



INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

Méta-analyse des données de contamination des arbres en ^{137}Cs dans les forêts japonaises (2011-2015)

M.A. Gonze¹, P. Calmon¹, P. Hurtevent¹, F. Coppin¹,
V. Nicoulaud¹, C. Mourlon¹ and Y. Thiry²

¹ IRSN, CE Cadarache, France

² ANDRA, Chatenay-Malabry, France

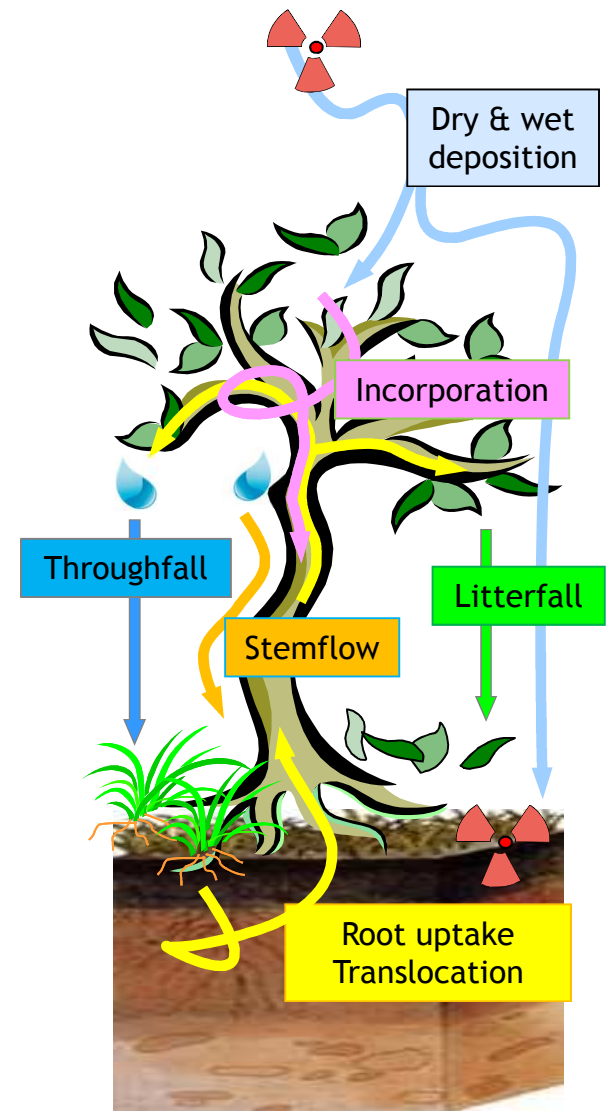
Congrès ICOBTE 2017, juillet 2017, Zürich

Congrès ICRER 2017, septembre 2017, Berlin

Devenir du ^{137}Cs en forêt

- Phase de dépôt (jours à semaines)
 - Dépôt sec
 - Dépôt humide (pluie)
- Phase de décontamination (mois à années)
 - Chute des feuilles (LF)
 - Pluvio-lessivage (TF)
 - Ruissellement /tronc (SF)
 - Incorporation bois et racines

Décontamination (DF)
- Recyclage long terme (années à décennies)
 - Transfert racinaire & translocation
 - Pertes des arbres par LF & TF
 - Croissance de la biomasse des arbres



Enjeux de recherche

- Acquérir une meilleure compréhension / connaissance quantitative à partir des études de terrain réalisées après l'accident de Fukushima
- Avec l'objectif d'améliorer les modèles développés après l'accident de Tchernobyl pour différentes catégories de forêts

Conifères
persistants
(EGC)



Feuillus
caduques
(DBL)



