



Modélisation du cycle du césium dans les écosystèmes forestiers

Yves Thiry

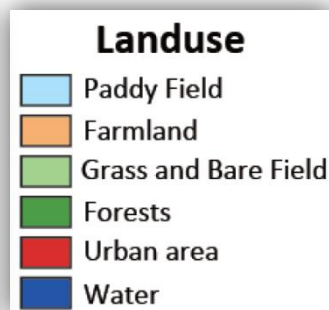
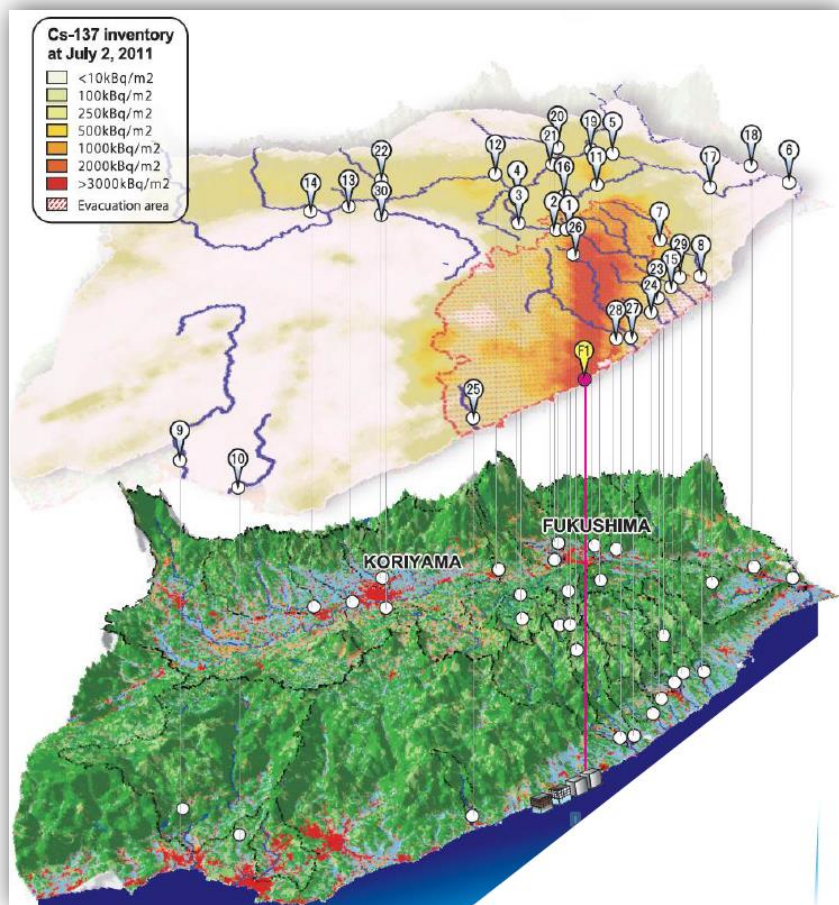
Amorad CST meeting, 23 nov. 2017,
Fontenay-aux-Roses



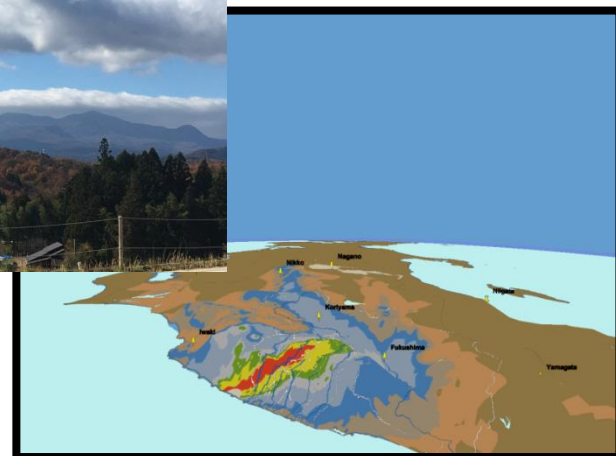
ANR-11-RSNR-0002

Fukushima: le déclencheur pour ANR-Amorad et la mise en œuvre de nouvelles études sur les écosystèmes forestiers

- Des relâchements 10 fois moindre qu'à Chernobyl, mais dans un environnement très forestier (70% des surfaces contaminées à $> 1 \text{ MBq/m}^2$)



- Un relief accidenté important et une zone exposée aux typhons



Un environnement forestier et une connectivité importante entre écosystèmes via les transferts par l'eau



L'eau des massifs forestiers: une ressource importante pour l'agriculture et aussi un vecteur de transfert vers l'océan





FFPRI Symposium: « Envisage the future of Fukushima forest » 12 July 2017 - Debriefing

