

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

ESTIMATION DES REJETS PAR MODÉLISATION INVERSE EN SITUATION INCIDENTELLE

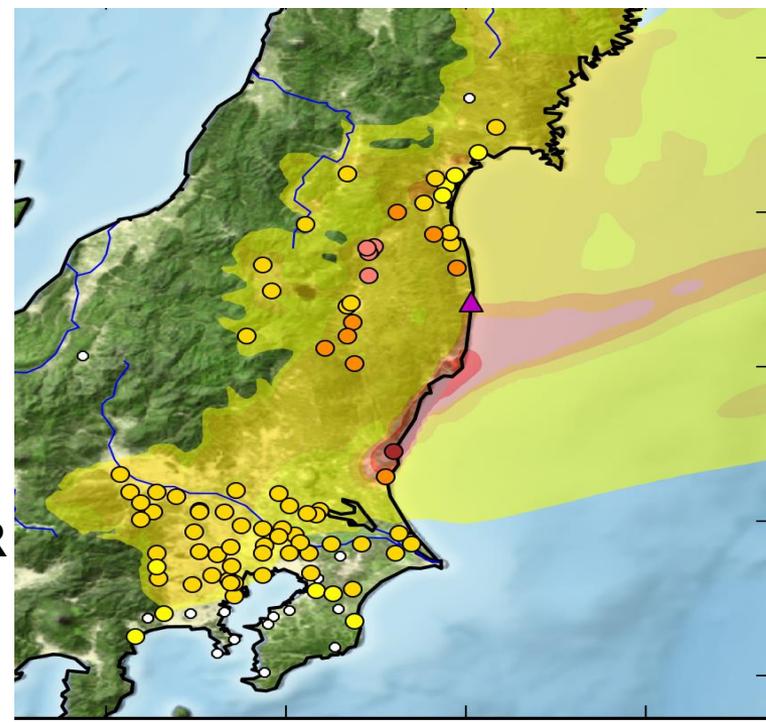
Exemples d'applications

IRSN - PRP-CRI/SESUC/BMCA

2 février 2017

SFRP - Journées Air & Radioactivité

Olivier SAUNIER, Anne MATHIEU, Damien DIDIER



Fortes incertitudes sur les données d'entrée des modèles de dispersion

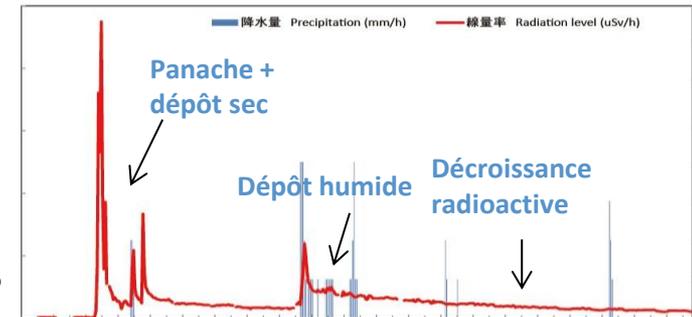
- ❑ Développer une méthode opérationnelle de reconstruction du terme source (TS) à partir des mesures dans l'environnement.
 - ❑ Situation accidentelle
 - Améliorer un TS antérieur (évalué à partir de l'état de l'installation)
 - Construire un TS sans prise en compte d'informations *a priori*.
 - Aider à une meilleure analyse et compréhension des évènements de rejets.
 - ❑ Surveillance de l'environnement (évènements mineurs)
 - Localiser le point de rejet.
 - Estimer les émissions.

Etat de l'art en modélisation inverse avant l'accident de Fukushima

- ❑ Utilisation des mesures d'activité dans l'air.
- ❑ Peu de cas d'application : Tchernobyl, ETEX et mesures synthétiques.

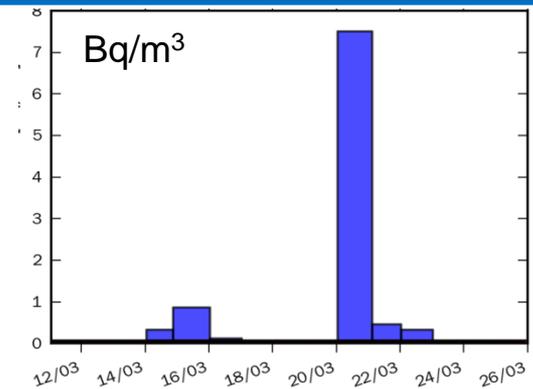
Mesures de débits de dose gamma

- ☺ Haute résolution temporelle, couverture spatiale dense, disponible en temps réel.
- ☹ Pas d'accès direct à la composition isotopique du rejet, limite de détection trop élevée pour détecter des évènements de rejets mineurs.



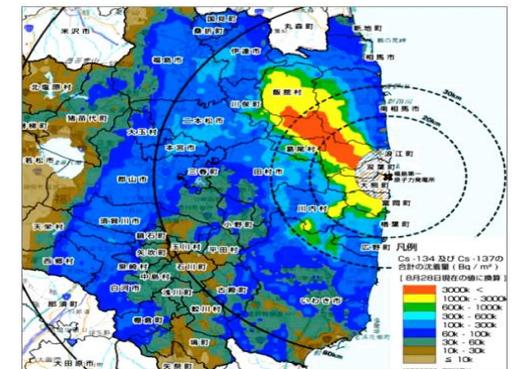
Mesures de concentration dans l'air

- ☺ Fournit directement l'information sur la composition isotopique du rejet. Très basse limite de détection permettant la détection d'évènements mineurs.
- ☹ Couverture clairsemée. Concentrations intégrées sur une semaine ou à la journée, pas de données en temps réel.



Mesures de dépôt total

- ☺ Couverture spatiale dense. Accès la composition isotopique du rejet.
- ☹ Pas d'informations sur l'occurrence de l'évènement ayant conduit au dépôt. Données non disponibles en temps réel.



MODÈLE DISPERSION ATMOSPHÉRIQUE

Gaussien- Eulérien - Lagrangien

+

OBSERVATIONS

Activité
volumique

Débit de dose gamma

ETAPE 1 : DÉFINITION DE L'INFORMATION A PRIORI

Calcul de la matrice d'observation H (réponse du modèle aux points de mesures)

Localisation du point de rejet ou candidat potentiel - ébauche

Construction du vecteur observations

Composition isotopique du rejet

→ Réduction du nombre de paramètres inconnus + limiter l'espace des solutions

SI ACTIVITE VOLUMIQUE

SI DEBIT DE DOSE GAMMA

ETAPE 2 : IDENTIFIER LES PÉRIODES DE REJETS
POTENTIELLESExtraction de la composante panache par inversion
→ Réduire le nombre de paramètres et l'espace des solutions

ETAPE 3 : ESTIMER LES DEBITS DE REJETS

Inversion sur la toute la période

Cost function $J(\sigma) = \|\mu - H\sigma\|^2 + \lambda^2 \|\sigma - \sigma_b\|^2$

Inversion sur les périodes identifiées dans l'étape 2

Cost function $J(\sigma) = \|\mu - H\sigma\|^2 + \lambda^2 \|\sigma - \sigma_b\|^2 + \sum_{i=1}^{n_{isotope}-1} r_i^2$ M
O
D
E
L
I
S
A
T
I
O
N

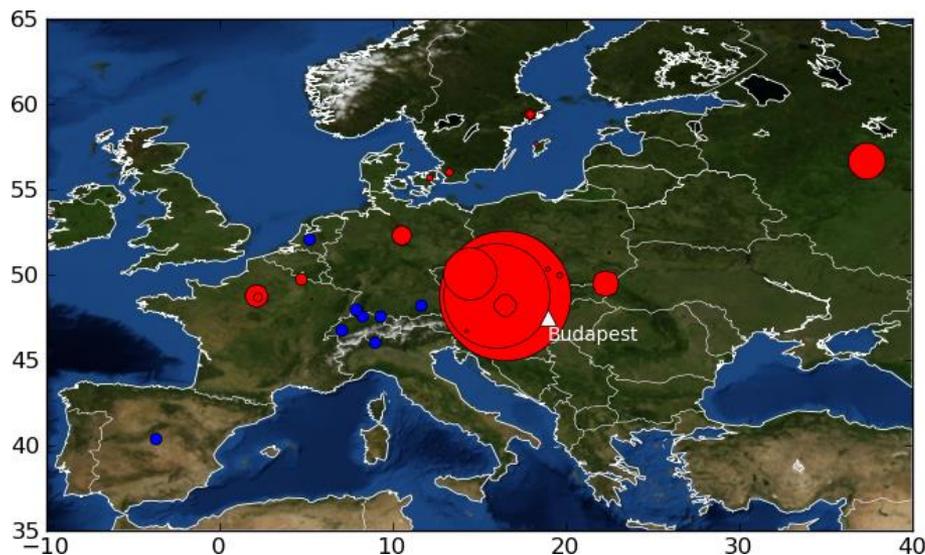
I
N
V
E
R
S
E

■ Exemples d'application : Mission de surveillance

- Episode iode Hongrois oct-nov 2011

Exemples de reconstruction d'un rejet à partir des activités dans l'air

Détection d' ^{131}I sur plusieurs stations en Europe (oct-nov 2011)



Activité moyenne sur 1 – 7 jours	
République Tchèque	27 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$
Est de l'Autriche	65 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$
Est de l'Allemagne	14 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$
Pologne	13 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$
Slovaquie	16 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$
Suède	5 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$
Hongrie	87 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$
Ukraine	7 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$
N-NE de la France	5 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$

□ Besoins et enjeux

- Localiser le point de rejet
- Estimer les quantités émises
- Prédire les zones impactées par le panache

□ Calculs réalisés

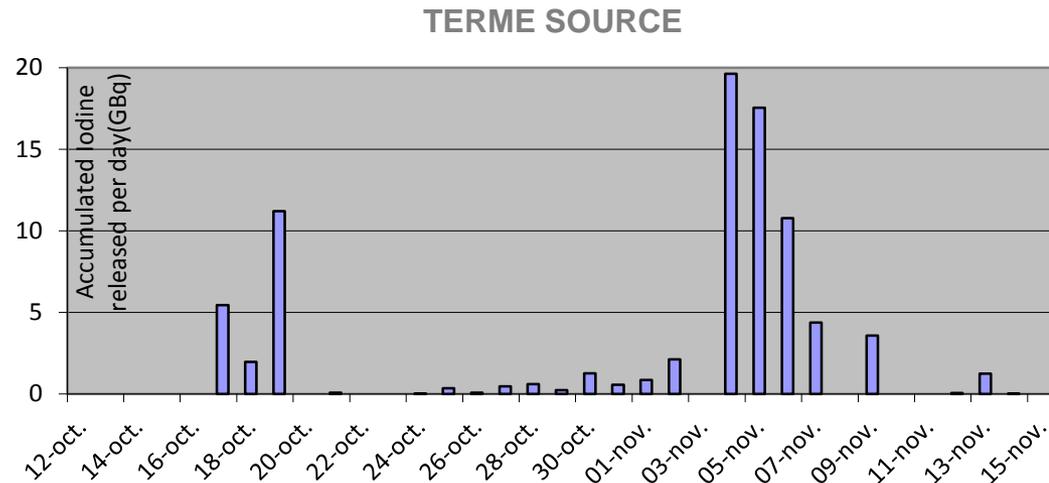
- Discrimination du rejet à partir de plusieurs sites potentiels
- Evaluation des quantités rejetées une fois le point de rejet connu (Institut des Isotopes à Budapest)