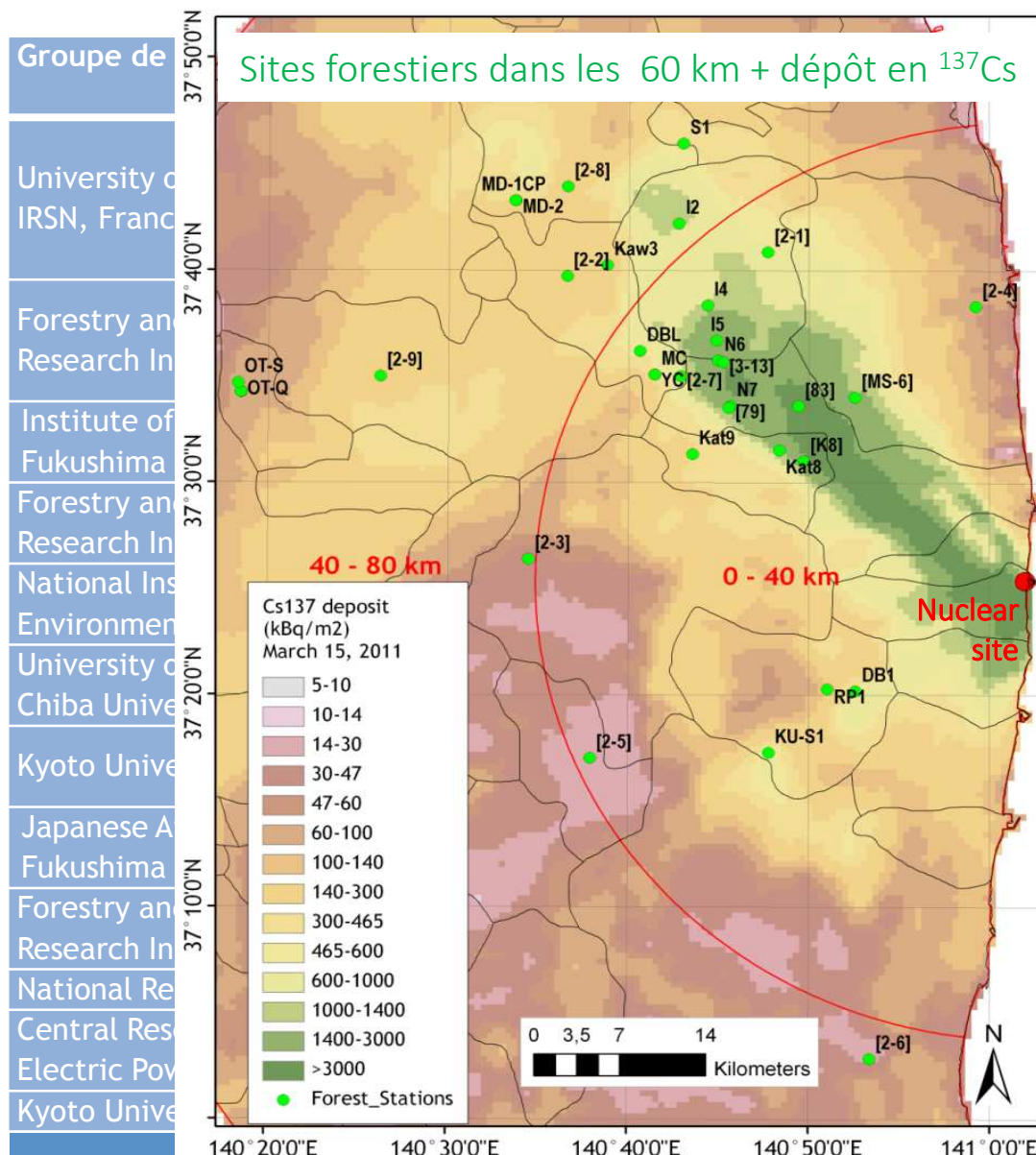
Mixtes



Etudes sélectionnées



82 sites = 61 EGC + 7 DBL + 14 mixtes



Stratégie de surveillance	Référence
S2, S3	Kato et al., 2012, 2014, 2017; Loffredo et al., 2014, 2015; Takahashi, 2015; Hisadome et al., 2013; Teramage et al., 2014; Coppin et al., 2016
S3	Komatsu et al., 2016; Kajimoto et al., 2015; Kuroda et al., 2013; Imamura et al. 2017
S2	Yoschenko et al., 2016
S3	Itoh et al. 2014, 2015, Nishikiori et al., 2015
	Endo et al., 2014, 2015; Murakami et al., 2014
	Okada et al., 2015; Nakai et al., 2015; Ohashi et al., 2014
	Niizato et al. , 2016
	Akama et al., 2013
	NRA 2017
	Yoshihara et al, 2013, 2014, 2016
	Koizumi et al., 2013

Stratégies d'échantillonnage

(S1) Echantillonnage annuel des horizons de sol et des arbres entiers

- Biomasses (kg.m^{-2})
 - Concentrations (Bq.kg^{-1})
 - Stocks (Bq.m^{-2})
- ⇒ Flux de décontamination annuel DF ($\text{Bq.m}^{-2}.\text{yr}^{-1}$)



(S2) Echantillonnage hebdomadaire avec collecteurs

- Chutes de biomasse, flux d'eau ($\text{kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)
 - Concentrations
- ⇒ Flux TF, SF, LF
- ⇒ $\text{DF} = \text{TF} + \text{SF} + \text{LF}$