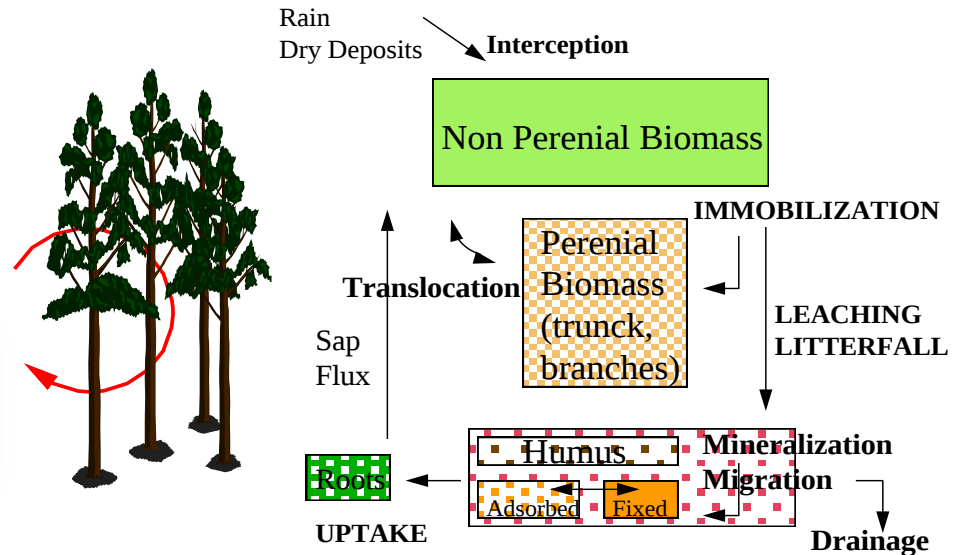
Entity	Priorities/questions
Governmental authorities	• Future wood contamination • Future mushroom contamination • Best management and decontamination strategy
Forest scientists	• Future wood contamination (species effect) • Priorities and methods in monitoring • Contamination dynamics among tree species • Impact of fallout type (e.g. Cs ball)
Local citizens	• Wood harvest and use • Outflow (to agricultural and residential areas) • Resuspension of Cs • Impact of forest fire

Par anticipation, le projet CYCL a placé les besoins au bon niveau: une meilleure compréhension pour des bases de données et des modèles plus appropriés

1. Monit: Monitoring de site et quantification des stocks et flux (sols et végétation; Cs et I)

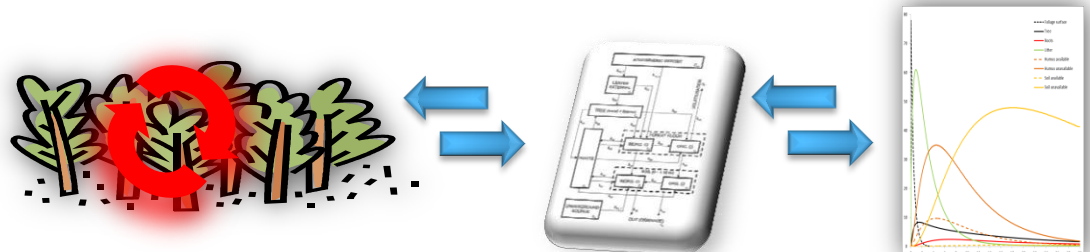
3 sites:

- Fukushima (short term; $^{137,133}\text{Cs}$)
- Chernobyl (middle term; $^{137,133}\text{Cs}$)
- Ope (long term; ^{133}Cs et ^{127}I)



2. Mod: hiérarchisation des données et développement de modèles scientifiques et opérationnels (outils de questionnement vs. prédictifs)

Interractions via COORD:



