



Faire avancer la sûreté nucléaire

Modélisation opérationnelle du devenir du césium des bassins versants à l'océan

L. Garcia-Sanchez¹, M. Delmas¹, V. Nicoulaud¹,
J.M. Métivier¹, P. Boyer¹, F. Eyrolle-Boyer¹,
A. De Vismes², X. Cagnat², Y. Onda³

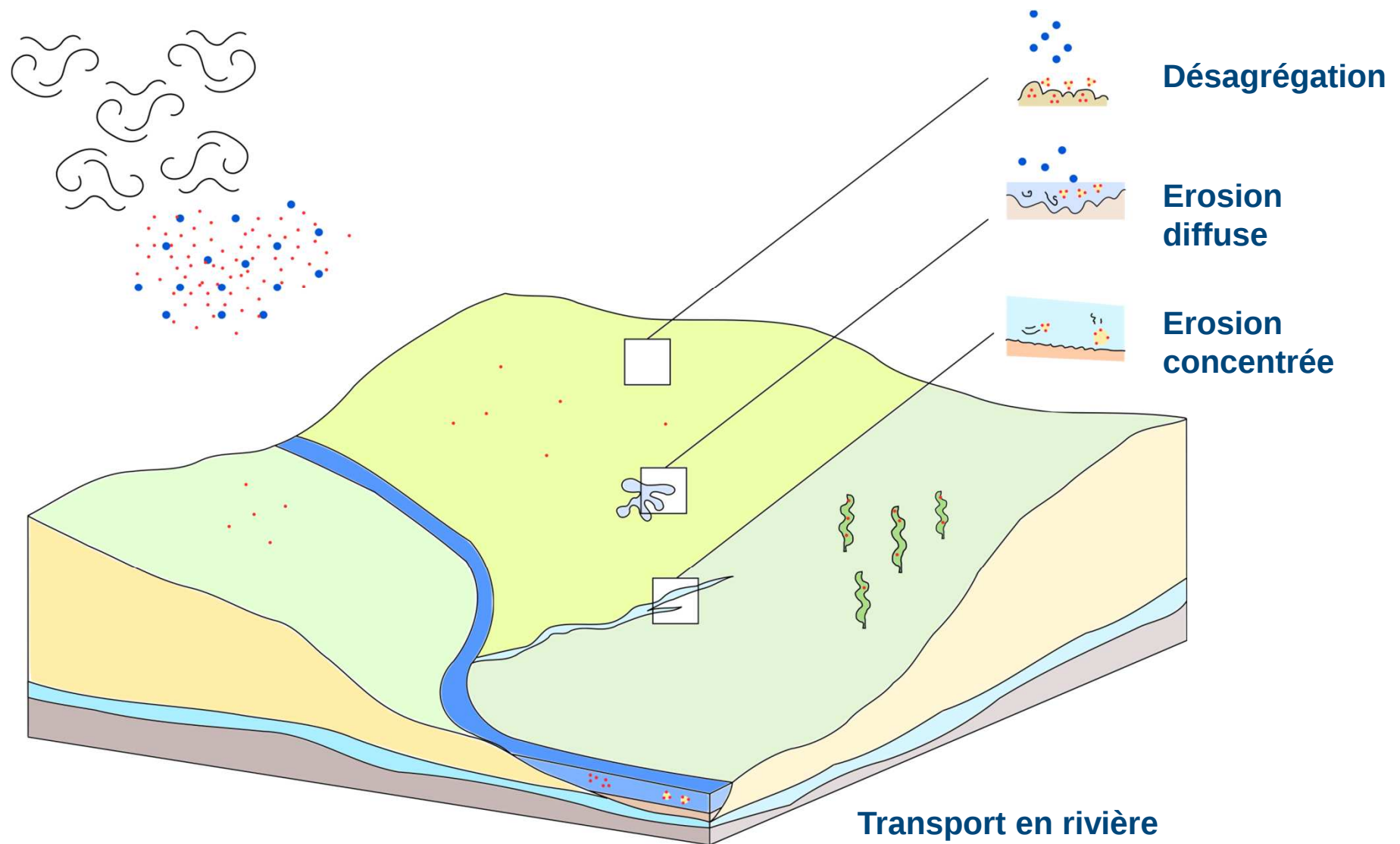
¹IRSN, Saint-Paul-lez-Durance, France

²IRSN, Orsay, France

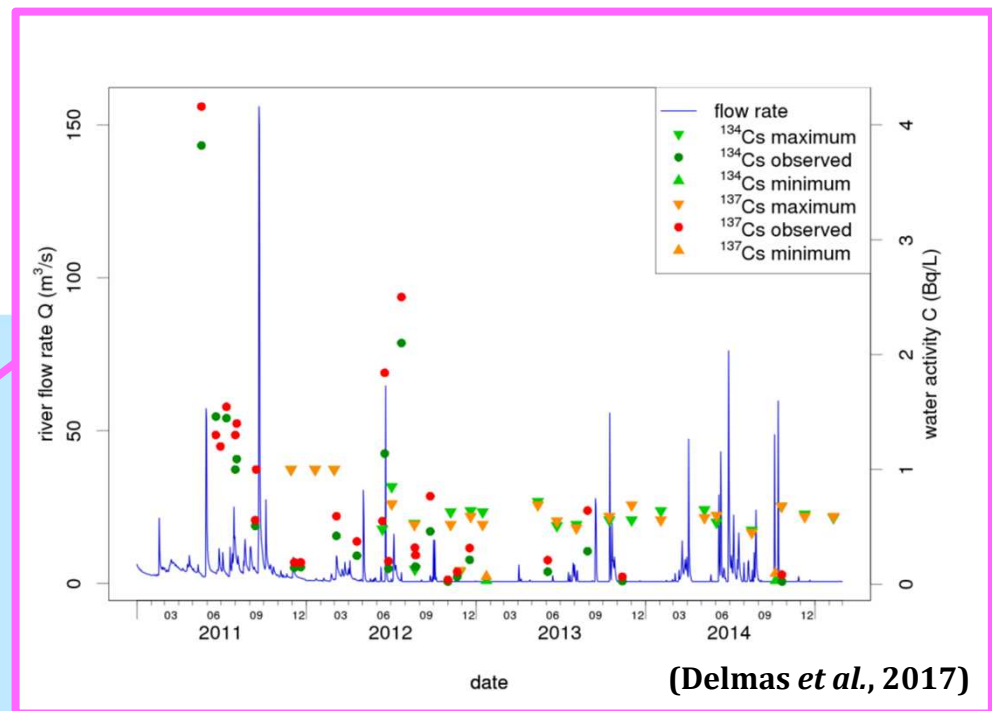
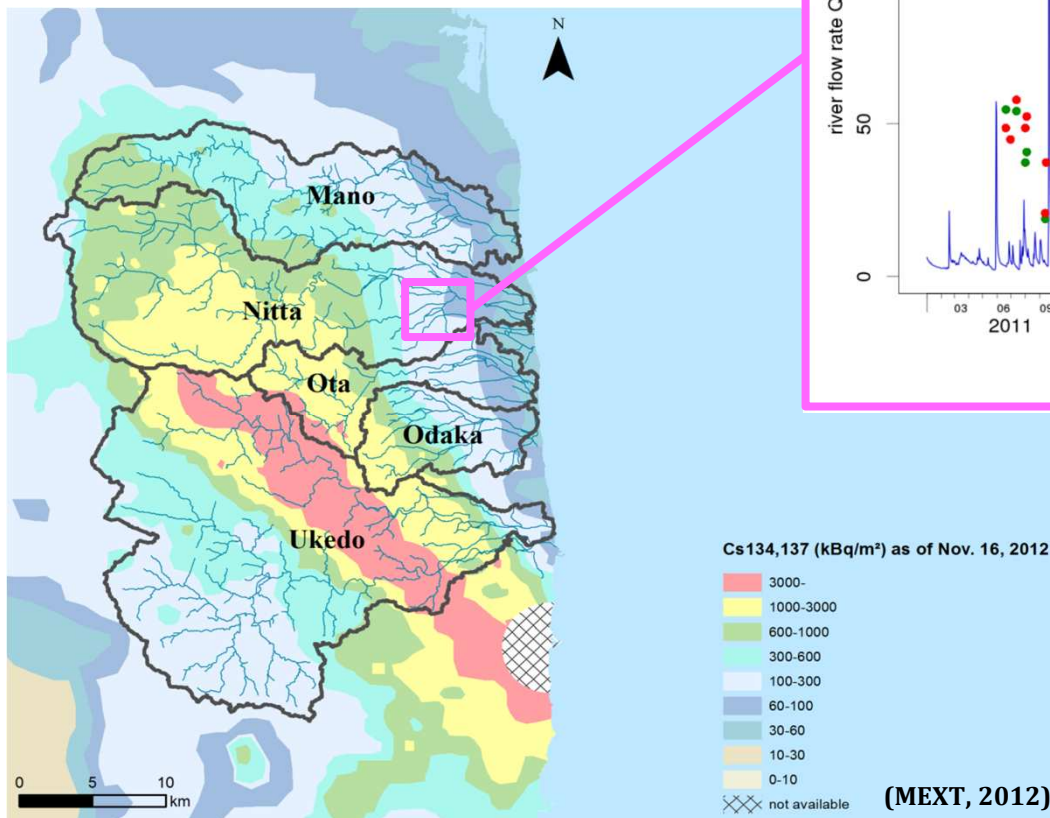
³University of Tsukuba, Japan