(S3) Echantillonnage aléatoire de feuilles, branches, écorce

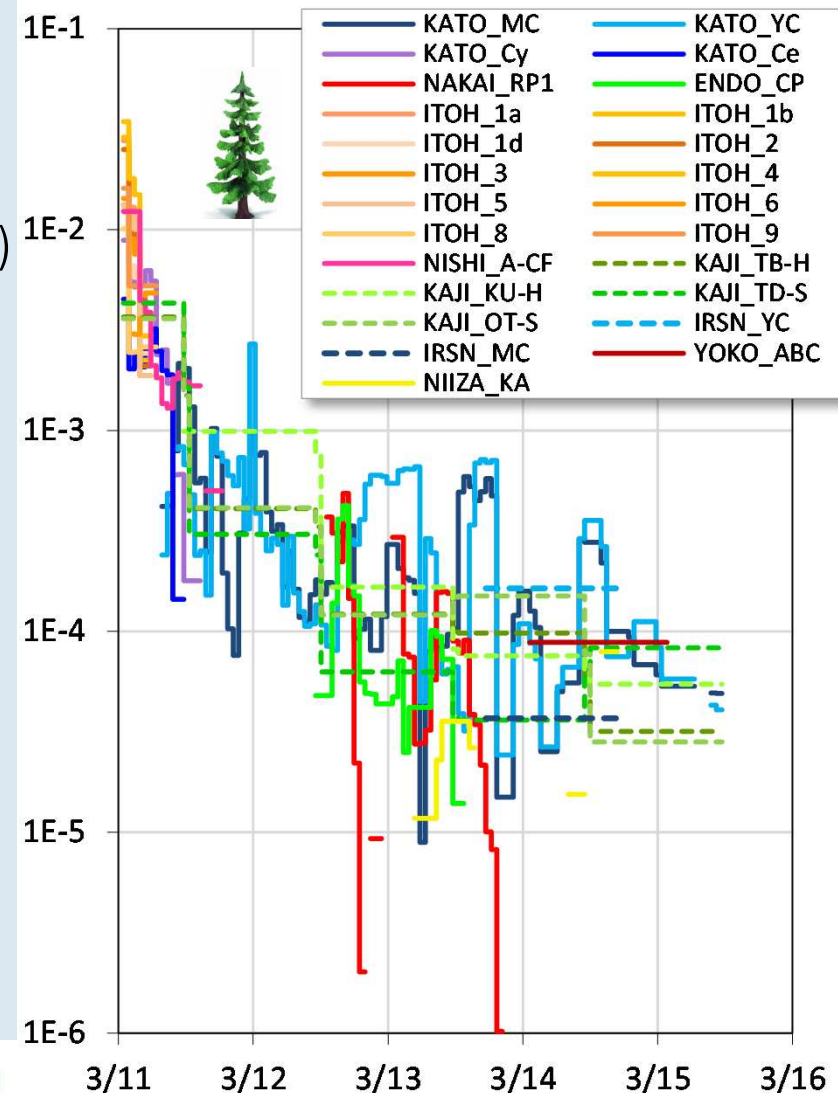
- Concentrations



Pré-traitement des données ^{137}Cs

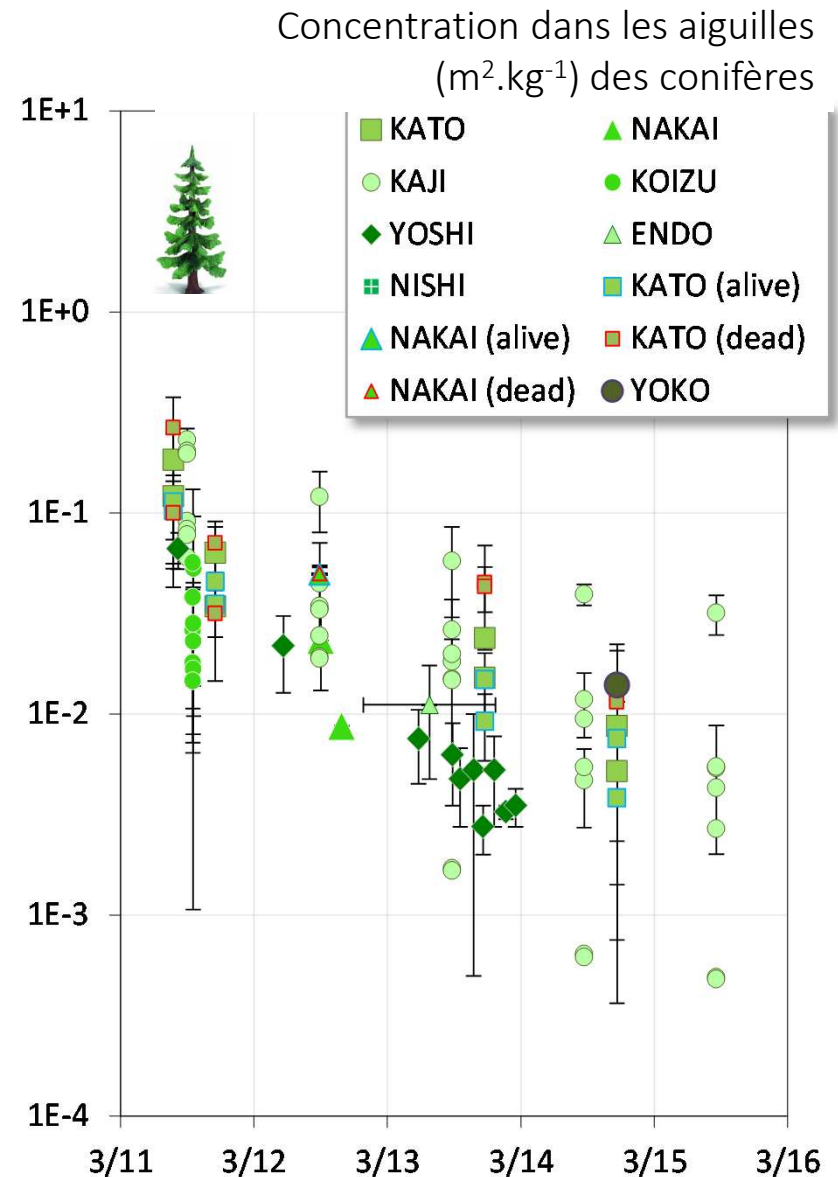
1. Normalisation par le dépôt
⇒ concentrations ($\text{m}^2.\text{kg}^{-1}$), flux (j^{-1}),
stocks (-)
2. Estimation du flux de décontamination (DF)
annuel sur les sites S1 avant l'automne
2011, sur la base d'une valeur plausible du
facteur d'interception f : 70%-95% (EGC)

Flux de décontamination (j^{-1})
21 parcelles de conifères



Pré-traitement des données

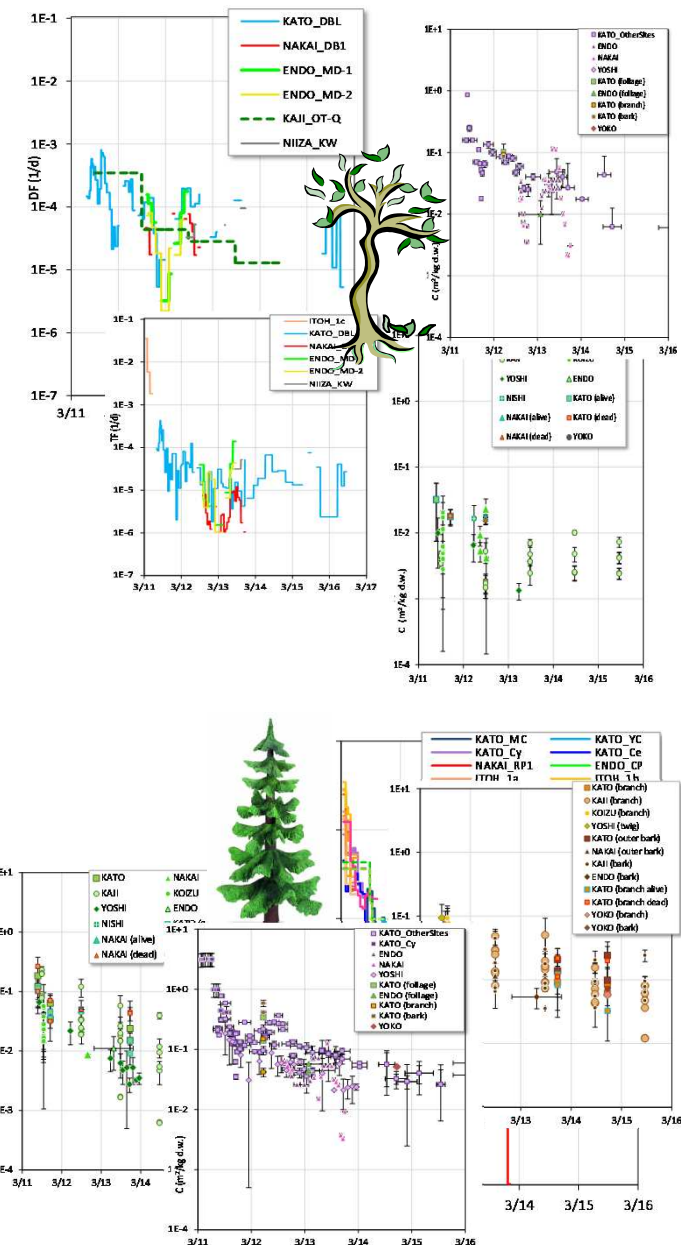
1. Normalisation par le dépôt
⇒ concentrations ($\text{m}^2.\text{kg}^{-1}$), flux (j^{-1}), stocks (-)
2. Estimation du flux de décontamination (DF) annuel sur les sites S1 avant l'automne 2011, sur la base d'une valeur plausible du facteur d'interception f : 70%-95% (EGC)
3. Estimation des concentrations dans les arbres et les chutes de biomasse via la moyenne géométrique des données pour chaque site, à la même date et pour la même catégorie d'arbres