Evaluation du TS par modélisation inverse (17 oct – 14 nov)

MODELISATION INVERSE

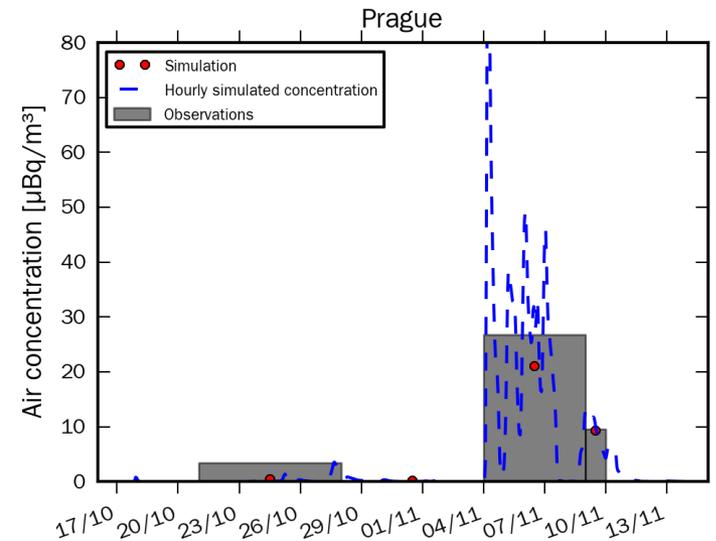
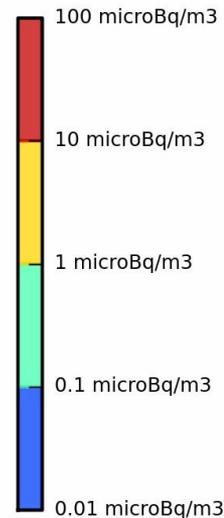
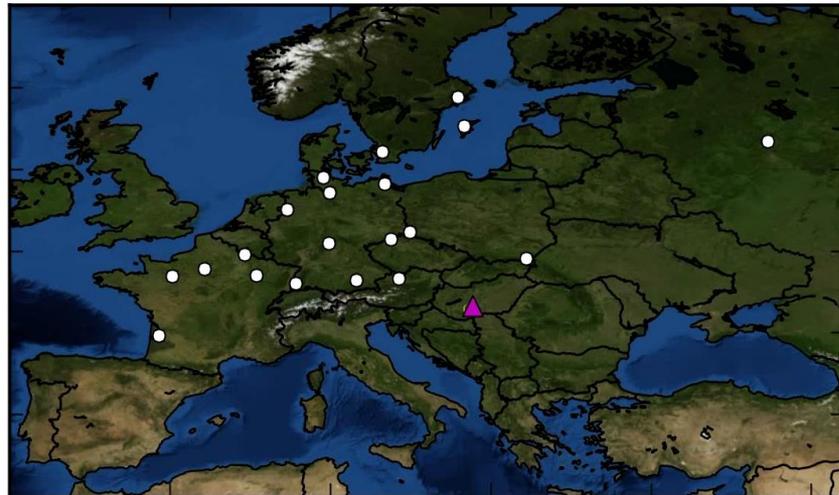
DONNEES D'ENTREE 

Modèle de dispersion	Modèle Eulerien IdX
Champs météorologiques	ARPEGE (Météo France) 50 km
Activités dans l'air	41 Stations – 59 observations



Validation du TS par comparaison aux mesures

2011-10-16_01h00



■ Réponse aux situations d'urgence

- L'accident de Fukushima : un cas de référence complexe
 - Rejets dans l'atmosphère pendant près de 3 semaines
 - Relief particulier, conditions météorologiques variables (pluie, neige, changements brusques d'orientation du vent)
 - Beaucoup de mesures (activité dans l'air, débit de dose, dépôt)
- Exercice de crise de Cruas : vers une utilisation en temps réel

Application de la méthode inverse aux mesures de débit de dose

- Reconstruction du TS en ^{136}Cs , ^{134}Cs , ^{132}Te , ^{133}Xe , ^{131}I , ^{132}I , ^{137}Cs et $^{137\text{m}}\text{Ba}$ sans prise en compte d'une estimation *a priori* (observations nombreuses).
- Introduction de contraintes sur les ratios isotopiques dans la fonction de coût.

ETAPE 1 : DONNEES D'ENTREE



ETAPE 2 : PERIODES
POTENTIELLES DE REJETS

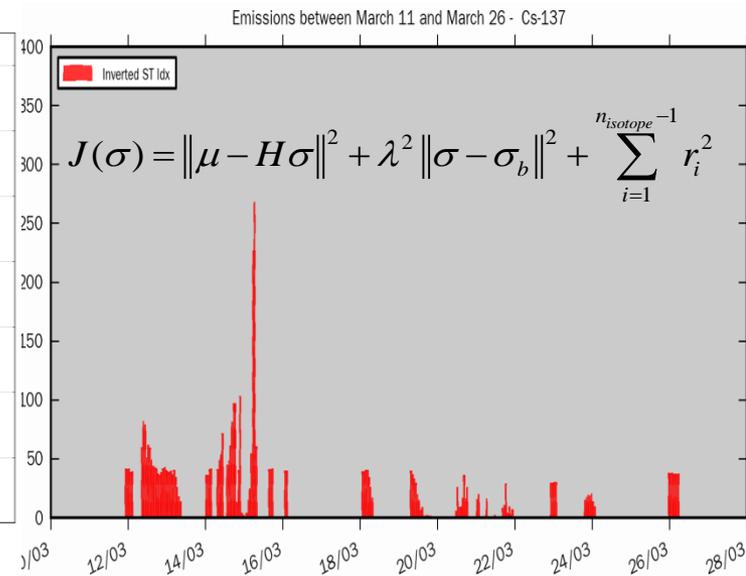
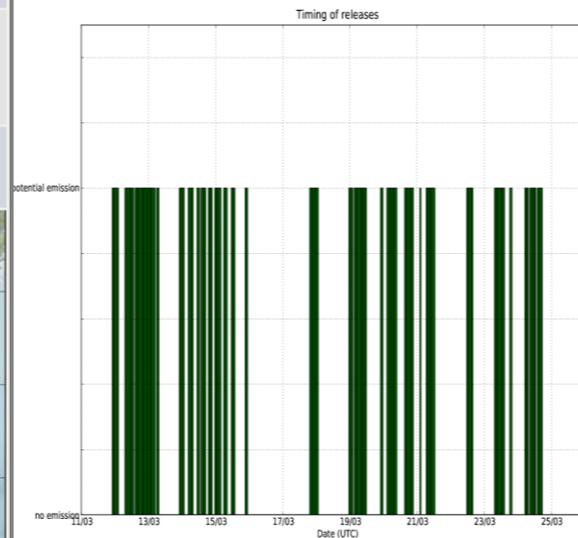