LESSIVAGE DES BASSINS VERSANTS: PROCESSUS ET ÉCHELLES



LESSIVAGE DES BASSINS VERSANTS: ENJEUX

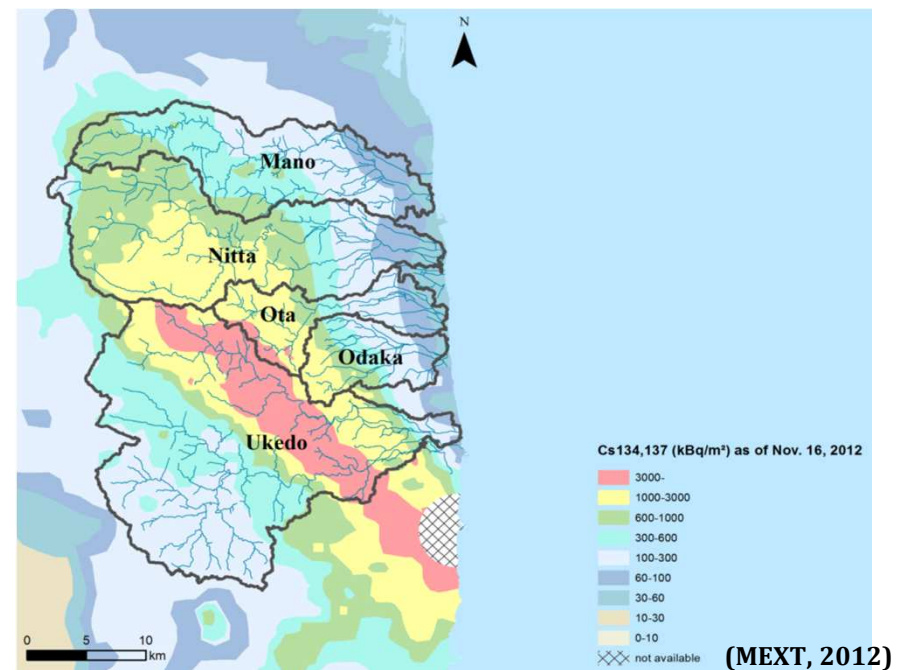


■ Objectifs

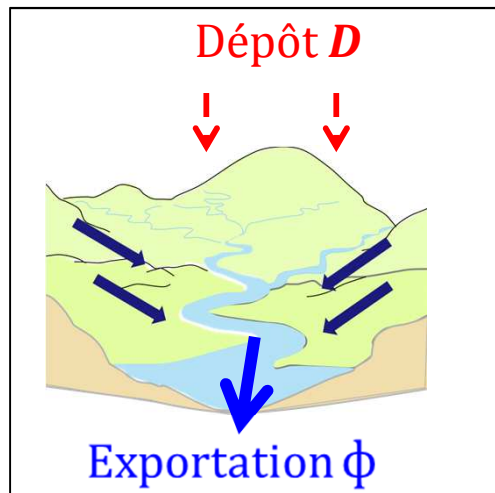
- Estimer les flux (^{134}Cs , ^{137}Cs) à la mer autour de Fukushima
- Améliorer les modèles opérationnels de lessivage (formulation/valeurs/validation)