Analyse exploratoire des données

- Individuellement, aucune étude ne fournit une image complète de l'évolution du Cs sur l'intégralité des 5 années
- Une certaine cohérence dans les données des différents sites (globalement avec une variation d'un facteur 5)
- Les caractéristiques écologiques des parcelles de conifères varient peu entre les différents sites (âge des arbres, densité, biomasse aérienne, hauteur des arbres, diamètre des troncs...)

⇒ Ce qui permet de calculer un comportement « représentatif » du Cs dans les forêts de conifères (c'est-à-dire une évolution générique)



Calcul de l'évolution générique du ^{137}Cs

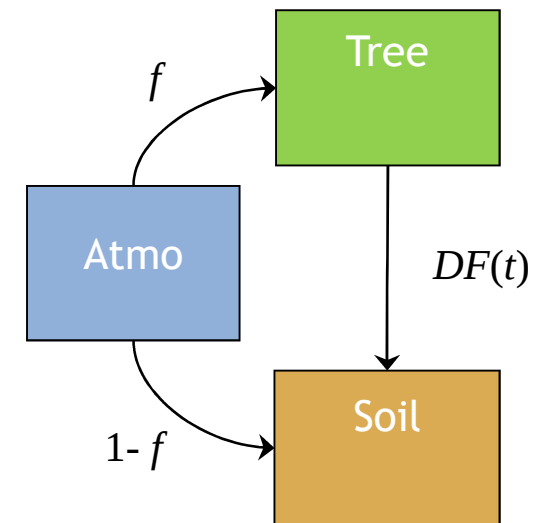
4. Flux de décontamination (DF , TF , SF , LF), concentrations et biomasses : via la moyenne géométrique des sites
5. Stocks dans les arbres (S_{Tree}) et le sol (S_{Soil}) :

$$\left(\frac{d}{dt} + \lambda^{rad} \right) S_{Tree} = f \times \delta(t) - DF(t)$$

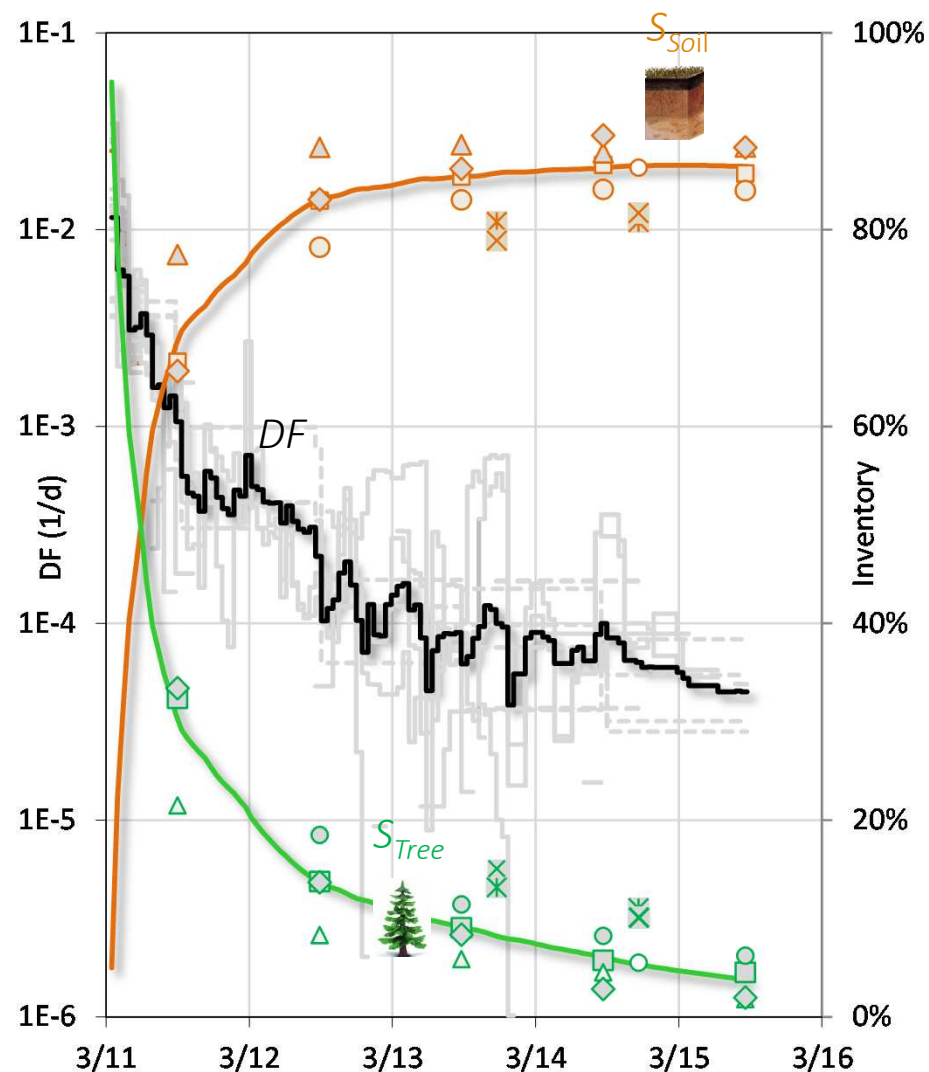
$$\left(\frac{d}{dt} + \lambda^{rad} \right) S_{Soil} = (1-f) \times \delta(t) + DF(t)$$

↑
Décroissance
radioactive

↑
Fonction Dirac
($t=0$: date du dépôt)