ETAPE 3 : EVALUATION DES DEBITS DE
REJET

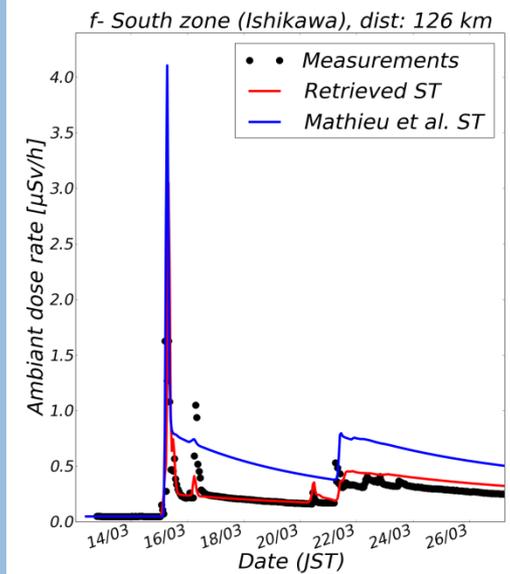
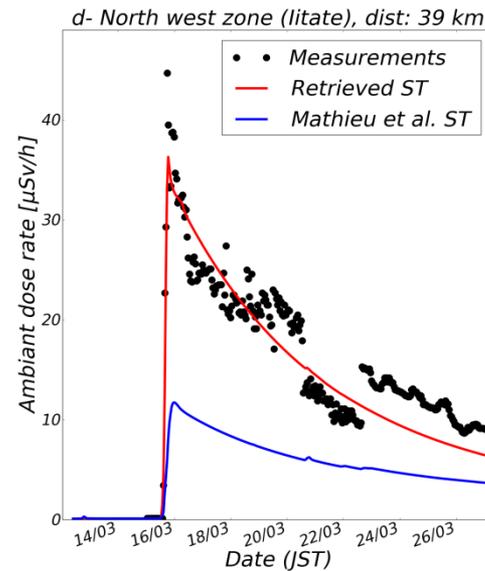
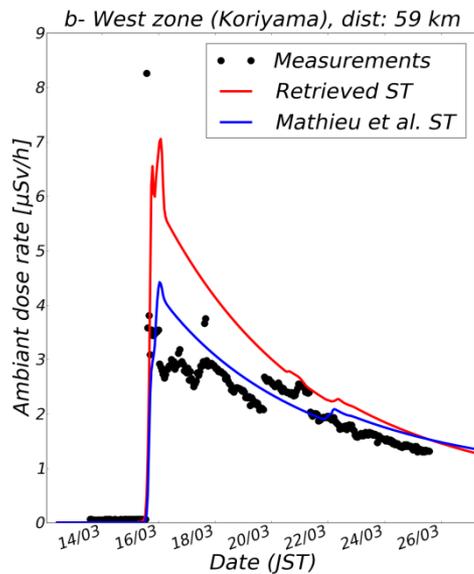
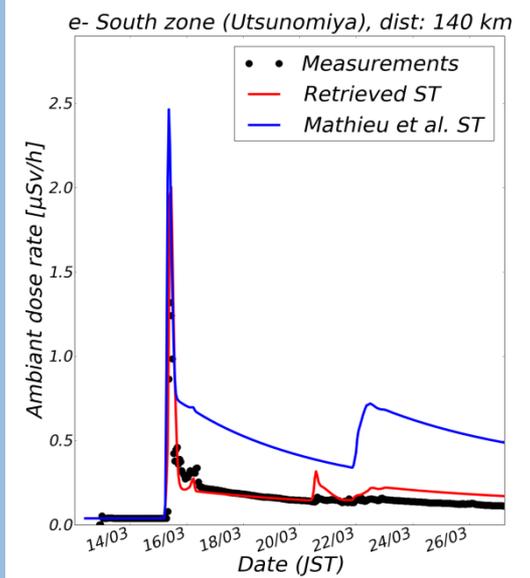
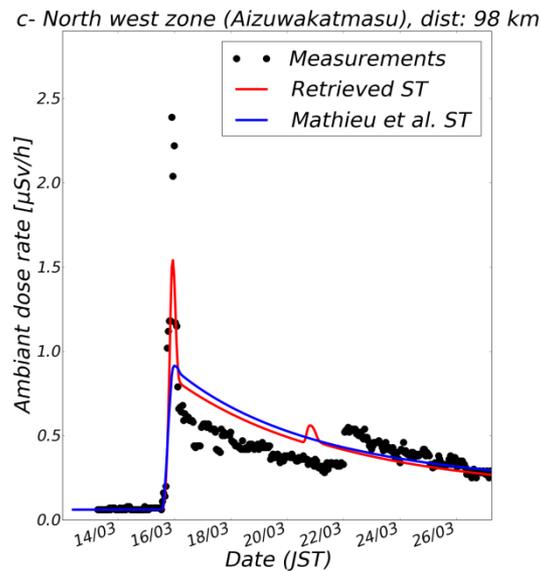
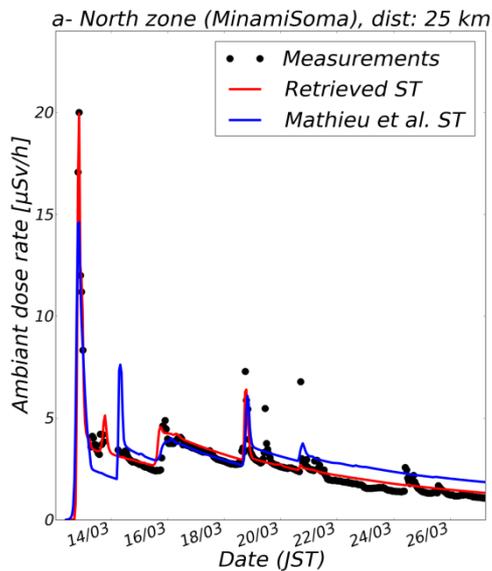
Modèle Eulerien IdX

Champs météorologiques
CEP dx = 12 km, dt = 3 h

66 Stations – 23000 obs. (dt= 1h)



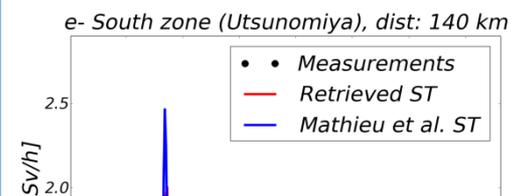
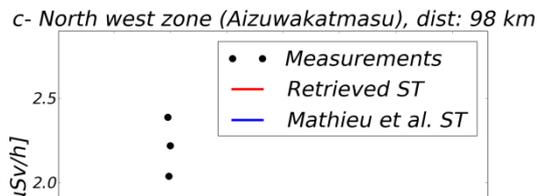
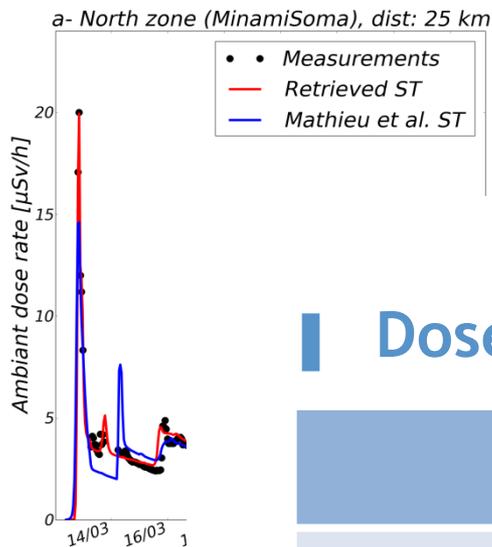
- ✓ Temps de calculs compatibles avec une utilisation opérationnelle



Bon accord modèle-mesures.

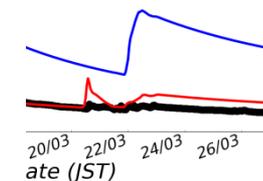
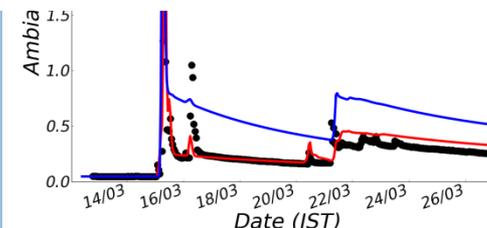
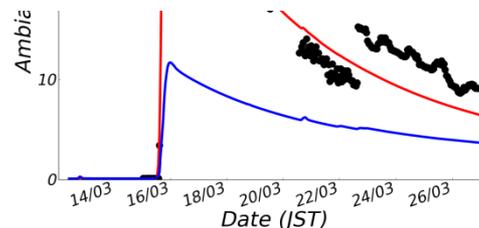
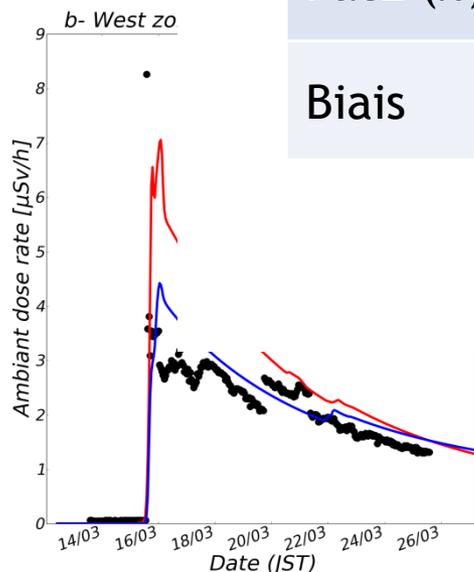
Des pics supplémentaires sont identifiés par la méthode inverse.

Les écarts aux mesures sont principalement dûs aux erreurs dans les données météo.

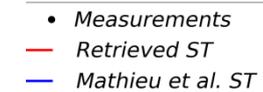


Dose rate

	TS inverse	Mathieu et al. TS
Fac2 (%)	79.8	60.0
Biais	0.42	0.59



shikawa), dist: 126 km



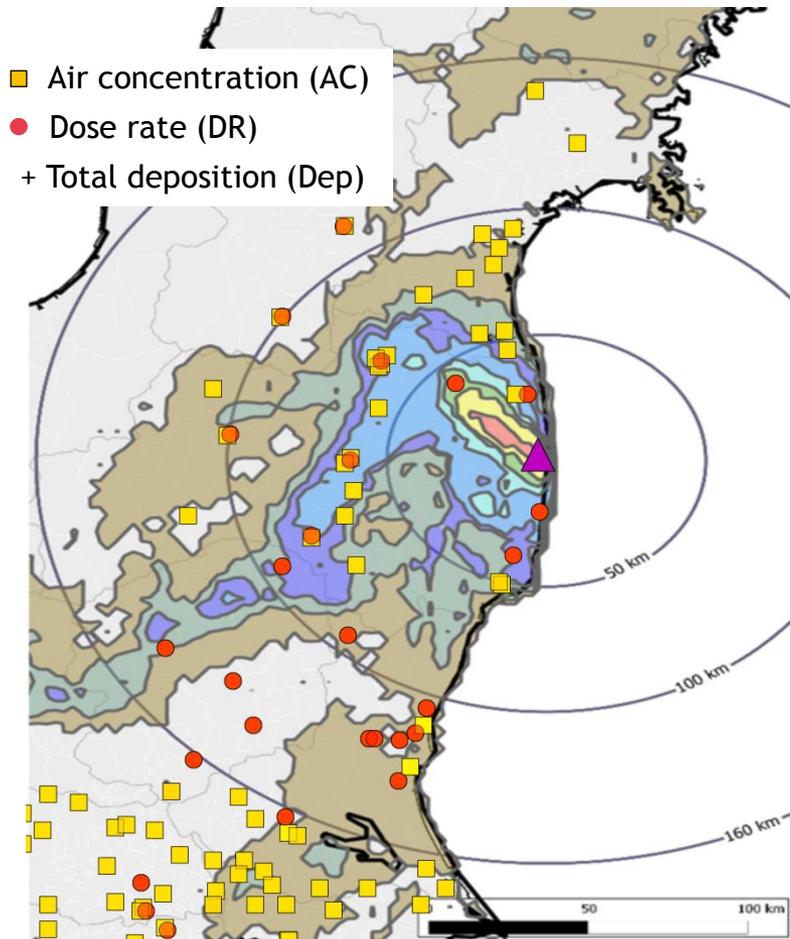
Bon accord modèle-mesures.

Des pics supplémentaires sont identifiés par la méthode inverse.

Les écarts aux mesures sont principalement dûs aux erreurs dans les données météo.

Validation du TS par comparaison aux observations de ^{137}Cs

2014-2016 : Exploitation des concentrations dans l'air en ^{137}Cs fournies par le réseau de surveillance de qualité de l'air (11520 obs.).