Le comportement du radiocésium en écosystème forestier, en bref

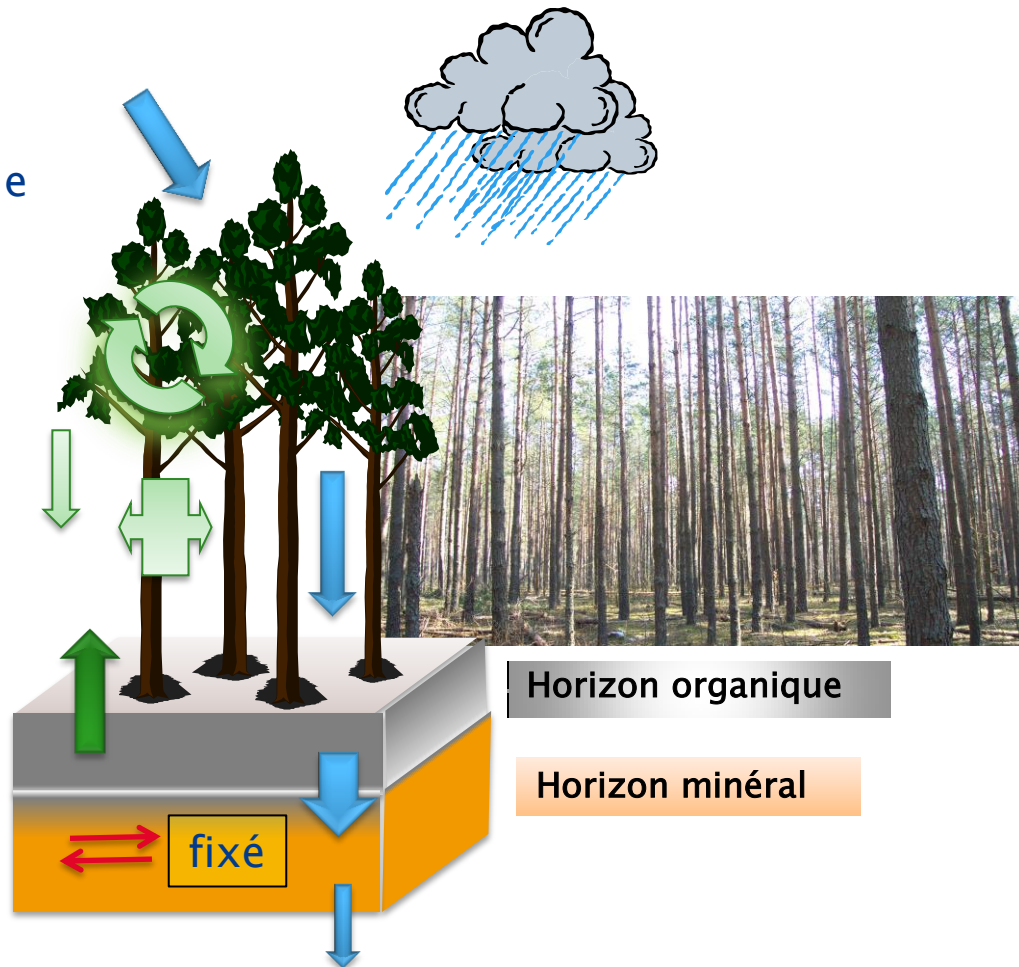
Le fonctionnement de l'écosystème forestier implique un recyclage permanent des éléments sur de longue échelle de temps:

Végétation:

- Interception
- Lessivage (récrétion)
- Absorption foliaire
- Prélèvement racinaire
- Transfer internes
- Immobilisation

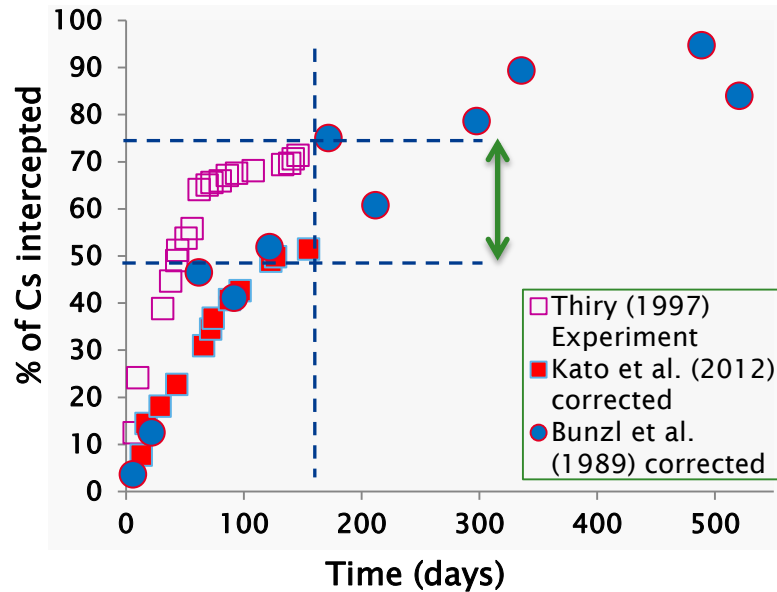
Sol:

- Migration
- Adsorption/fixation
- Percolation



Leçons des études post-Tchernobyl: besoin d'une représentation plus réaliste du cycle (absorption foliaire et racinaire), de jeux de données intégrés et d'outils numériques de complexité optimale (long terme)

La décontamination initiale (lessivage) donne le tempo au recyclage



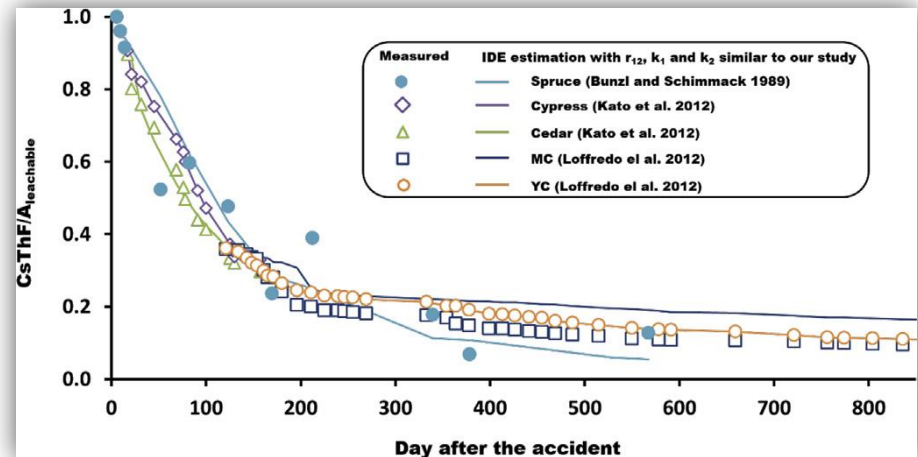
Model for residual activity in tree y (-)	Parameter	Estimate
(1) $y = (1 - A_0) + A_0 \exp(-\lambda_t t)$		
t: time	A_0 (-)	0.725 ± 0.014
	λ_t (/day)	0.028 ± 0.002