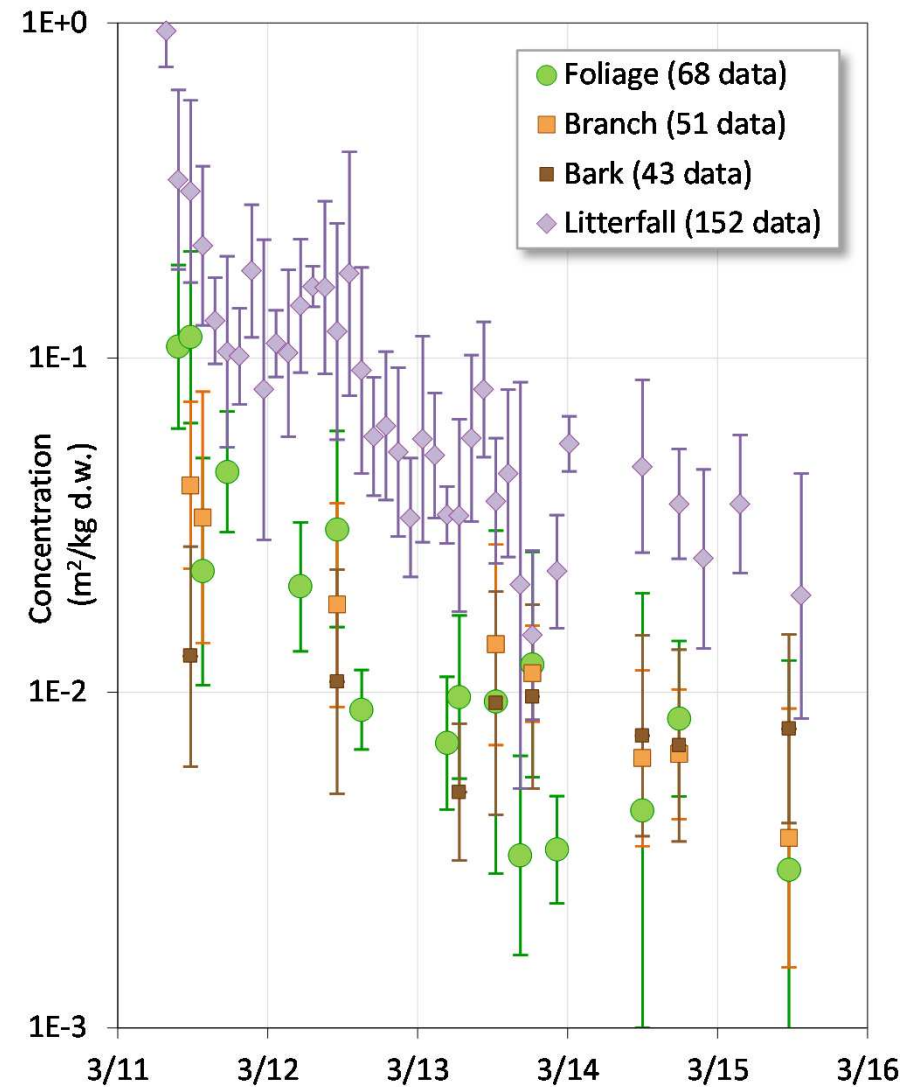
Flux de décontamination et stocks - Conifères ($f=95\%$)



- DF décroît de ~ 2 ordres de grandeur, de 1 % à $<0.01\% \text{ j}^{-1}$
- S_{tree} décroît de 95% à $<5\%$,
- 2 demi-vies caractéristiques : 50 jours et 20 mois
- Dans la gamme de ce qui est reporté par *Bunzl et al. 1989, Tikhomirov and Shcheglov 1991, 1994*