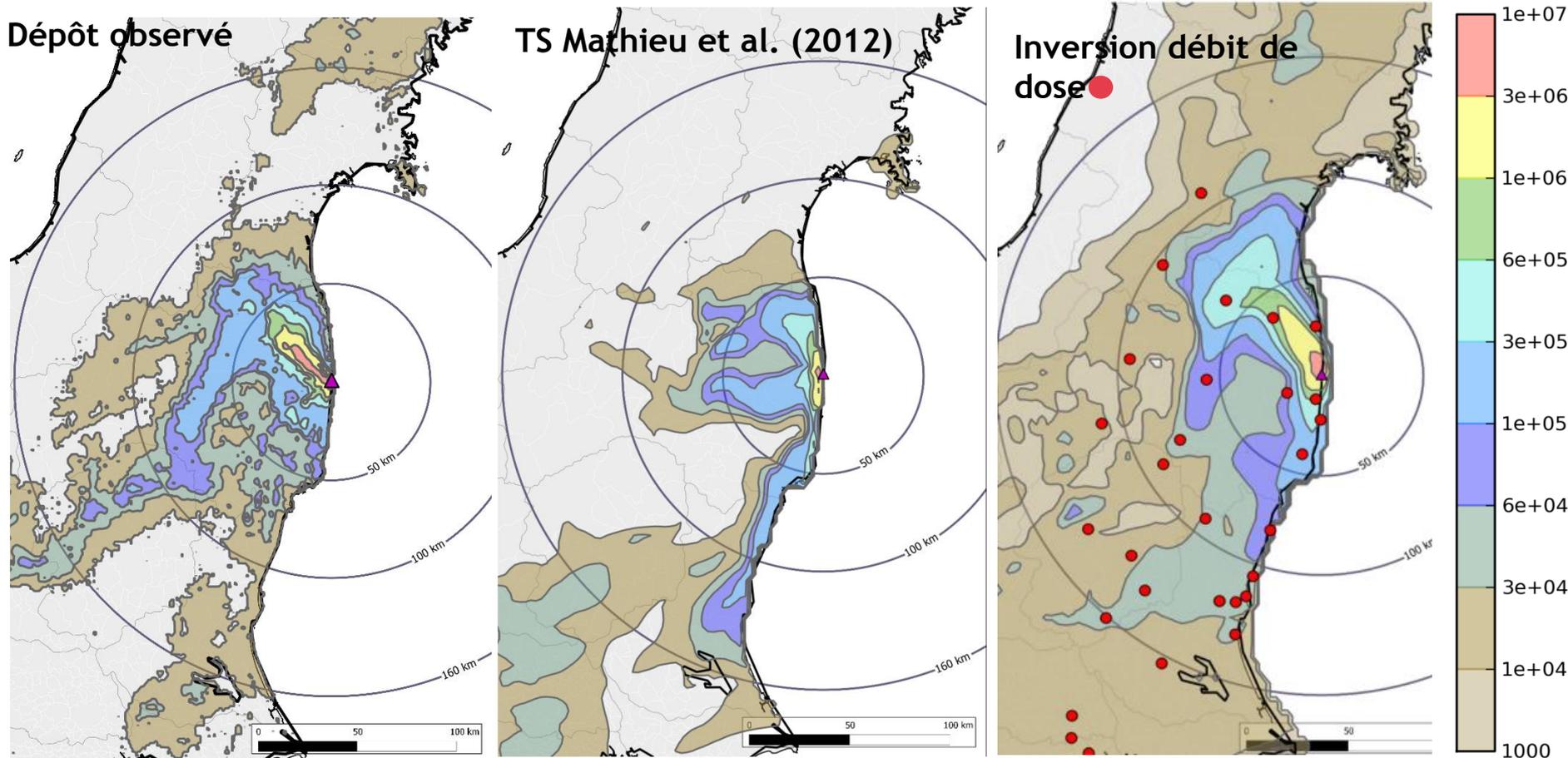


	FAC5(%)
Saunier <i>et al</i> 2013 (débit de dose)	40
Terada <i>et al</i> 2012	34
Winiarek <i>et al</i> 2014	37
Katata <i>et al</i> 2015	34
TS inverse (^{137}Cs)	51

- Pertinence du TS inversé à partir du débit de dose en comparaison aux autres estimations.
- Les scores sont encore perfectibles.
- L'exploitation de ces données au travers la modélisation inverse permet de mieux comprendre les événements de contamination.

Reconstruction de la contamination liée aux dépôts (^{137}Cs)

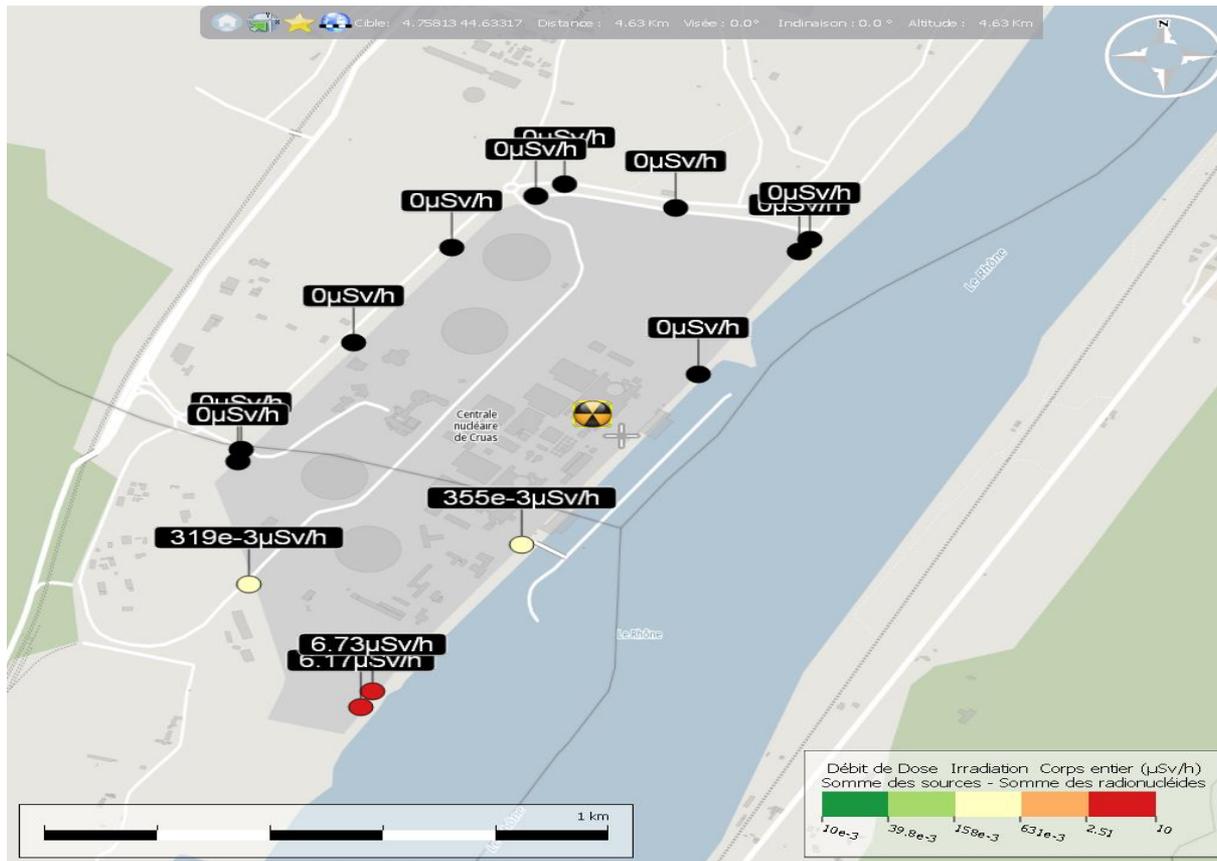
- Dépôt total en ^{137}Cs (non utilisé dans l'inversion)



- Amélioration de la reconstruction de la cartographie des dépôts.
- Reconstruction de certaines zones restant cependant imprécise.

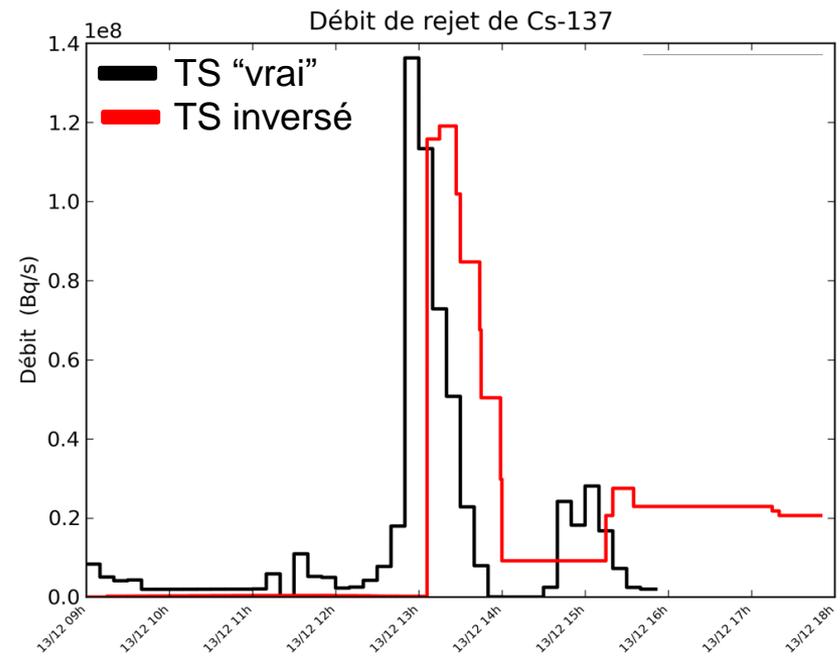
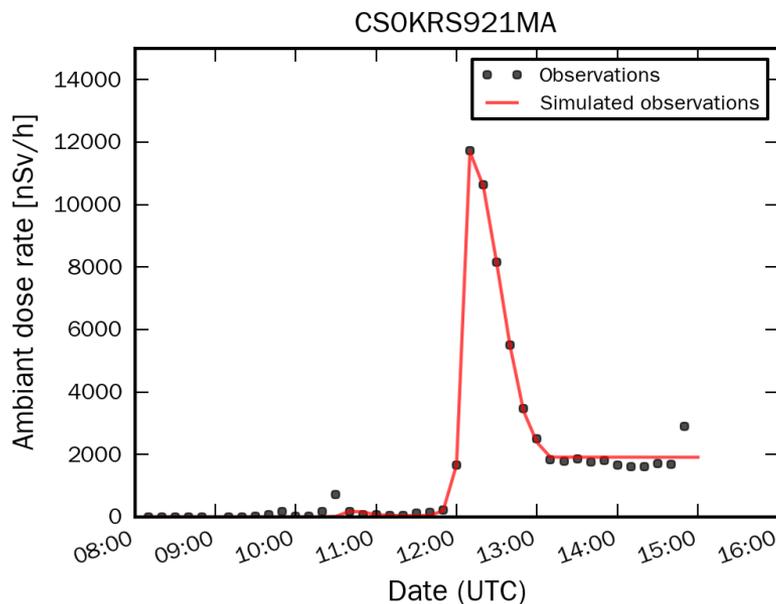
1^{ère} utilisation en exercice de crise : CNPE Cruas - Décembre 2016