Approche expérimentale (Thiry et al., JER 2016) vs. monitoring *in situ* (Bunzl et al., 1989; Kato et al., 2012): après une saison de végétation, 50-75% du radiocésium intercepté sont lessivés.

Un « review » récent pour le cèdre japonais (Conze et al., JER 2017) propose une décontamination de 80% après 3 ans.

Une équation plus générique est proposée par Loffredo et al. (JER 2015) pour les résineux:

- rf: intensité de la pluie (mm)
- $A = A_1 + A_2$: stock lessivable (lié à la fermeture de la canopée = input)
- k_1 et k_2 : taux de lessivage lent et rapide
- $r_{12} = 0,22 = A_1/A_2$

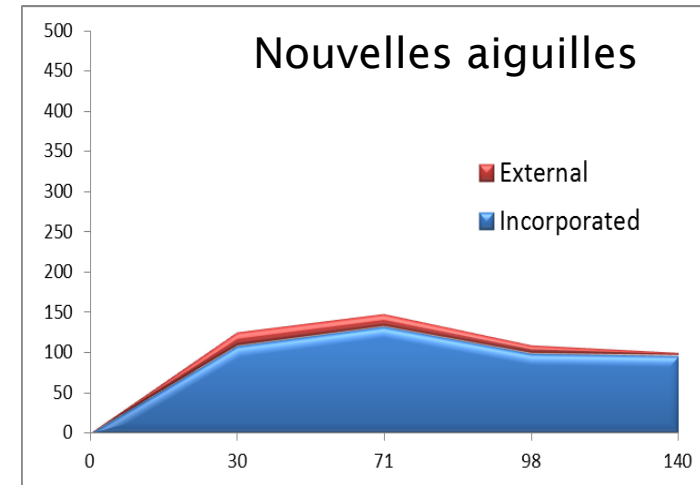
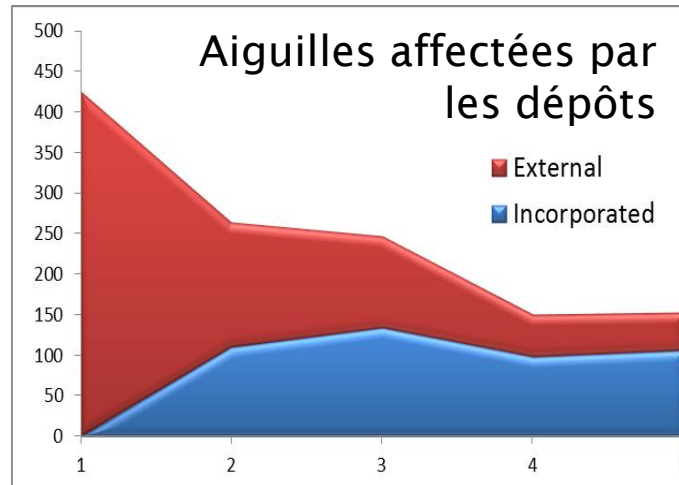
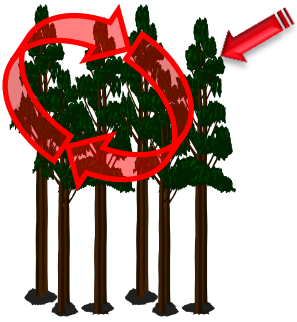


$$CsThF(t) = \int_{t_0}^{t_{final}} \left[(0.0172 \times rf) \times \frac{A_{leachable}}{1 + \frac{1}{r_{12}}} \times \left[(1 - \exp(-k_1 \times t)) + \frac{1}{r_{12}} \times (1 - \exp(-k_2 \times t)) \right] \right] \times dt$$

En plus du lessivage, l'absorption foliaire et les transferts internes contrôlent la contamination initiale des arbres

Une internalisation rapide
(>75% dans le feuillage)

Transferts internes

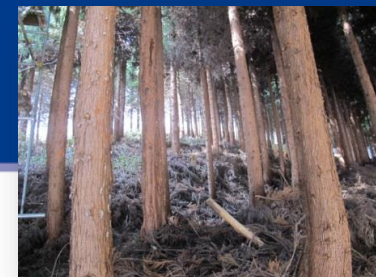


Sur le terrain, l'ampleur de l'absorption foliaire est difficile à estimer (voire négligée dans les études post-Tchernobyl),

Expérimentalement, on a calculé un taux d'internalisation de 0,25/an: 25% des dépôts interceptés ont été incorporés dans l'arbre, en particulier dans la canopée (Thiry et al., JER 2016).

