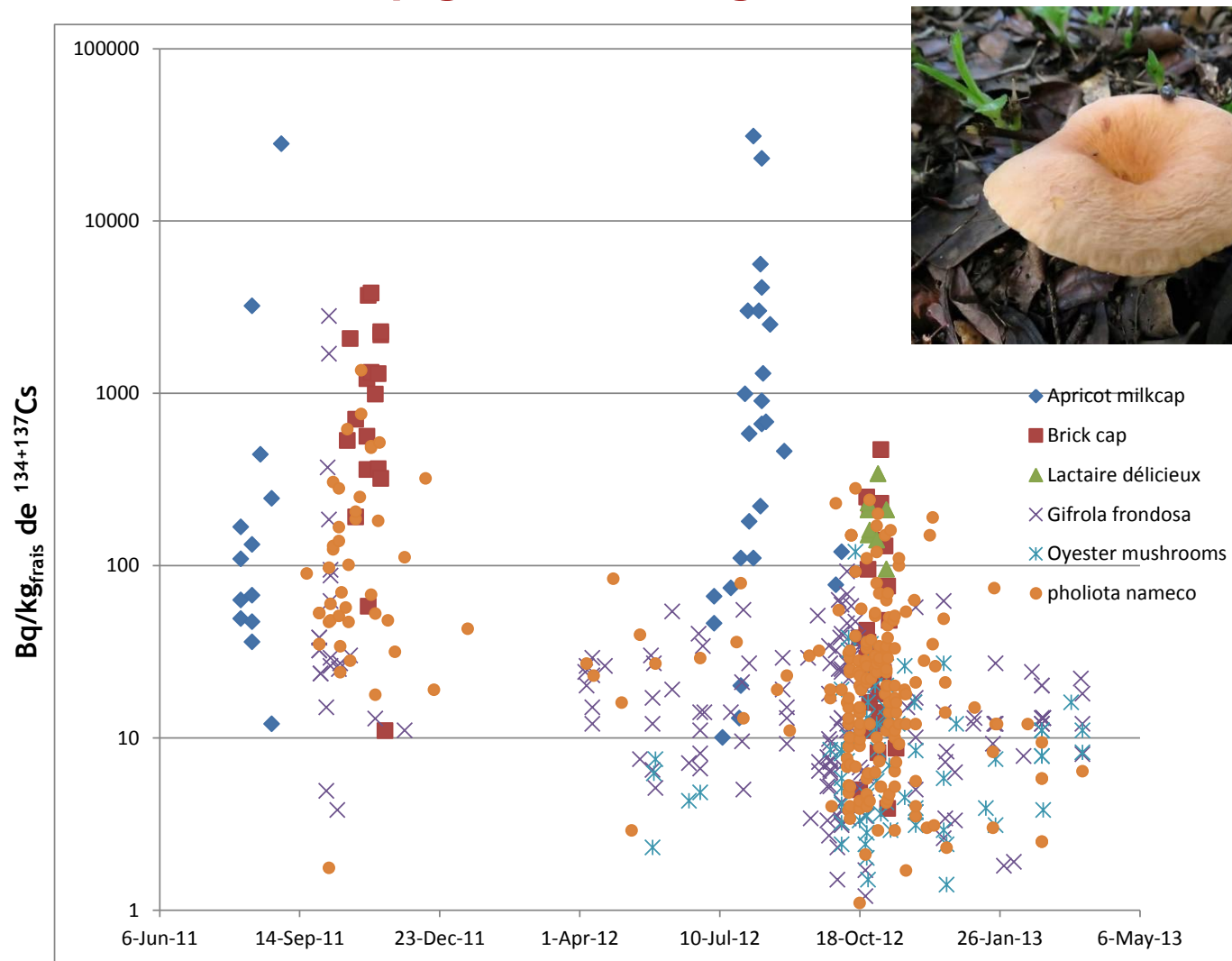
## Activité massique en césium 134+137 dans les champignons shiitake (toutes préfectures - 4050 analyses depuis mars 2011 dont 60 à 75% > LD)



- ➡ **Sensibilité précoce (absorption par le mycélium superficiel)**
- ➡ **Forte influence du substrat de culture (⇒ forte variabilité des concentrations)**