- Evaluation de la capacité de la méthode à reconstituer un TS en temps réel
 - Scénario : 12h de rejet continu, météo réelle (vent faible)
 - Détection limitée aux balises site (débit de dose)



Réalisme du TS reconstruit par modélisation inverse

- Méthode inverse pertinente
 - TS réaliste (composition isotopique, timing des rejets) malgré le peu d'observations prises en compte dans le processus d'inversion.
 - Très bon accord modèle/mesures.
- Biais d'exercice : mesures scénarisées issues de résultats de modèles, homogénéité des paramétrisations du modèle (scénarisation/modélisation inverse)



Perspectives

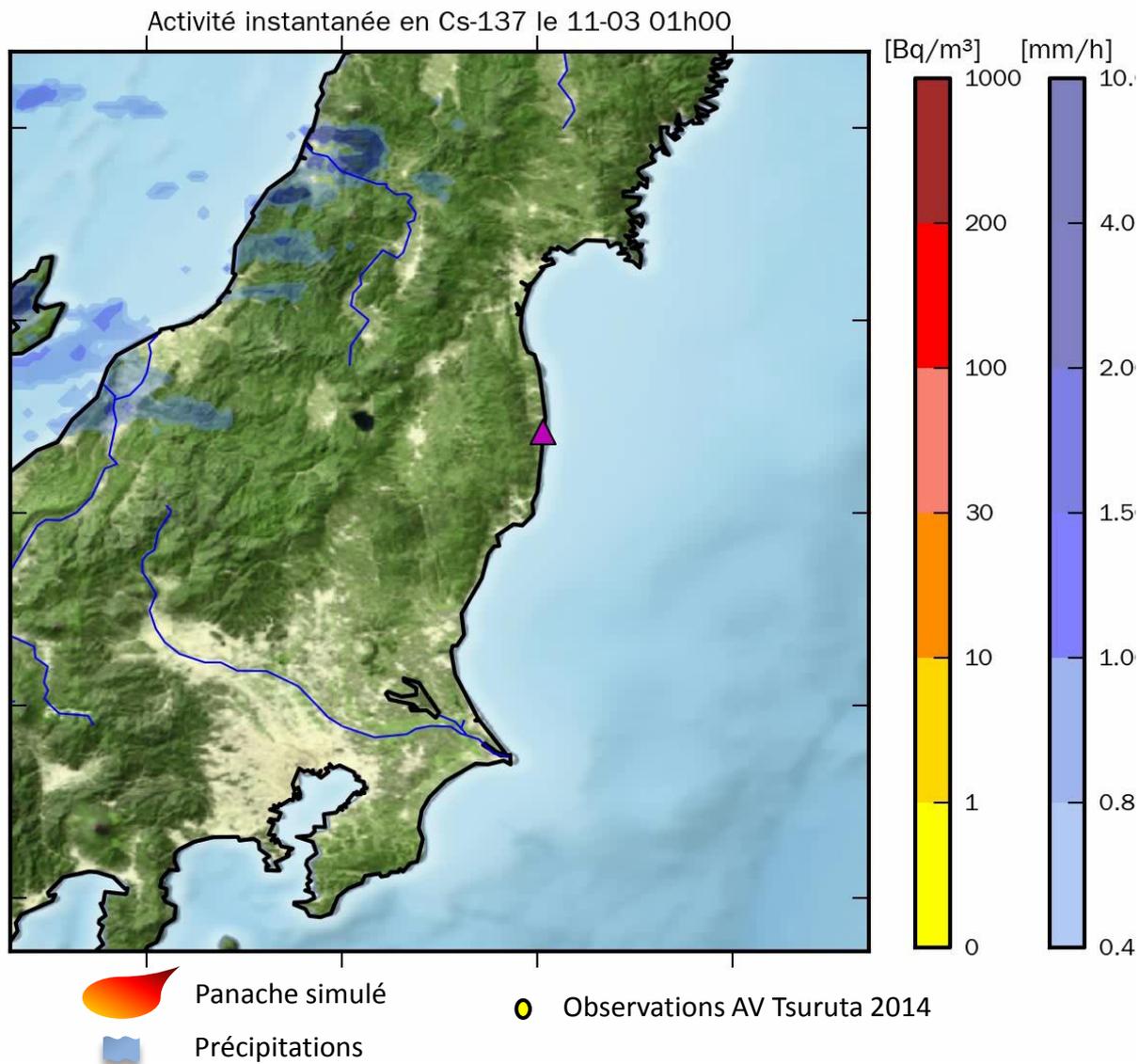
■ Méthodologie

- ❑ Utilisation conjointe de plusieurs types de mesures (activités volumiques, dépôt, débits de dose)
- ❑ Modélisation avancée des erreurs
- ❑ Localisation d'une source suite à un évènement de rejet mineur.

■ Opérationnalisation

- ❑ Développement d'outils d'aide à l'analyse des évènements de rejets en cas d'accident.
- ❑ Continuer à mettre en œuvre la méthode en exercice de crise

Merci pour votre attention!



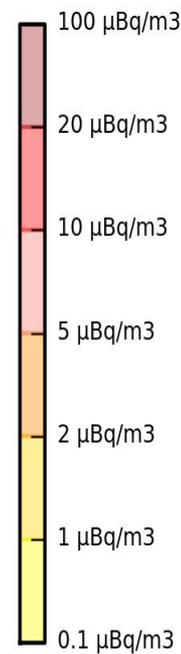
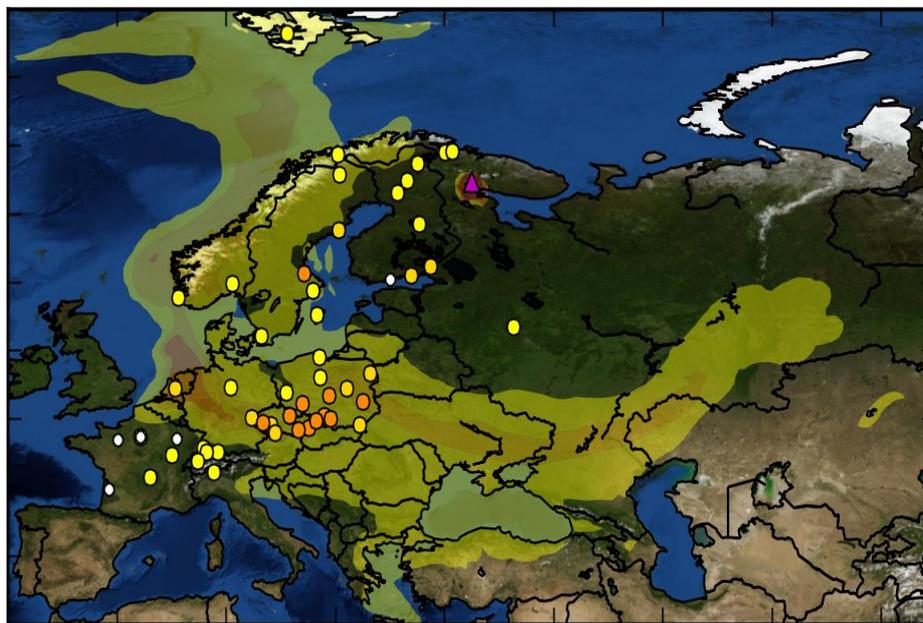
Détection de ^{137}Cs sur plusieurs stations en Europe (octobre 2015)

Calculs réalisés

- Point de rejet inconnu : Evaluation des quantités rejetées à partir de plusieurs installations nucléaires situées en Russie, Ukraine et Finlande.
- Forte nécessité forte de disposer d'une approche permettant de localiser efficacement la source.

2015-10-10 10:00:00

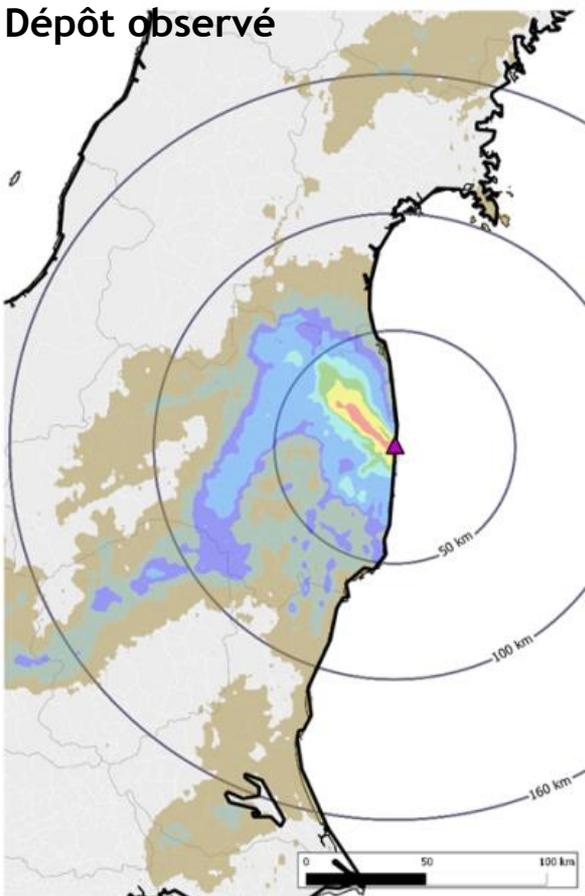
Averaged over 1 – 7 days periods	
Helsinki	18 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$
Stockholm	5 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$
Ouest de la Russie	14 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$
Pologne	22 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$
Lituanie	16 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$
Bielorussie	6 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$
Allemagne	1 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$
République Tchèque	4 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$
N-NE of France	1,7 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$



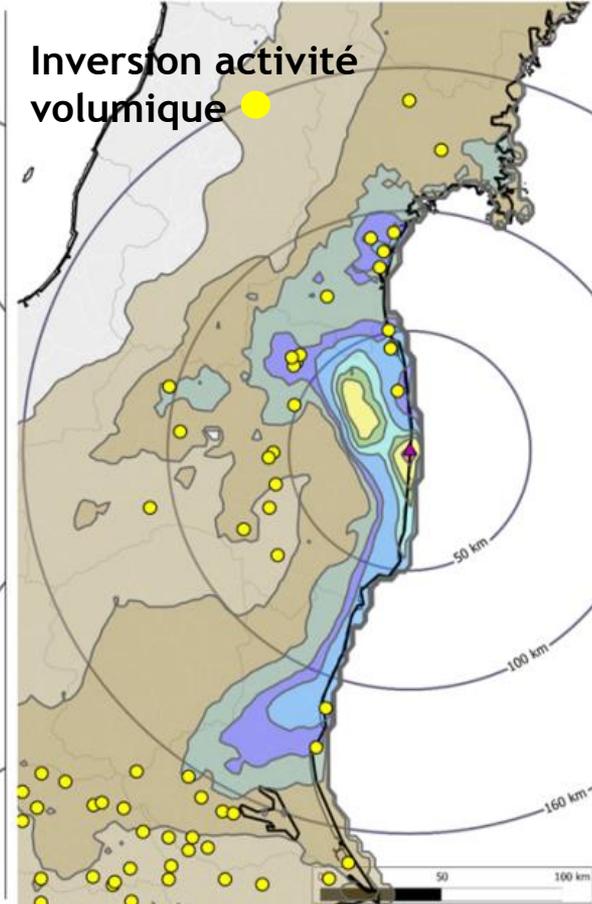
2015-2016 : Des simulations plus réalistes