+ Koizumi et al. (2013): 6 mois après les dépôts, 55% du ^{137}Cs du feuillage dans les tissus internes (11% des dépôts totaux à grande échelle),

+ Nishikiori et al. (2014) : in 2011/2012, les tissus internes contiennent >20-40 % de la contamination interne du feuillage et trouve son origine dans l'absorption foliaire.

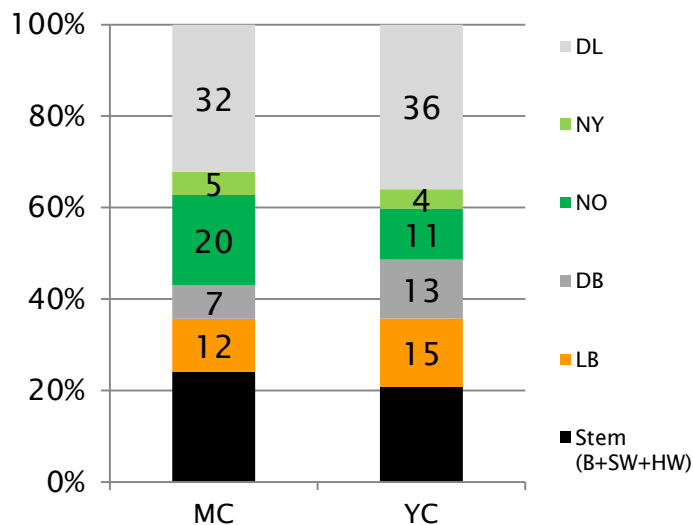


Après 3 saisons de végétation, 79 % (YC) à 86 % (MC) des dépôts totaux ont été transférés à la surface du sol.

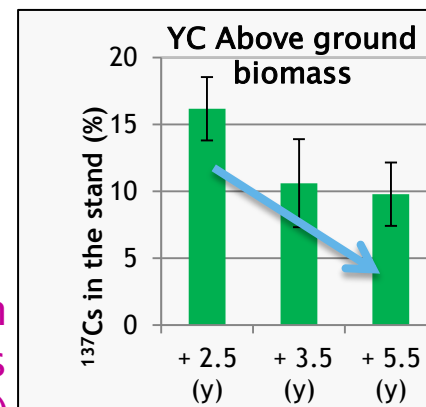
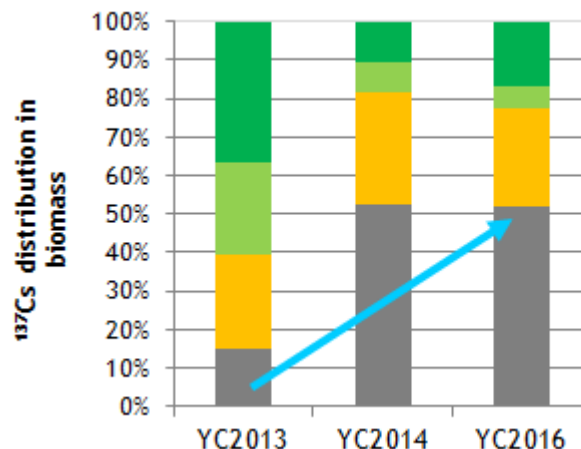
Environ 70% de la contamination des arbres est localisée dans couronne.

Les organes morts de la couronne représentent 35 % (MC) à 45 % (YC) de l'activité des arbres (une spécificité du cèdre japonais ??? Et une question pour la modélisation)

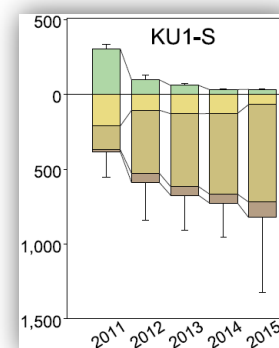
^{137}Cs Distribution (%) in the aboveground biomass - 2013



Une évolution (2013-2016) en accord avec les observations locales (IRSN/PSE-ENV 2017-010)