# Contamination des champignons

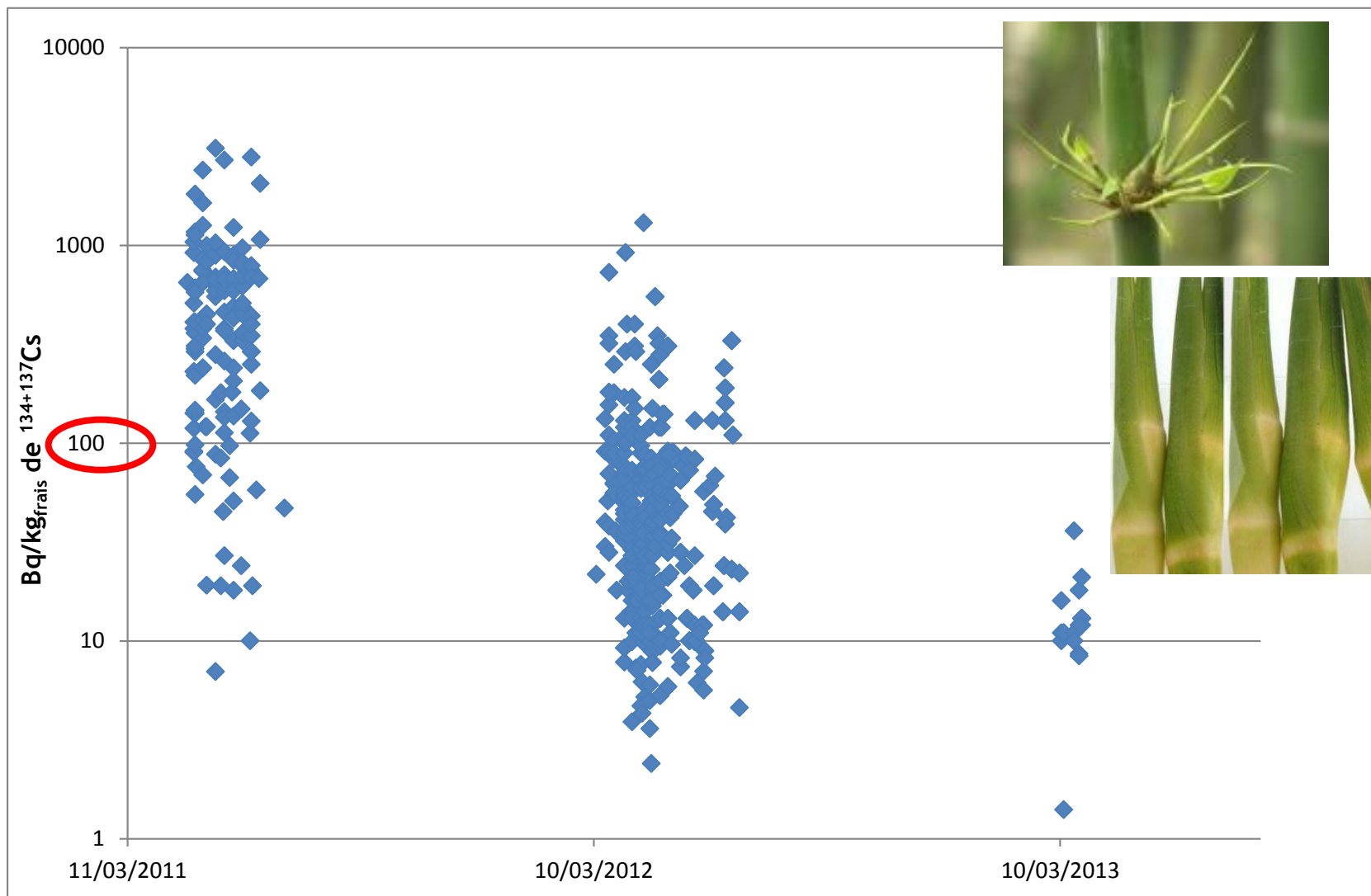
## Activité massique en césium 134+137 dans diverses espèces de champignons sauvages entre mars 2011 et mars 2013