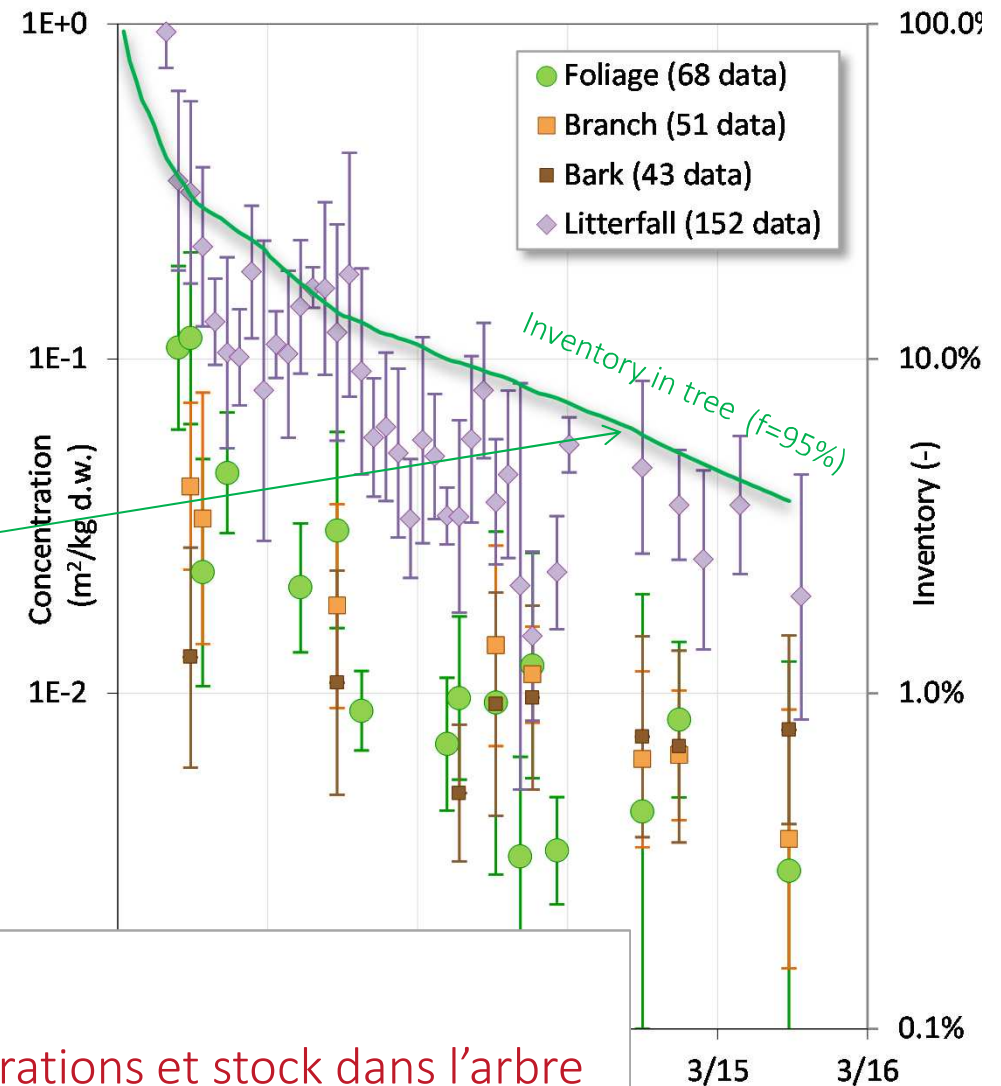
Concentrations dans les conifères

- Chutes de biomasse >> végétation en place
- A cause d'une plus grande proportion d'aiguilles « pré-Fukushima » (= apparues avant l'accident de Fukushima) dans les chutes de biomasse
- En 4 ans : diminution d'un facteur 16 (aiguilles), 10 (branches), 2 (écorce)



Concentrations génériques dans les organes des arbres EGC

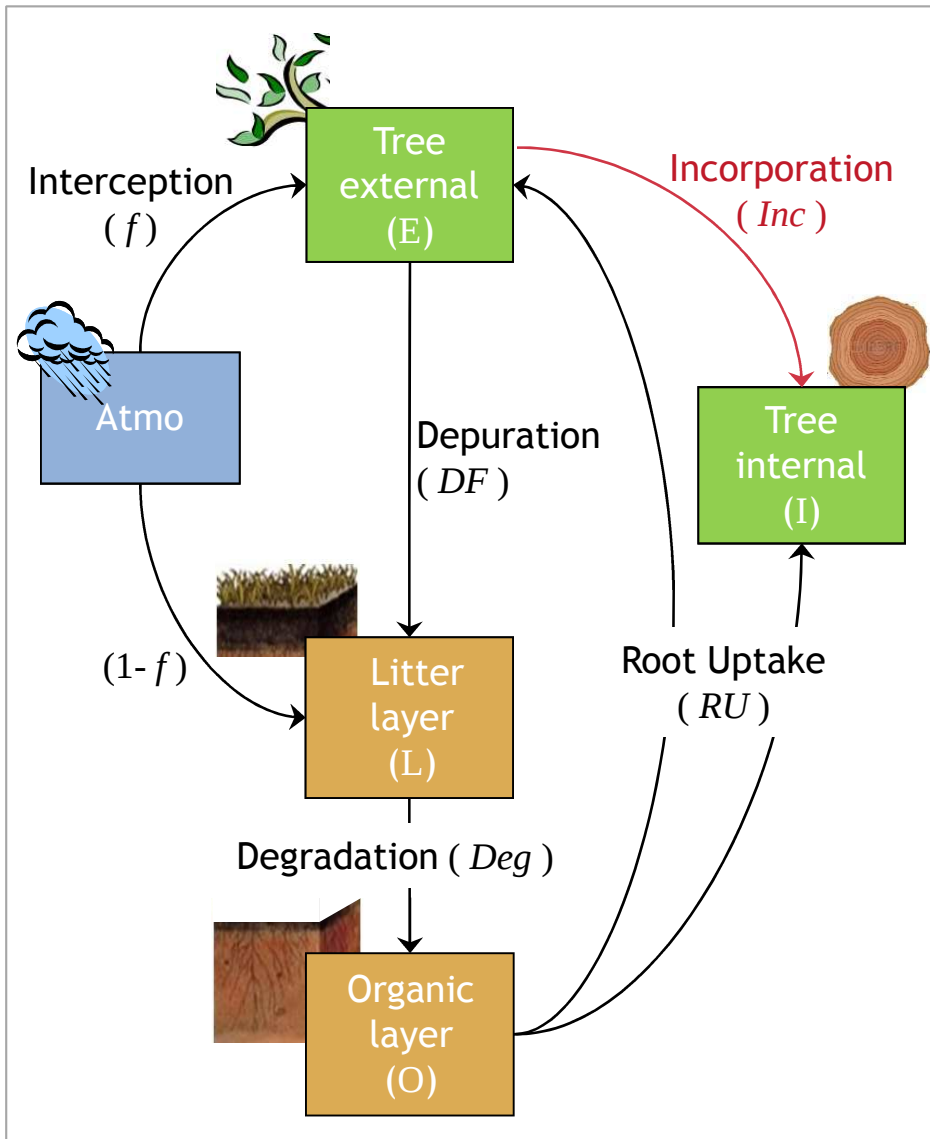
- Chutes de biomasse >> végétation en place
- A cause d'une plus grande proportion d'aiguilles « pré-Fukushima » (= apparues avant l'accident de Fukushima) dans les chutes de biomasse
- En 4 ans : diminution d'un facteur 16 (aiguilles), 10 (branches), 2 (écorce)
- Plus rapide que celle du **stock dans l'arbre** prédite par la seule décontamination et décroissance radioactive
- Cause = incorporation dans les organes internes de l'arbre