■ Foliage
■ Branches
■ Stem
■ Roots



Imamura et al., Srep 2017

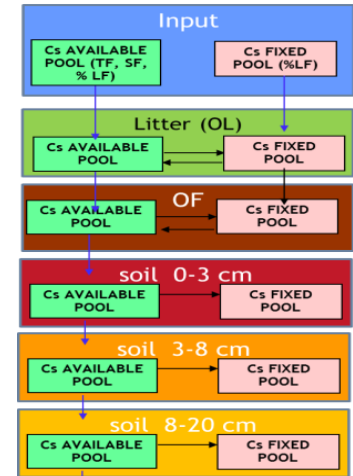
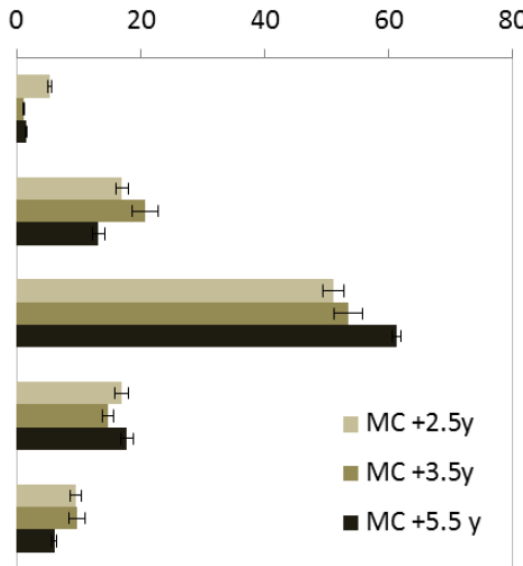
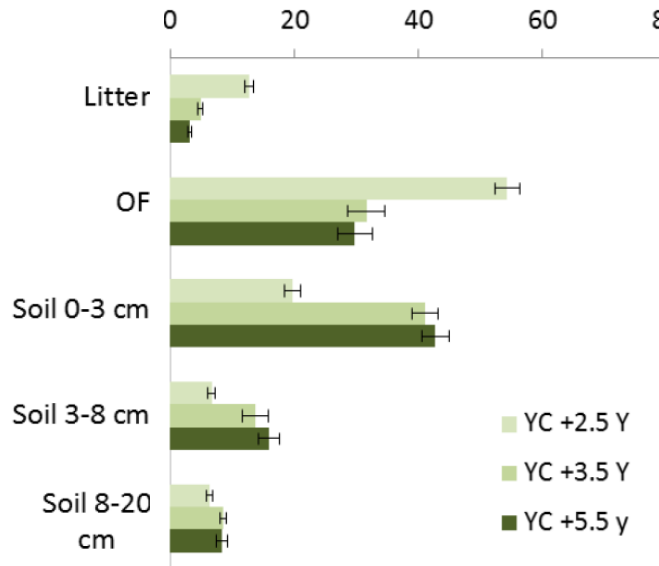
Dans le sol, un enjeu est la maîtrise de la répartition entre « humus » et sol minéral (impact sur la biodisponibilité)

Young Cedar

Mature Cedar

¹³⁷Cs distribution (%)

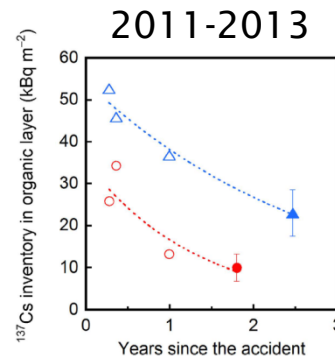
¹³⁷Cs distribution (%)



$$\text{Flux (d}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Bq/m}^2\text{below_layer}}{\text{Bq/m}^2\text{ Total} \times \text{time}}$$

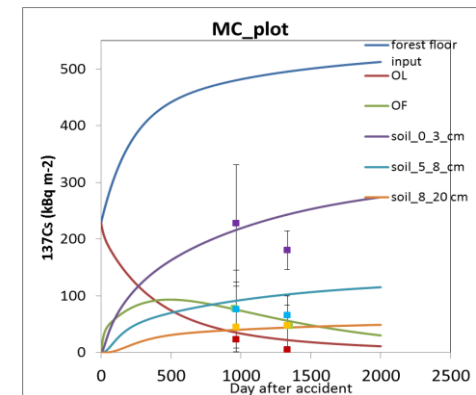
Stabilisation apparente des profils verticaux après 2-3 ans (après une migration initiale rapide)

Il faudra réconcilier les différentes données



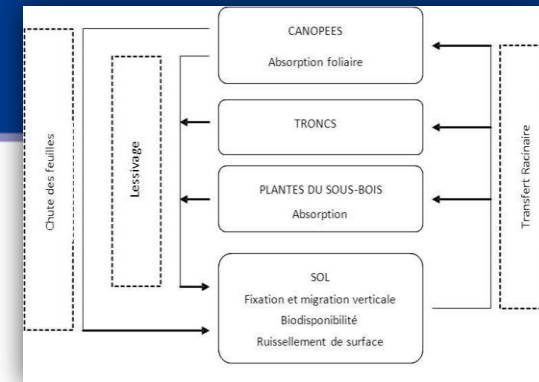
Koarashi et al., Srep 2016

2013-2015 (Coppin et al., Icobte 2015)