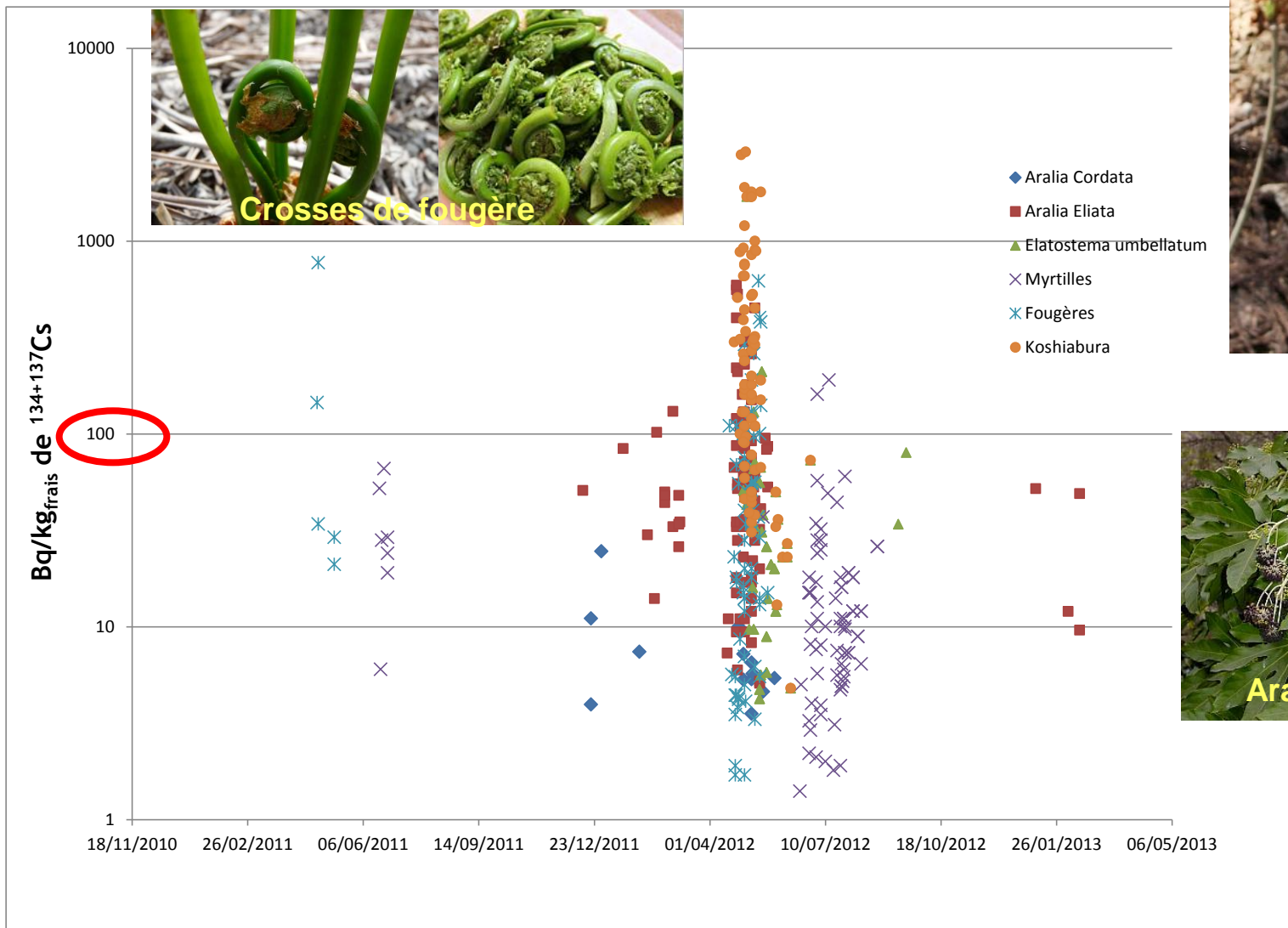
Apricot milk cap (*Lactarius volemus* - Lactaire à lait abondant)

- ➡ Forte variabilité interspécifique de sensibilité à la contamination au césium
- ➡ Persistance dans le temps