- Dépôt total en ^{137}Cs (non utilisées dans l'inversion)

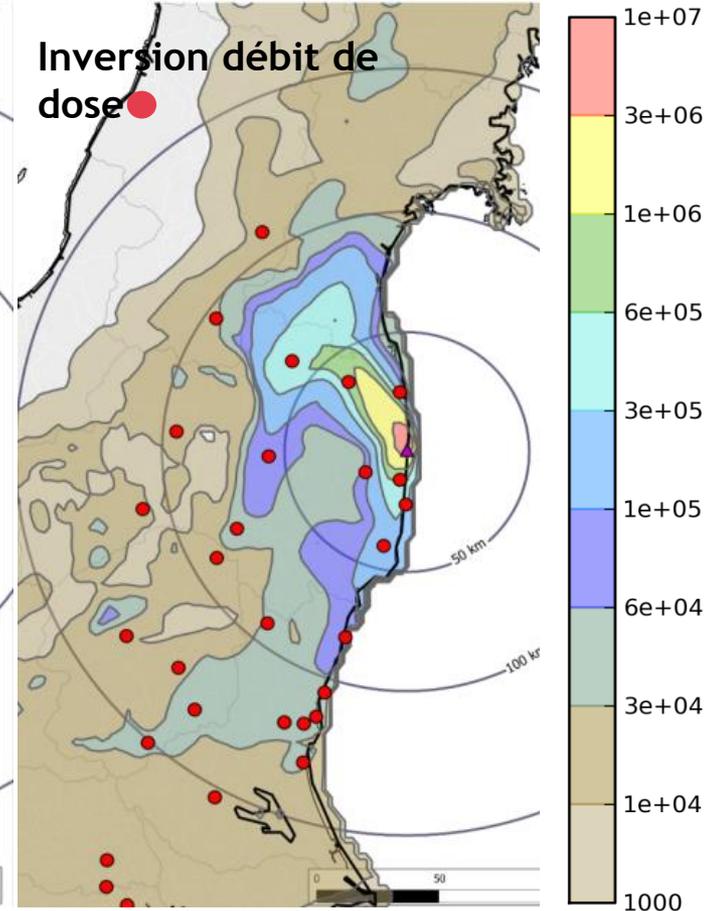
Dépôt observé



Inversion activité volumique



Inversion débit de dose



- Amélioration de la reconstruction de la cartographie des dépôts au sol.
- Certaines zones restent cependant mal reconstituées.
- L'inversion des mesures Tsuruta ne permet la reconstitution du dépôt dans la vallée..

Contexte collaboratif

■ Collaboration CEREa (laboratoire mixte EDF ENCP)

- 2004 - 2007 : Thèse M. Krysta : Assimilation de données et reconstruction de sources par modélisation inverse
- 2007-2010 : Thèse R. Abida : Assimilation de mesures synthétiques pour l'optimisation de réseaux de mesures.
- 2016-2019 : Co-encadrement d'une thèse.



■ Un cas d'application à exploiter : l'accident de Fukushima

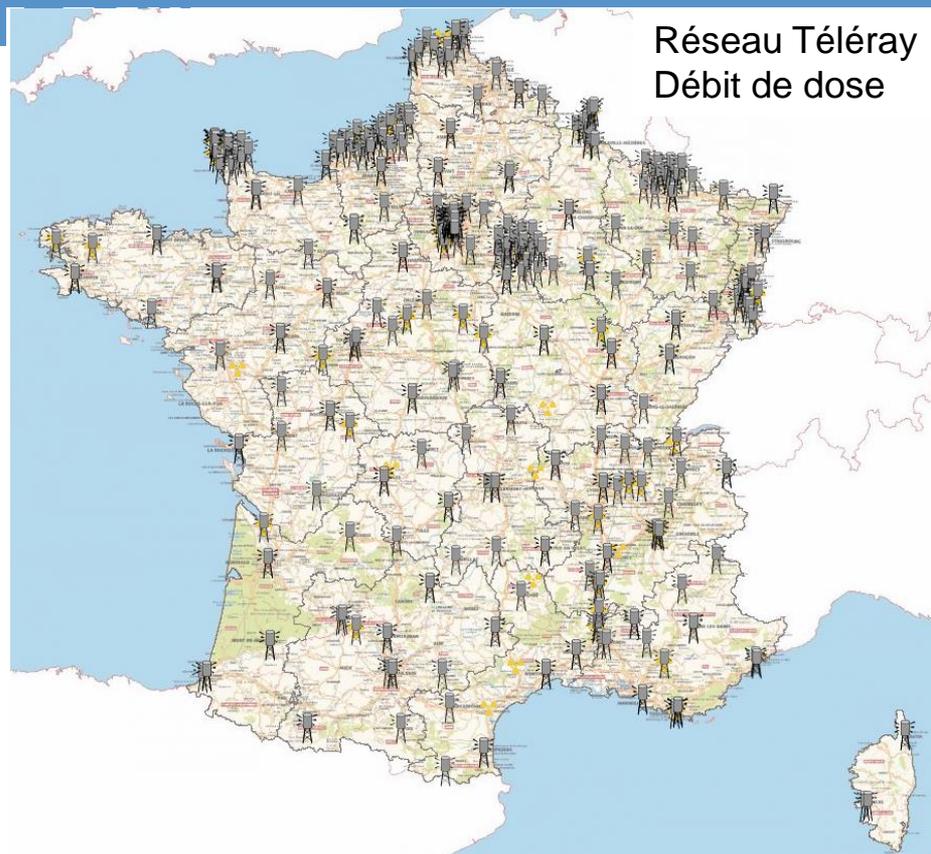
2013-2015 **Collaboration IRSN/MRI (JMA) : Projet Sakura**

Format pour la poursuite de la collaboration en cours de discussion

Réseau OPERA-AIR
Activité volumique



Réseau Téléray
Débit de dose



➤ **Méthode pour estimer les émissions à partir des mesures d'activité volumique**

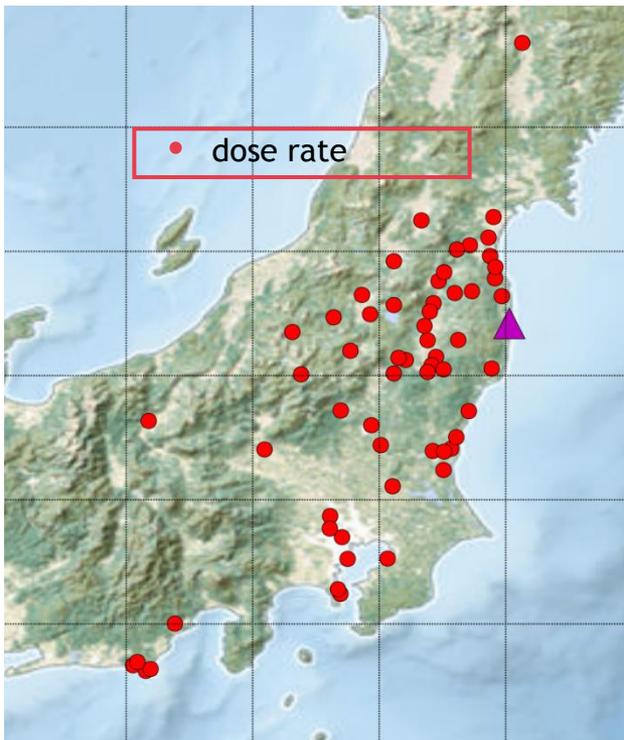
- ❑ 2011-2012 Détection par plusieurs pays d'Europe Centrale d' ^{131}I à l'état de trace provenant de Hongrie (usine de production d'isotopes)
- ❑ 2013 Détection d'une élévation anormale de ^{137}Cs en Scandinavie provenant de Russie (aciérie dans région de Moscou)

➤ **Méthode pour estimer les émissions à partir des débit de dose**

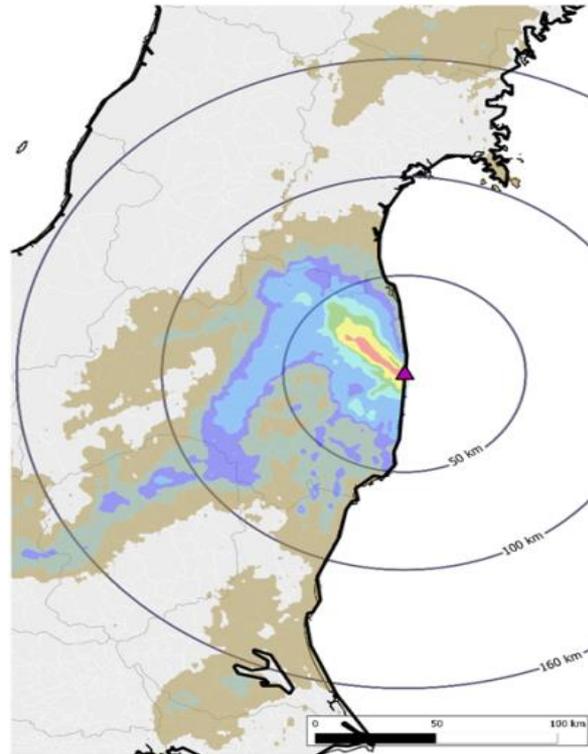
L'accident de Fukushima : un cas de référence complexe

- ❑ Rejets dans l'atmosphère pendant près de 3 semaines
- ❑ Relief particulier, conditions météorologiques changeantes (pluie, neige, orientation du vent)
- ❑ Beaucoup de mesures (activité dans l'air, débit de dose, dépôt)

Débit de dose par prefecture
(réseau SPEEDI 2011)



Dépôt total en Cs-137 (MEXT 2011)