⇒ Quantifier le flux d'incorporation

⇒ Vérifier la cohérence entre concentrations et stock dans l'arbre

Une approche dynamique simplifiée



$$\left(\frac{d}{dt} + \lambda^{rad} \right) S_E = f \times \delta(t) - DF - Inc + RUe$$

$$Concentration_E = \frac{S_E}{Biomass_E}$$

$$Inc = \lambda^{inc} \times S_E$$

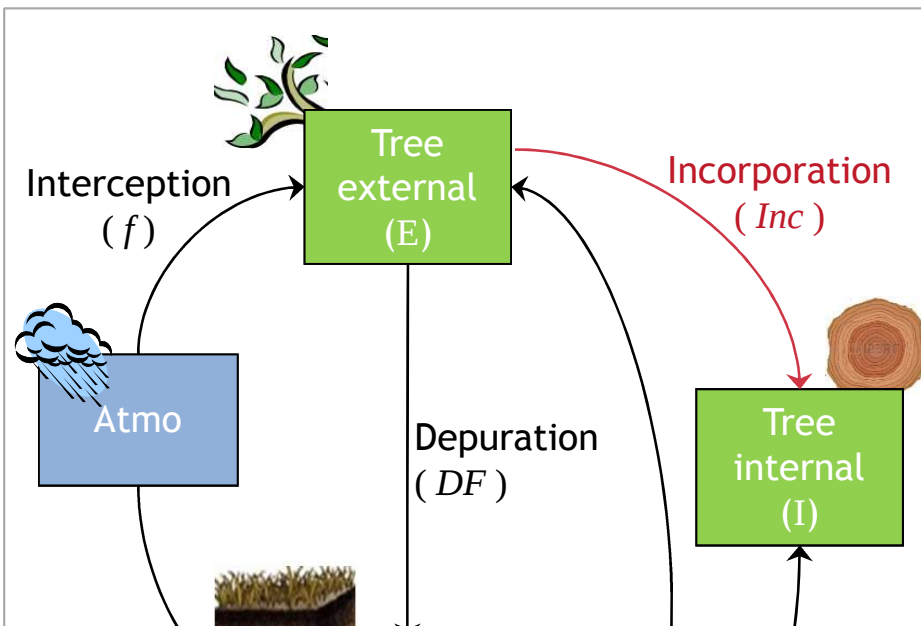
$$\left(\frac{d}{dt} + \lambda^{rad} \right) S_I = Inc + RUi$$

$$Concentration_I = \frac{S_I}{Biomass_I}$$

$$\left(\frac{d}{dt} + \lambda^{rad} \right) S_L = (1-f) \times \delta(t) + DF - Deg$$

$$\left(\frac{d}{dt} + \lambda^{rad} \right) S_O = Deg - RUe - RUi$$

Une approche dynamique simplifiée



$$\left(\frac{d}{dt} + \lambda^{rad} \right) S_E = f \times \delta(t) - DF - Inc + RUe$$

$$Concentration_E = \frac{S_E}{Biomass_E}$$

$$Inc = \lambda^{inc} \times S_E$$

$$\left(\frac{d}{dt} + \lambda^{rad} \right) S_I = Inc + RUi$$

$$Concentration_I = \frac{S_I}{Biomass_I}$$

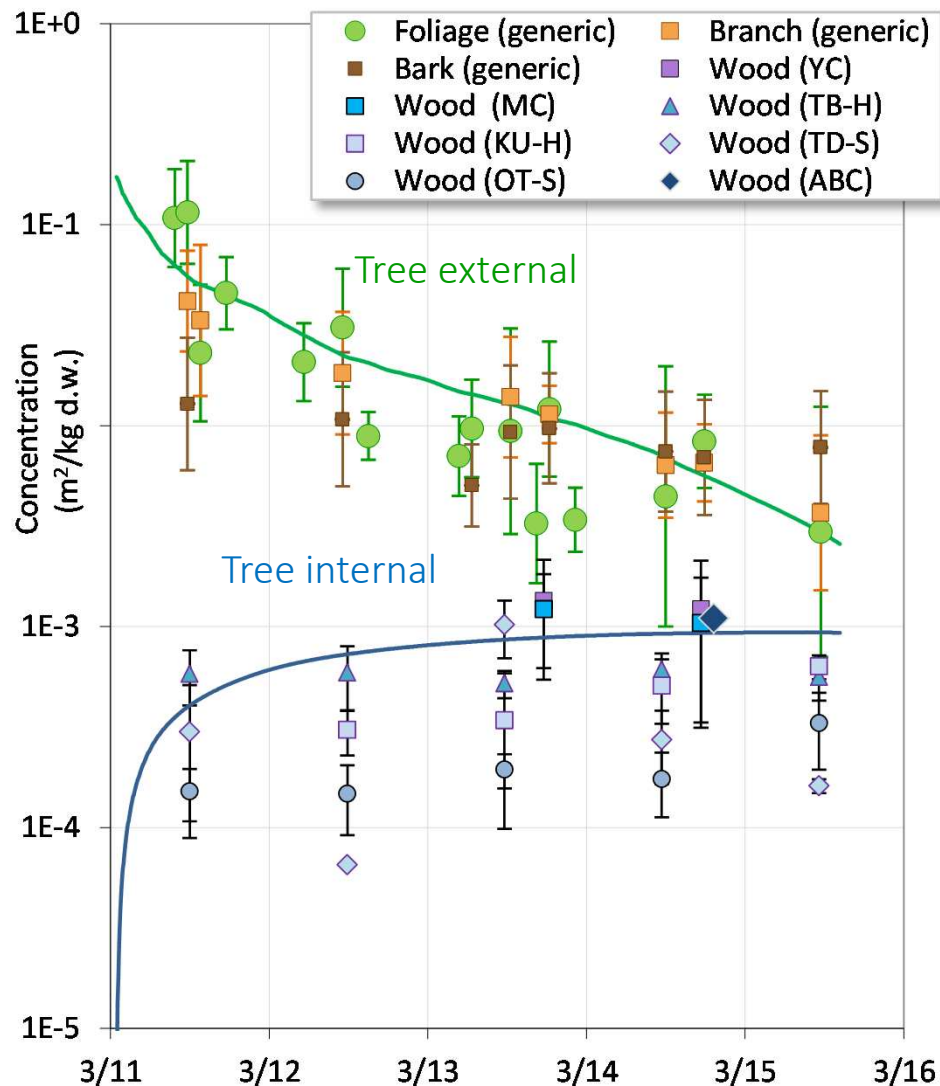
Méthode :

- 1- Calibrer λ^{inc} par ajustement de “*External concentrations*” aux observations
- 2- Vérifier que “*Internal concentrations*” cohérent avec observations

Avec :

- f imposé, DF (issu de la méta-analyse) et *Biomasses* (valeurs génériques)
- *RootUptake* estimé à l’aide du modèle RIFE (Shaw et al. 1994, Hashimoto et al. 2013)