■ Pistes de recherche (M. Delmas, 2014-2016)

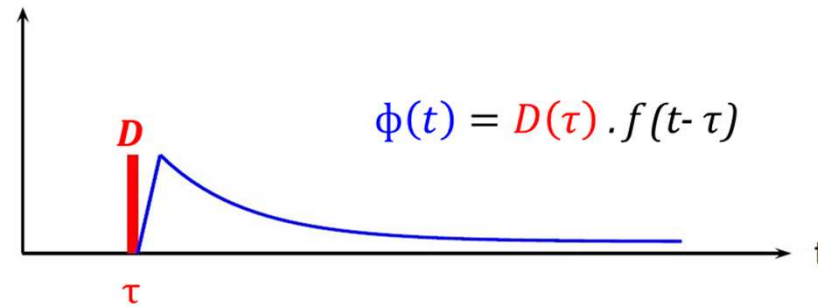
- 1. Fonction de transfert (flux annuels)
- 2. Facteurs contrôlant les concentrations (méta-analyse)



ÉVALUATION DU LESSIVAGE



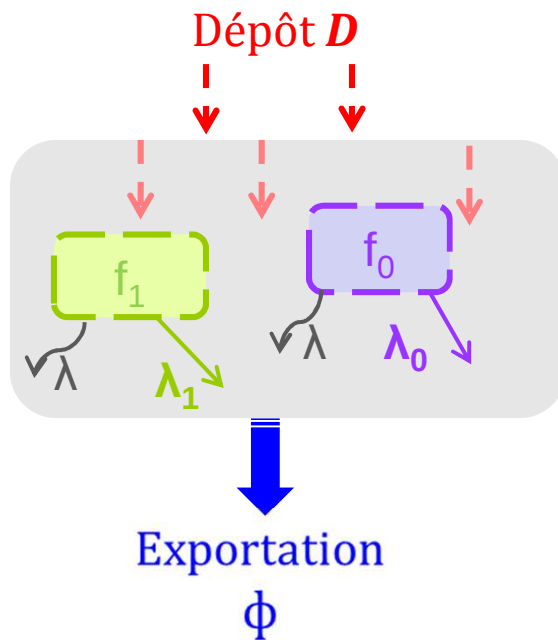
Fonction de transfert



Formulation classique

$$\phi = D \cdot (\lambda_0 f_0 \cdot e^{-(\lambda + \lambda_0)t} + \lambda_1 f_1 \cdot e^{-(\lambda + \lambda_1)t})$$

Helton *et al.* (1985); Dominik *et al.* (1987);
Monte *et al.* (1995); Smith *et al.* (2000)