Vers une modélisation améliorée TREE4 (IRSN): avantages et carences

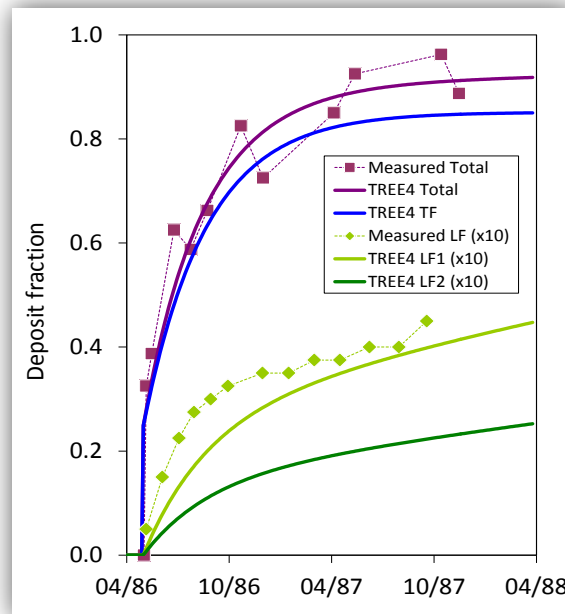
- Une représentation semi-mécanistique (LAI, P ...) de l'interception et du lessivage
- Un caractère générique opportun
- Plutôt adapté pour le court-terme (2-5 ans)



Mais:

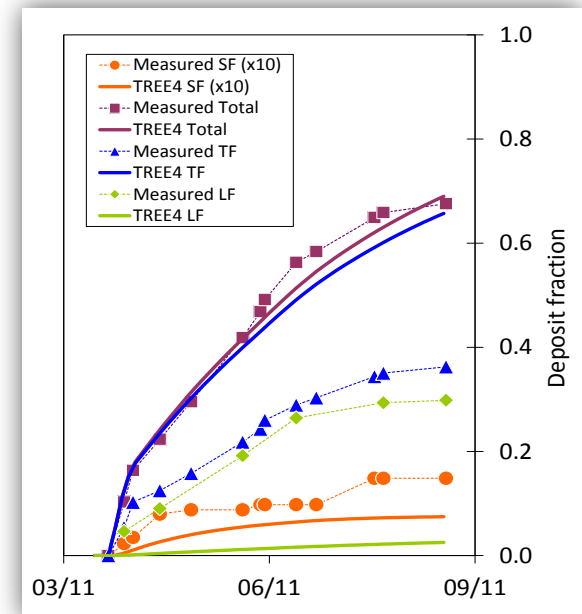
- Incertitudes liées a plusieurs valeurs par défaut (best-estimates)
- Une représentation simplifiée du sol et des processus de recyclage par l'arbre

Germany- Bunzl et al. (1989)



Calmon et al.,
STOTEN, 2015

Japan - Kato et al. (2012, 2014)



- Une complexité contrainte par les observations et la disponibilité des données
- Une représentation réaliste des flux (ex.: prélèvement racinaire)
- Plutôt adapté pour le long terme (10-30 ans)

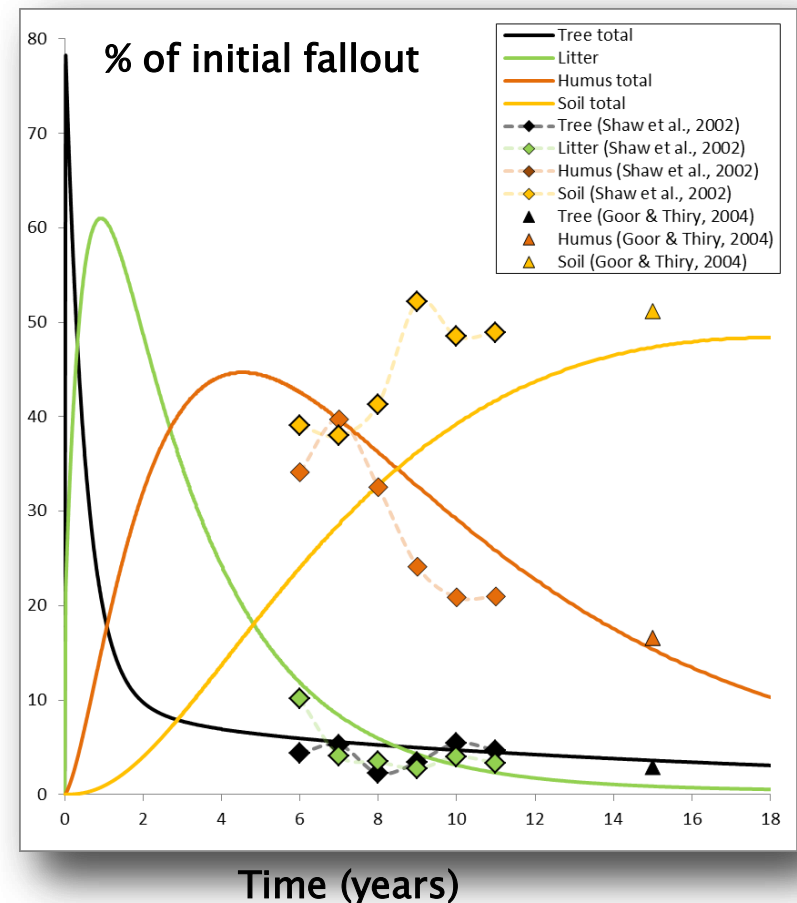
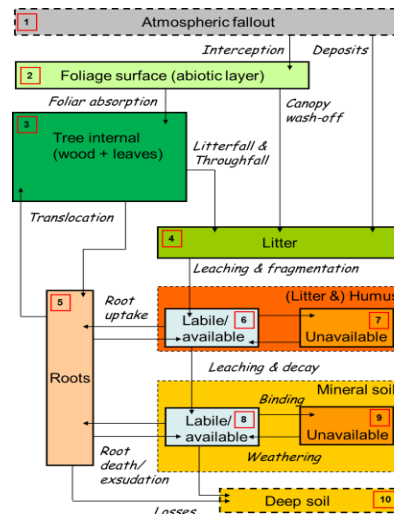
Thiry & Albrecht, JER, submitted