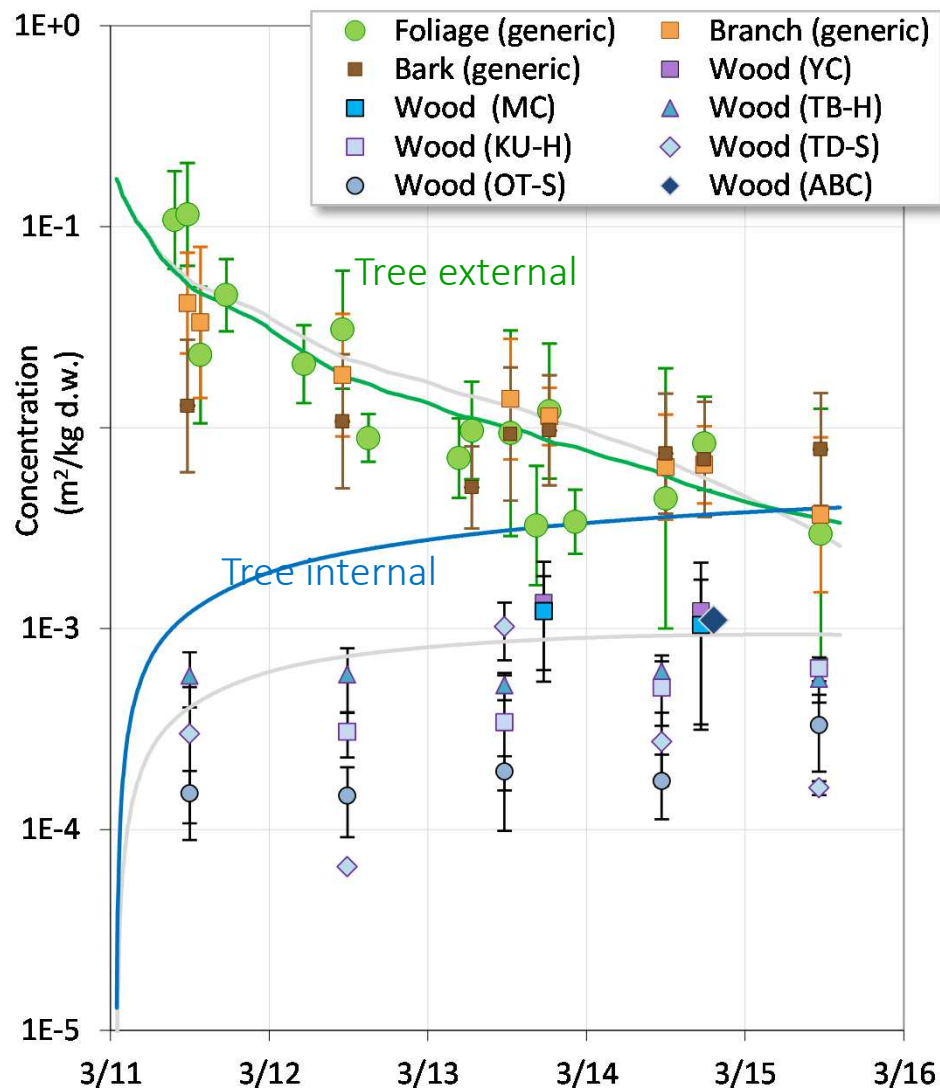
« Best-estimate » concentrations - conifères ($f=95\%$)



Sans transfert racinaire

- $\lambda^{inc} \approx 10^{-4} \text{ j}^{-1}$
- Augmentation rapide dans les organes internes, jusqu'à $10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$
- En accord avec TRS 472 (IAEA 2010)
- Surestimation modérée de certaines valeurs reportées par *Imamura et al. 2017*

« Best-estimate » concentrations - conifères ($f=95\%$)



Sans transfert racinaire

- $\lambda^{inc} \approx 10^{-4} \text{ j}^{-1}$
- Augmentation rapide dans les organes internes, jusqu'à $10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$
- En accord avec TRS 472 (IAEA 2010)
- Surestimation modérée de certaines valeurs reportées par *Imamura et al. 2017*

Avec transfert racinaire

- $\lambda^{inc} \approx 4 \cdot 10^{-4} \text{ j}^{-1}$
- Forte surestimation

Conclusion

- Méta-analyse ~40 études de sites (~2000 données spatio-temporelles)
- La plupart pour des forêts de conifères, manque de données pour forêts de feuillus et mixtes !
- Pour les forêts de conifères, évolutions génériques des concentrations, flux, stocks en ^{137}Cs ont pu être déterminées, puis « expliquées » (dans une certaine mesure) grâce à un modèle dynamique simplifié:
 - ~95% du dépôt vraisemblablement intercepté
 - ~85% transféré au sol en 5 ans (selon 2 demi-vies)
 - ~4% incorporé principalement à partir du feuillage (selon 1 demi-vie)
- Un jeu de données utile pour améliorer les modèles dynamiques développés après l'accident de Tchernobyl

Merci de votre attention

Pour en savoir plus

- Gonze M.-A, Calmon P. (2017). Meta-analysis of radiocesium contamination data in Japanese forest trees over the period 2011-2013: a review. Science of The total Environment 601-602
- Coppin F., Hurtevent P., Loffredo N., Simonucci C., Julien A., Gonze M.A., Nanba K., Onda Y. and Thiry Y. (2016). Radiocesium Partitionning in Japanese Cedar Forests Following the Early Phase of Fukushima fallout Redistribution. Scientific Reports.
- Calmon P., Gonze M.-A., Mourlon C. (2015). Early-phase Redistribution of Radiocaesium Fallouts in an Evergreen Coniferous Forest after Chernobyl and Fukushima Accidents. Science of Total Environment 529

APPENDICES

Mean ecological characteristics (EGC forests):

- mean tree age: 41 ± 10 y (n=11)
- stand density: 1510 ± 530 trees ha⁻¹ (n=21)
- above-ground biomass: 23.5 ± 9 kg m⁻² (n=6)
- mean tree height: 18 ± 3 m (n=8)
- mean trunk diameter: 22 ± 5 cm (n=21)