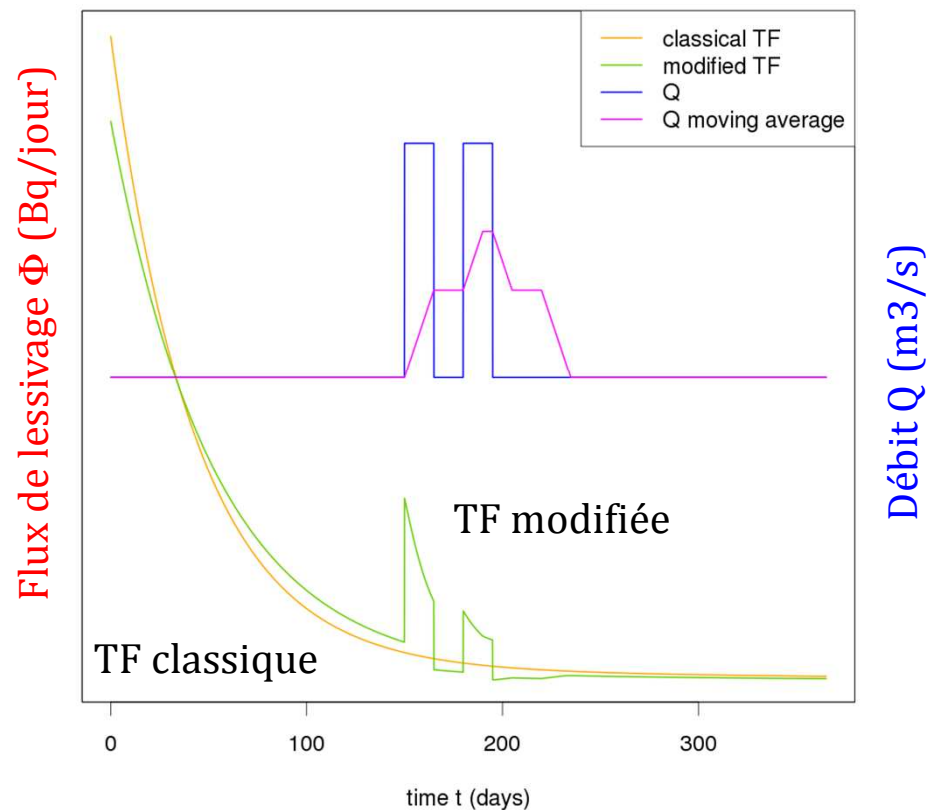


Avantages/limites

- échelle temporelle: ~année
- incertitude des paramètres
- peu de paramètres spécifiques pour la préf. de Fukushima
- hydrologie non explicitement prise en compte

FORMULATION MODIFIÉE

$$\phi(t) = D(\tau) \boxed{G(t)} \boxed{f(t_c - \tau)}$$



Effet des fluctuations du débit (Q)

Mémoire de l'histoire récente des débits :

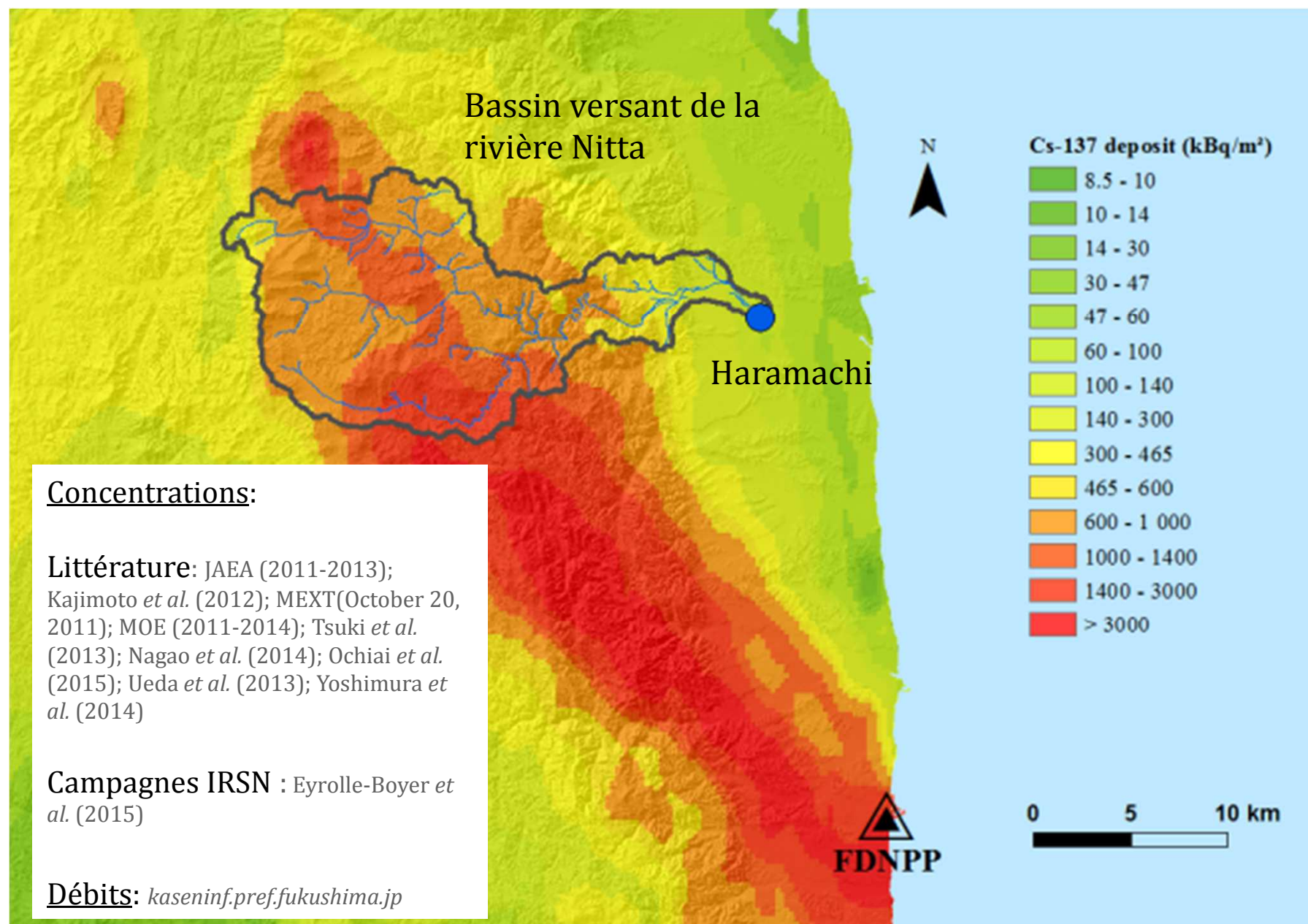
$$G = \frac{Q(t)}{Q_{22d}(t)} \exp\left(-\frac{Q_{85\%}}{Q_{22d}(t)}\right)$$