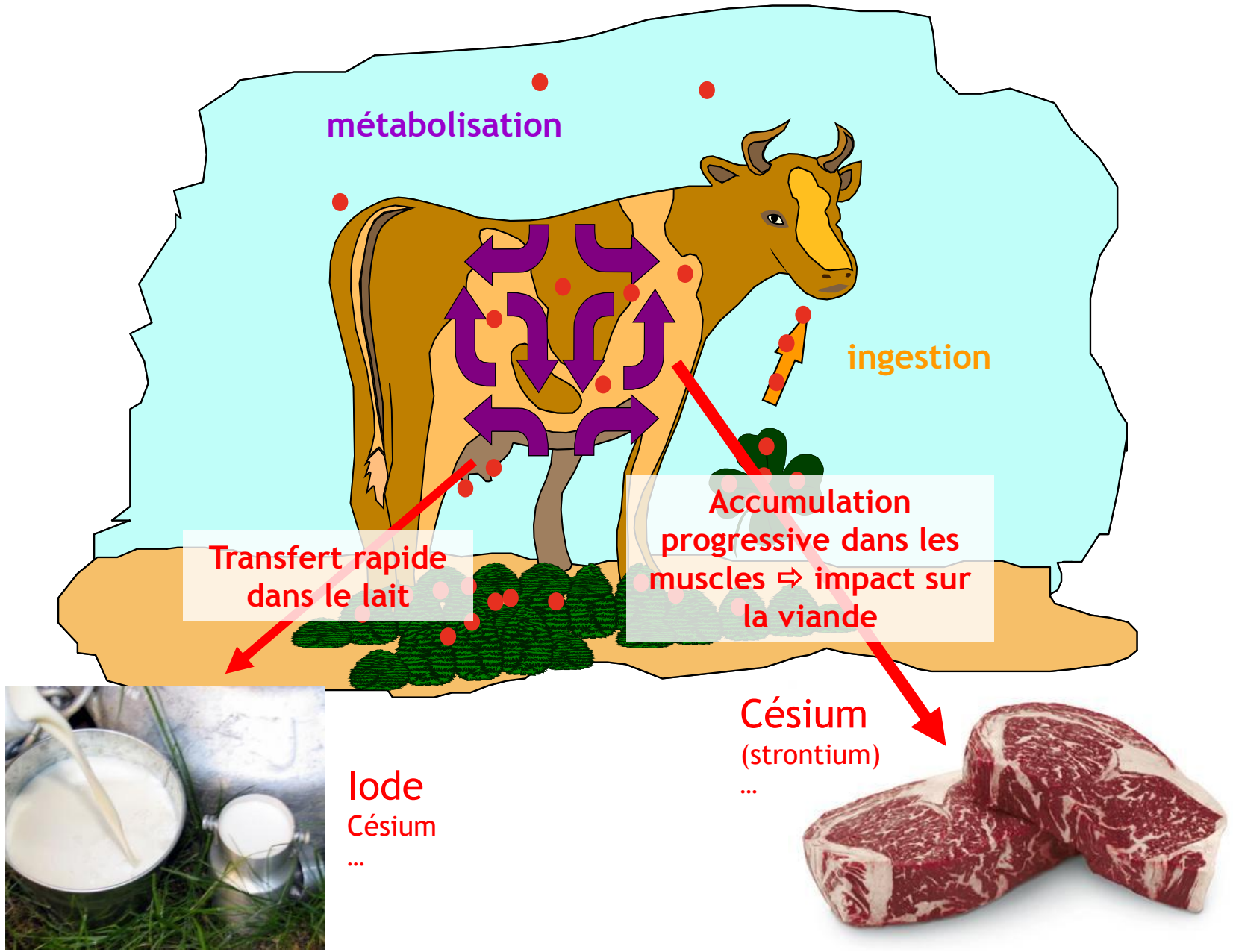
## Évolution de l'activité massique en $^{134+137}\text{Cs}$ des pousses de bambou entre 2011 et 2013