Mais:

- Site-spécifique (*Pinus sylvestris* L.)
- Incertitudes liées au type de dépôt (interception) et à l'effet de saison

+ Validation via deux jeux de données pour du Pin sylvestre en Belarus:

1. Vetka: 2001
2. Kruki: 1992-1998



TRIPS comme outil de questionnement: Quel impact de l'absorption foliaire et racinaire sur le phasage de la contamination des arbres ?

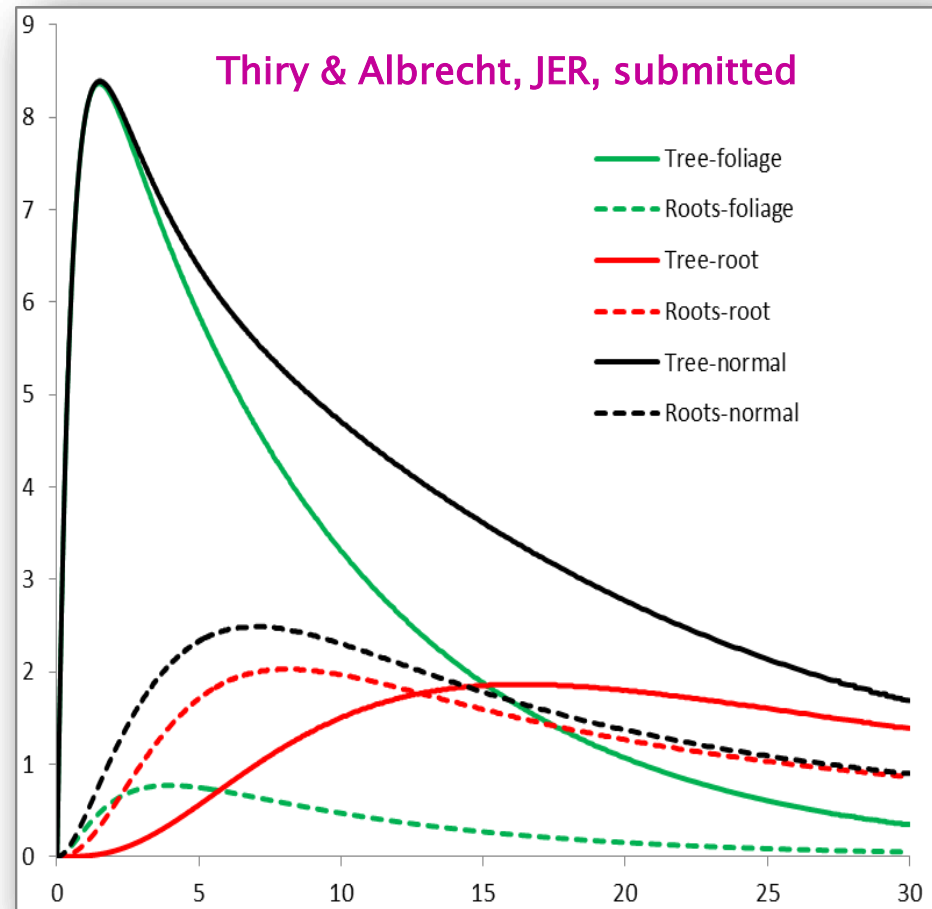
Absorption foliaire exclusive:

Le maximum de contamination n'est pas changé, mais une influence majeure est limitée à 10-20 ans ($T_{1/2}^{eff}$ de 12 to 6 ans)

Absorption racinaire exclusive:

La contamination des racines est rapide mais l'accumulation dans l'arbre est plus graduelle et retardée dans le temps (pic tardif: $T_{1/2}^{eff}$ de 12 à 29 ans)

Contribution similaire de l'absorption foliaire et racinaire à la contamination de l'arbre après 15 ans



On a une bonne compréhension des processus qui régulent le cycle du radiocésium en écosystème forestier et des contraintes (variabilité spatio-temporelle) pour une transposition dans les modèles.

Un traitement et une valorisation importante des données de monitoring (très nombreuses) est attendue.

Une modélisation améliorée va nécessiter un travail de hiérarchisation des informations (monitoring vs. littérature):

- ◆ Pour des jeux de données intégrés (orientés « modèle »),
- ◆ En phase avec une complexité des modèles au bon niveau.

Choix des simulations et vérifications des simulations: (Fukushima, Tchernobyl, Ope).