Effet du volume écoulé

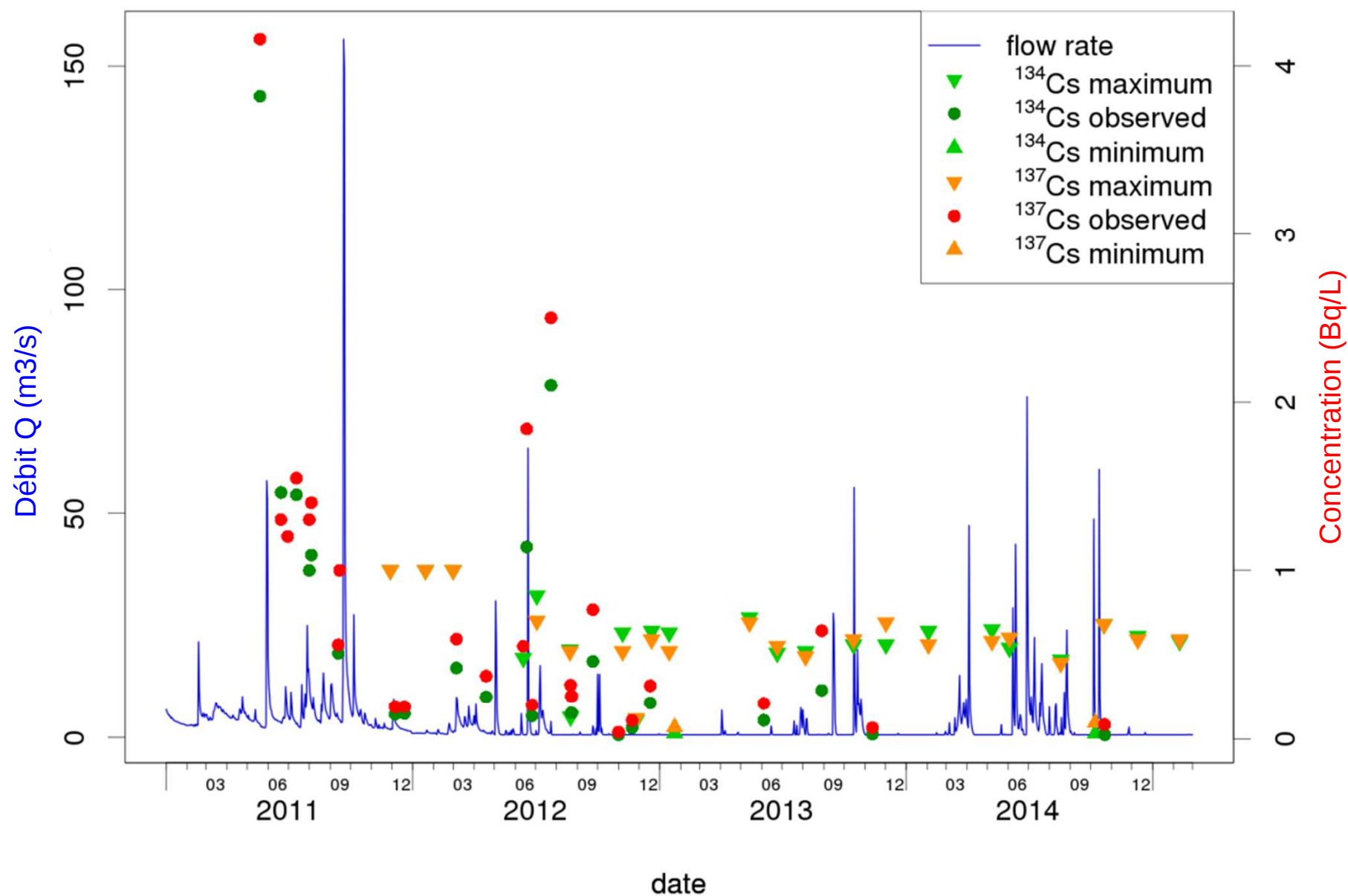
Temps corrigé par le volume d'eau exporté (t_c) (Rhode et *al.*, 1996)