## Évolution de l'activité massique en $^{134+137}\text{Cs}$ des pousses de plantes sauvages entre 2011 et 2012



# Généralités sur les phénomènes de contamination des animaux

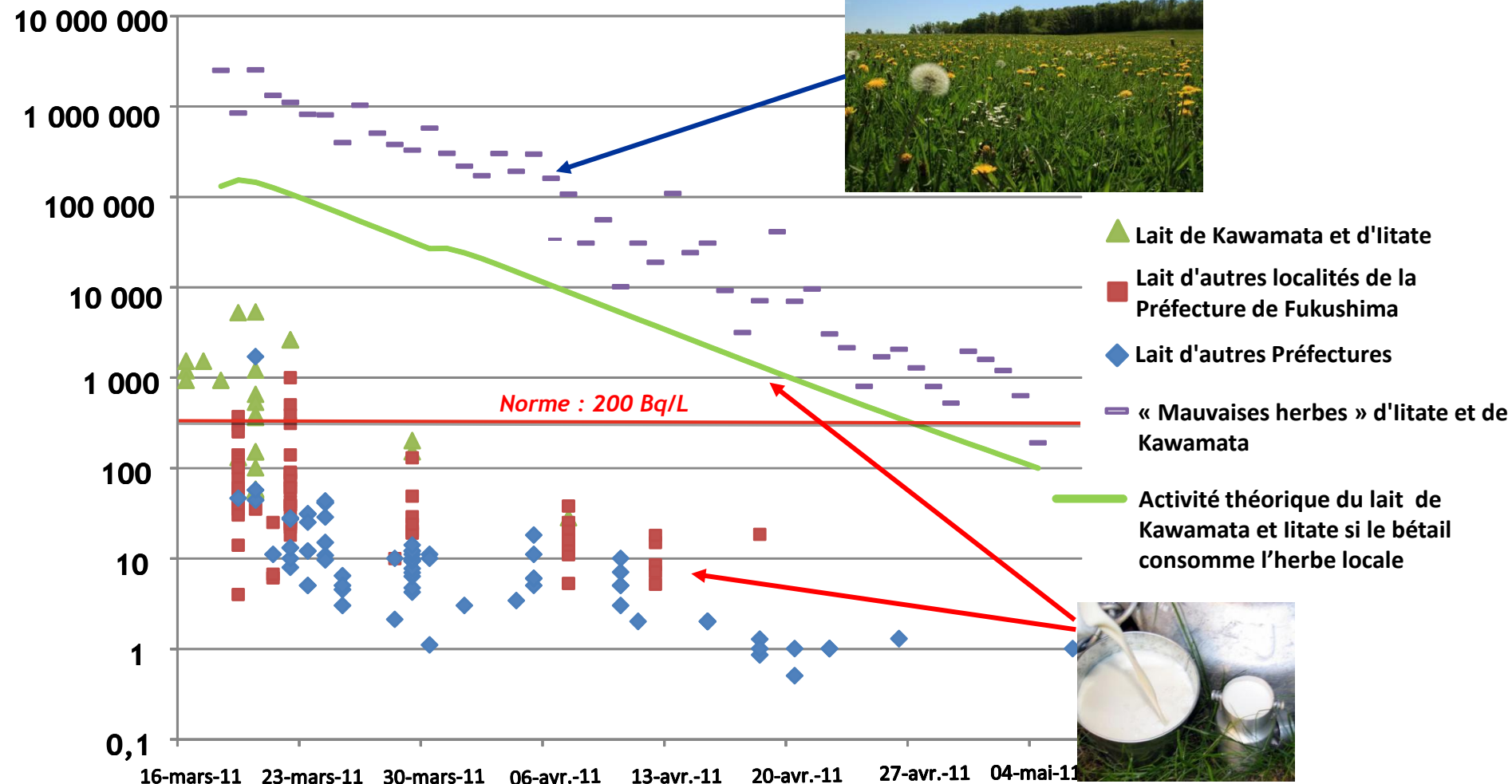




# Contamination du lait après l'accident

## Comparaison de l'impact observé et de l'impact théorique sur le lait produit à Iitate et Kawamata

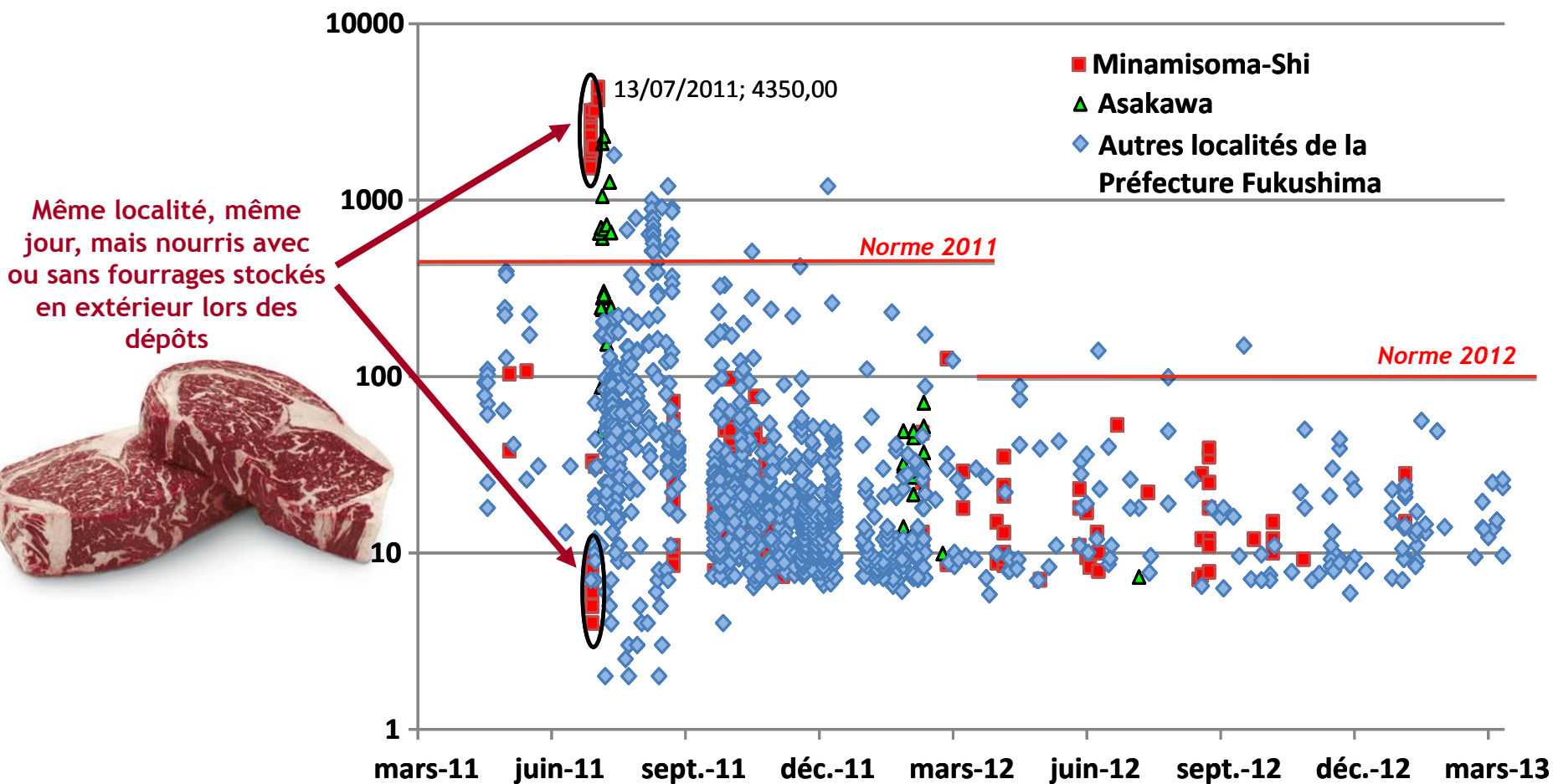
Activité volumique en iode 131 en Bq/L



# Contamination de la viande bovine

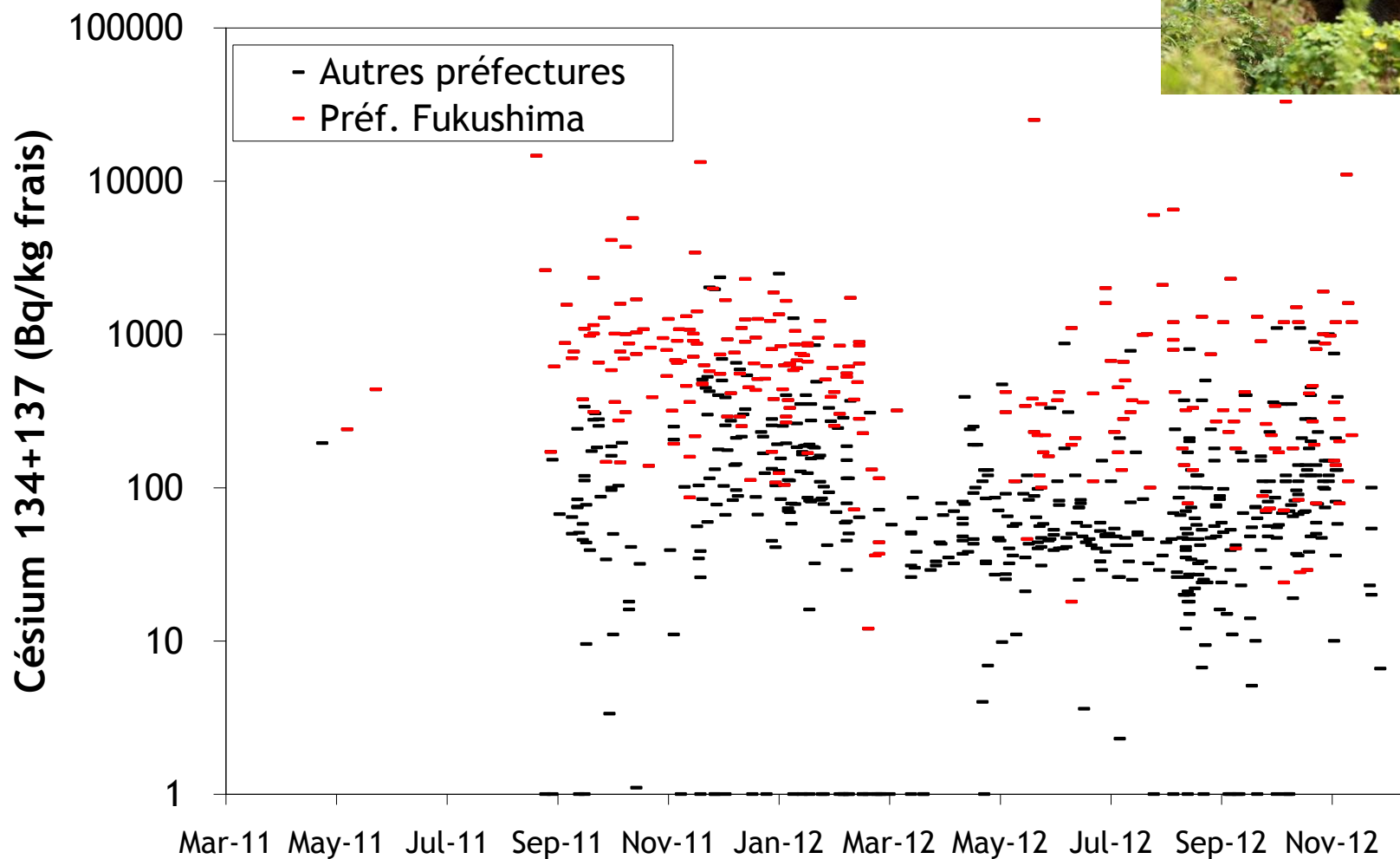
## Activité massique en $^{134+137}\text{Cs}$ dans la viande de bœuf produite dans la Préfecture de Fukushima

Activité massique en césium 134+137 en Bq/kg frais



- ➡ Contamination directement liée à celles des fourrages, peu liée aux dépôts locaux
- ➡ Niveaux de contaminations similaires de la viande originaire des Préfectures de Miyagi et d'Iwate