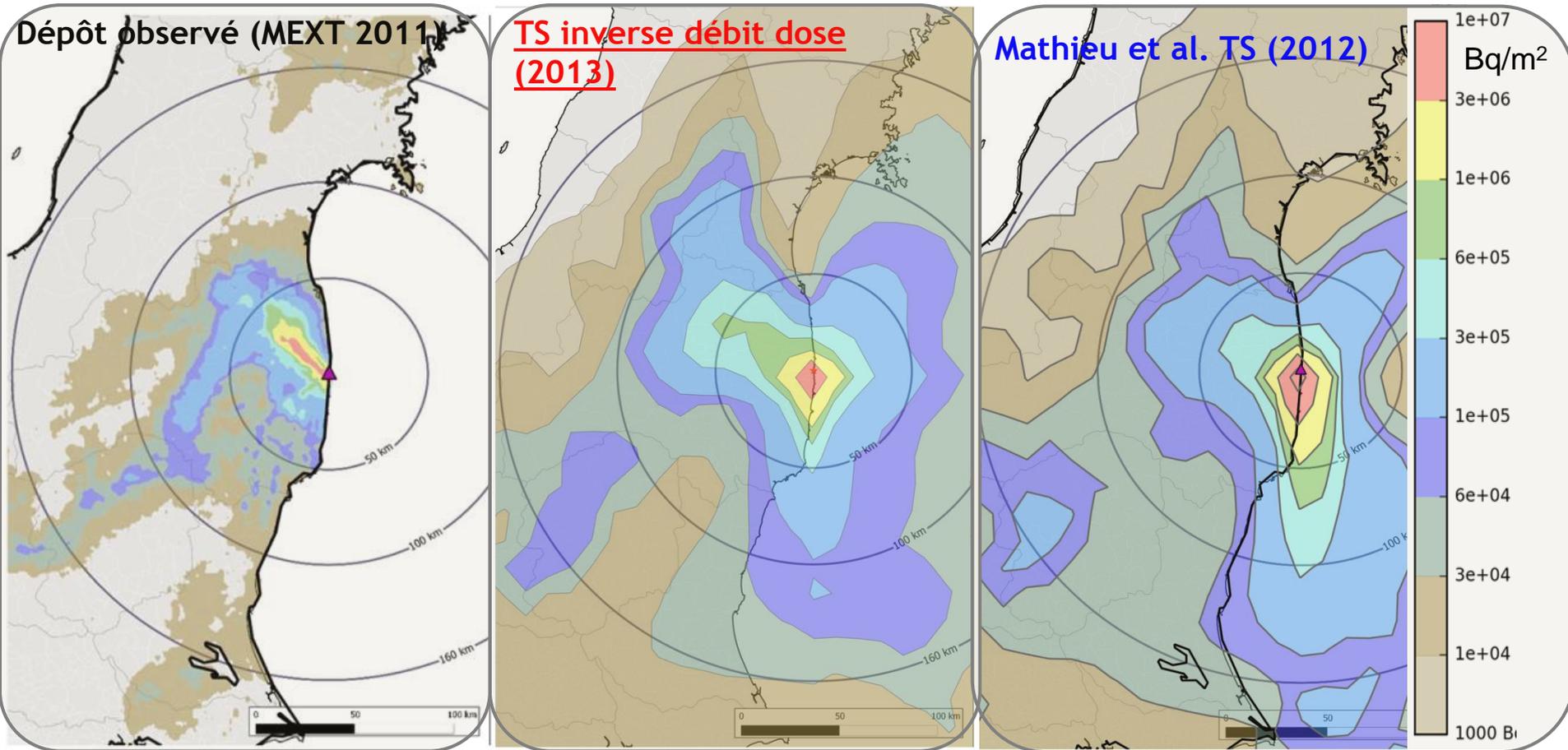
Activité dans l'air



● Activités dans l'air

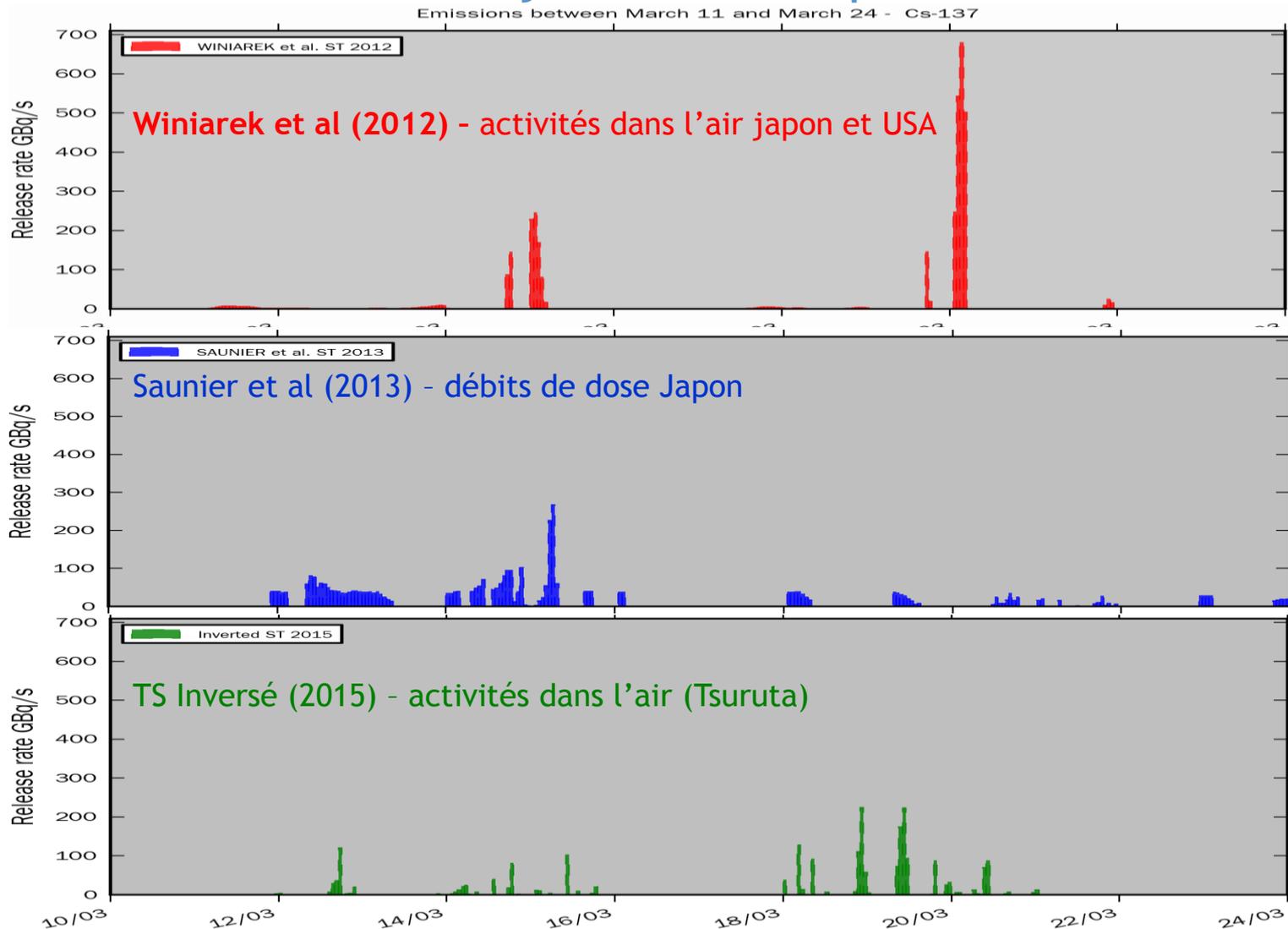
Validation du TS par comparaison aux observations

- Dépôt total en ^{137}Cs (non utilisées dans l'inversion)



- Le TS inversé à partir du débit de dose permet de reconstituer le lobe NO.
- Plusieurs zones de contamination ne sont pas parfaitement reproduites.
- Besoin de conditions météorologiques raffinées afin d'améliorer le réalisme des simulations

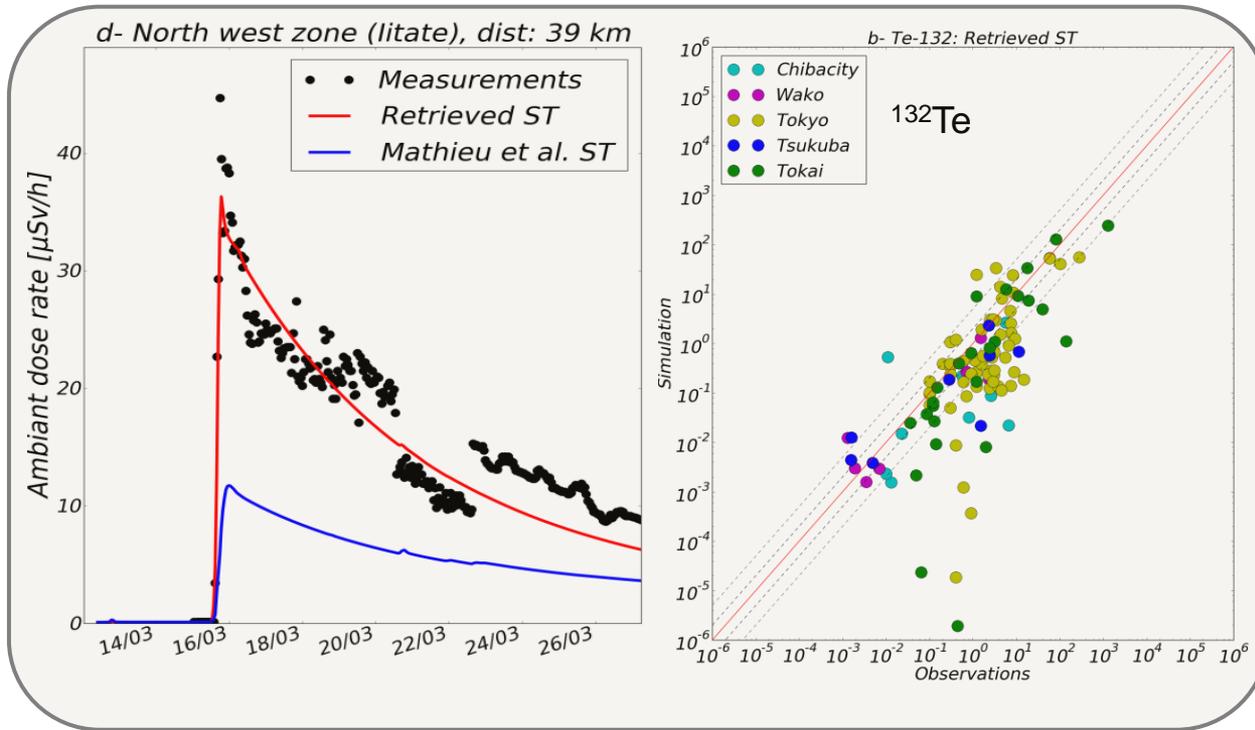
Evolution des débits de rejets reconstruits par modélisation inverse



- Le TS inversé à partir des mesures Tsuruta permet la reconstruction de nouveaux évènements.
- La sensibilité aux jeux d'observations et champs météorologiques est significative.