## Activité massique en $^{134+137}\text{Cs}$ dans la viande de sangliers chassés dans différentes préfectures en 2011 et 2012 (source : MHLW, 2013)



## Concernant la contamination des territoires

- **Une contamination de l'environnement ayant fortement décru depuis 2011** (quasi uniquement du césium 134 et 137), mais qui est pérenne et évoluera lentement
- Les territoires les plus contaminés resteront durablement une **zone d'exclusion**
- Certains territoires sont destinés à être réoccupés à court ou moyen terme, éventuellement après décontamination ⇒ **2 ans après l'accident, la réinstallation des populations et le développement d'activités économiques et sociales constituent une opération difficile et la population est indécise**
- Un débat se poursuit entre la population, les experts et les autorités sur **les niveaux de contamination acceptables** et les objectifs de décontamination
- Les programmes de surveillance de l'exposition des populations (dosimétrie externe et anthroporadiamétrie (WBC)) donnent des résultats qui montrent que **les expositions sont globalement faibles et bien maîtrisées**
- Le **milieu forestier** (70% de la superficie des territoires les plus contaminés) est plus fortement contaminé et sa gestion est problématique

## Concernant les denrées alimentaires

- **Une amélioration sensible de la situation pour de nombreuses catégories de denrées** (notamment les légumes, la viande d'animaux d'élevage et le lait), par rapport au printemps 2011
- Une **évolution des normes de commercialisation** cohérente avec cette situation
- **Un dispositif de surveillance renforcé** permettant de mieux discriminer les dépassement de normes et de couvrir l'ensemble des 47 préfectures du Japon
  - ⇒ **Allègement des contrôles des denrées alimentaires en provenance du Japon à destination de la CEE**
- **Des catégories de denrées toujours sensibles** à la contamination rémanente : notamment les poissons de rivière, certains poissons de mer, la viande de gibier, les champignons, les plantes sauvages
  - ⇒ **Nécessité de maintenir une surveillance durable des productions**



Merci pour votre attention