Validation du TS obtenu par comparaison aux mesures

- Débits de dose gamma (utilisés dans le processus d'inversion)
- Activités dans l'air en ^{131}I , ^{132}Te , ^{137}Cs et ^{136}Cs (non utilisées dans l'inversion)



	Inverse Fac10	Mathieu Fac10
^{136}Cs	57,8	57,9
^{137}Cs	69,4	63,9
^{131}I	56,1	40,6
^{132}Te	75,4	63,1
Débit dose	79,8	60

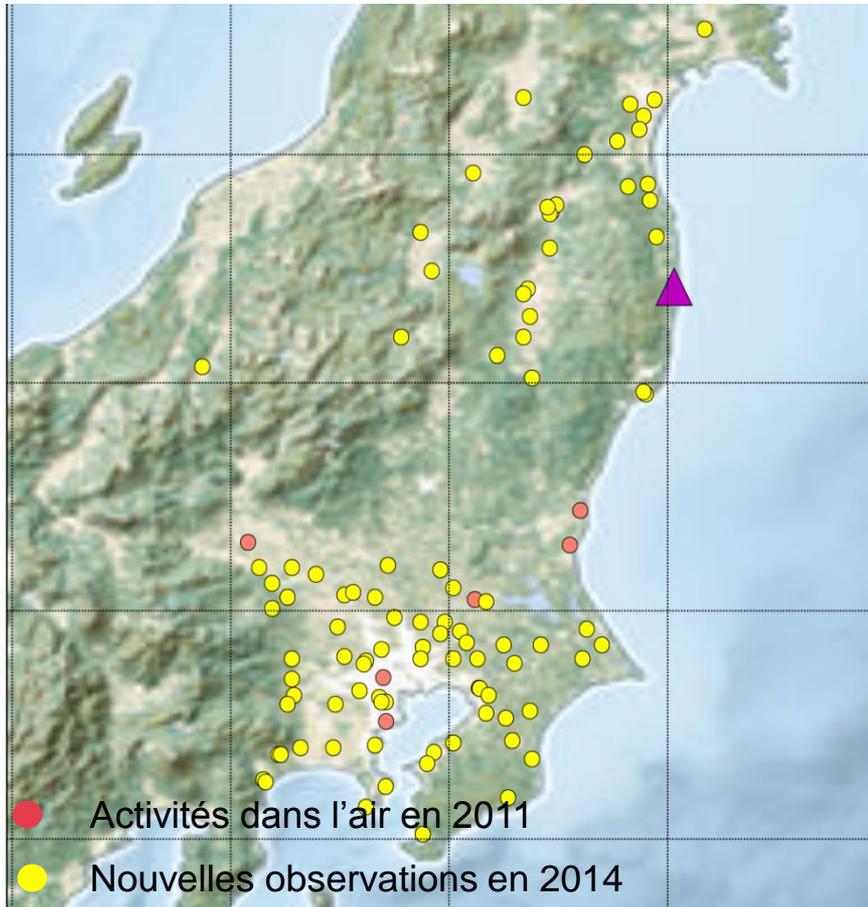
Composition isotopique du rejet obtenu par inversion plutôt réaliste mais perfectible.

Bon accord modèles/mesures débit de dose.

Accord cependant pas toujours parfait illustrant la dépendance significative aux champs météorologiques.

2015 : Nouvelles perspectives apportées par les observations d'activité dans l'air en ^{134}Cs et ^{137}Cs (Tsuruta et al. 2014)

Réseau de surveillance de qualité de l'air fournit les activités volumiques en ^{137}Cs .

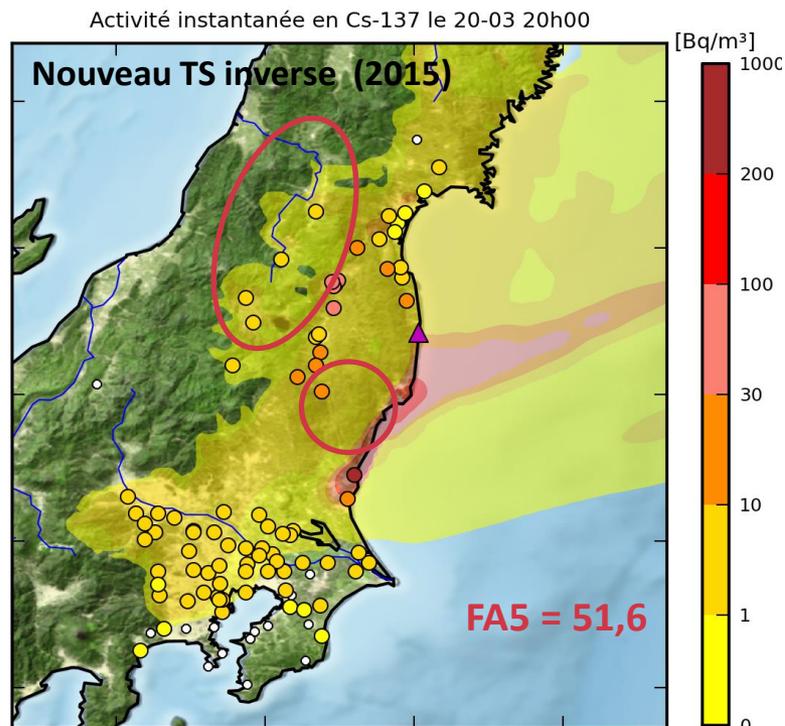
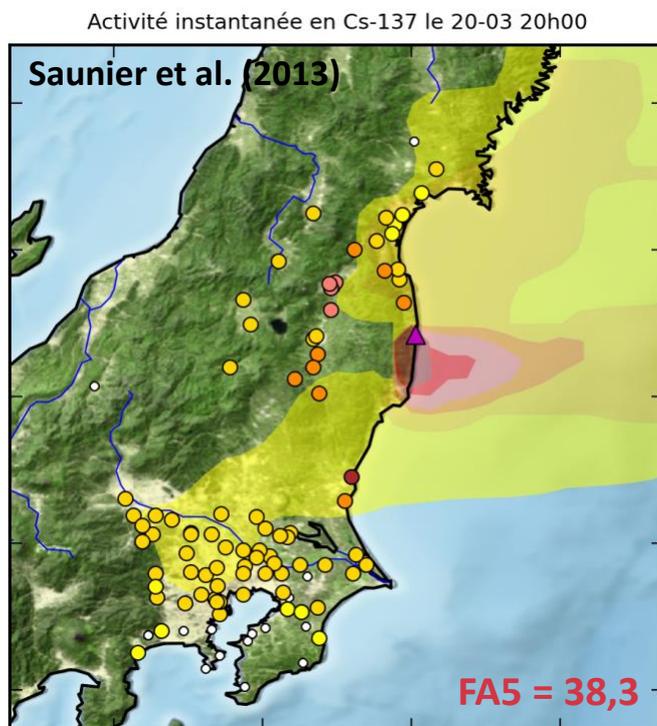


- Nouveaux évènements de contamination jusque là jamais identifiés
- Couverture spatiale dense et résolution temporelle horaire des données, forts gradients spatio-temporels des concentrations
- Besoin de champs météorologiques à haute résolution pour exploiter ces nouvelles données dans nos simulations de dispersion

➔ Utilisation Météo MRI 3km - 10 min

2015 - 2016 : Des simulations plus réalistes

- Comparaisons aux mesures d'activité volumique Tsuruta



- Les simulations forcées par le TS inversé à partir de la météo MRI 3km montrent l'augmentation des scores.
- Plusieurs évènements de rejets entre le 20 et le 22 mars sont mieux reconstruits.
- Les progrès sur la période du 15 mars (changement orientations vent + pluie) sont moins marqués.

Formalisation du problème inverse à résoudre

Relation source-récepteur

ε	=	H	σ	-	μ
Vecteur d'erreur Observations Modèle		Matrice source-récepteur Calculée à partir du modèle de dispersion en mode direct (Abida et al. 2011)	Estimateur du terme source		Vecteur observations

Approche variationnelle

$$J(\sigma) = \frac{1}{2}(\mu - H\sigma)^T R^{-1}(\mu - H\sigma) + \frac{1}{2}(\sigma - \sigma_b)^T B^{-1}(\sigma - \sigma_b)$$

- Minimisation de la fonction de coût afin de déterminer le TS σ tel que l'erreur ε soit minimale.
- Résolution du problème de minimisation par l'algorithme de quasi-Newton L-BFGS-B.

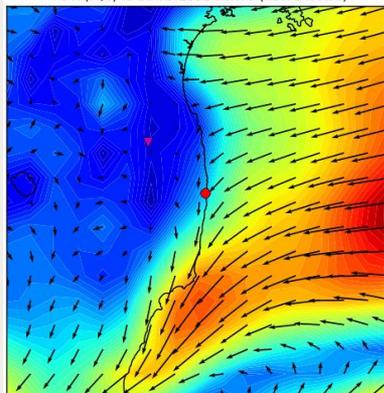
Données nécessaires

- Connaissance de la localisation du point de rejet ou des candidats potentiels.
- Nombre d'observations \gg Nombre de paramètres inconnus à évaluer *si a priori* $\sigma_b = 0$.

Données d'entrée

Champs météorologiques

Vent (m/s) le 16-03-2011 00h00 (heure locale)



Modèle dispersion atmosphérique

Transport panache

Dispersion panache

Dépôt sec

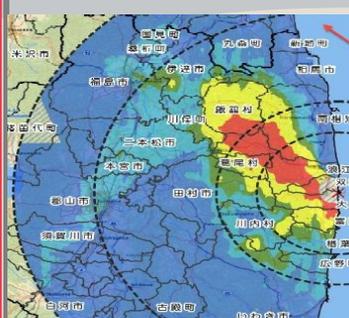
Dépôt humide

Décroissance radioactive

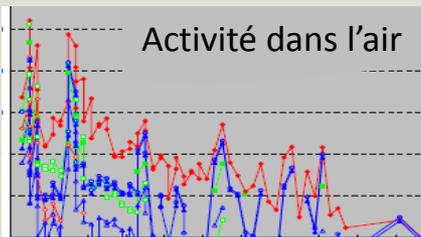
Chimie

Mesures dans l'environnement

Dépôt



Activité dans l'air



Débit de dose gamma



Sorties

Terme Source