$$t_c = \frac{\int_0^t Q(\tau) \cdot d\tau}{\bar{Q}}$$

DONNÉES DE SURVEILLANCE



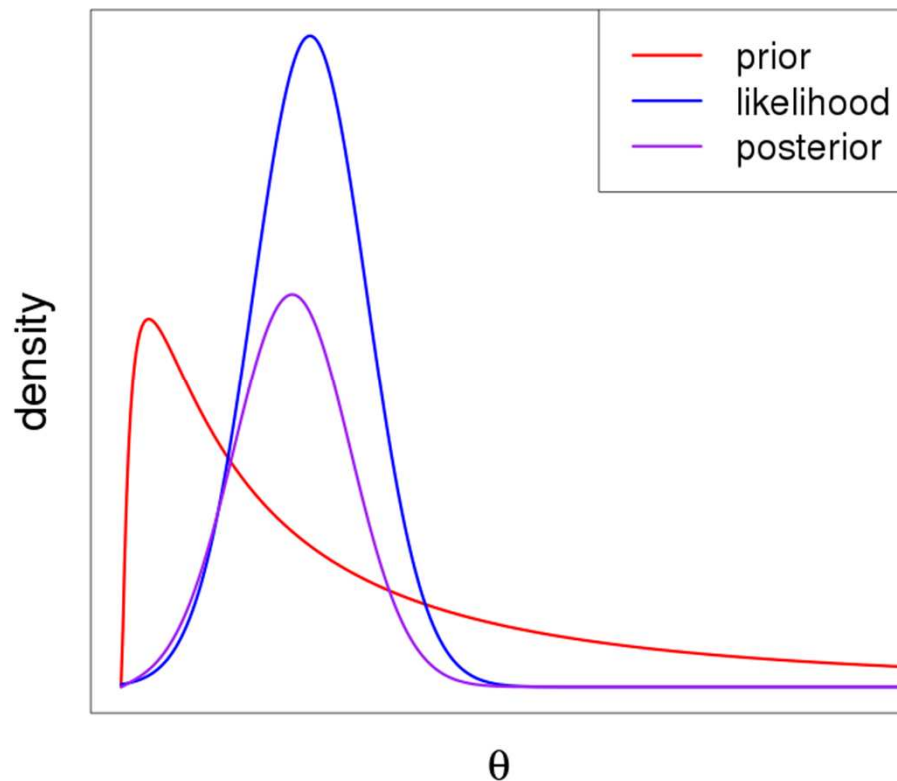
DONNÉES DE SURVEILLANCE



IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES

CONTRAINTES

- Peu d'observations
- Données censurées (min, max)



APPROCHE RETENUE (BAYES)

- Connaissance *a priori* $P(\theta)$
Distribution des paramètres (littérature)
- Observations (y)
Valeurs de Concentrations
- Modèle $P(y|\theta)$
Fonction de transfert avec erreur

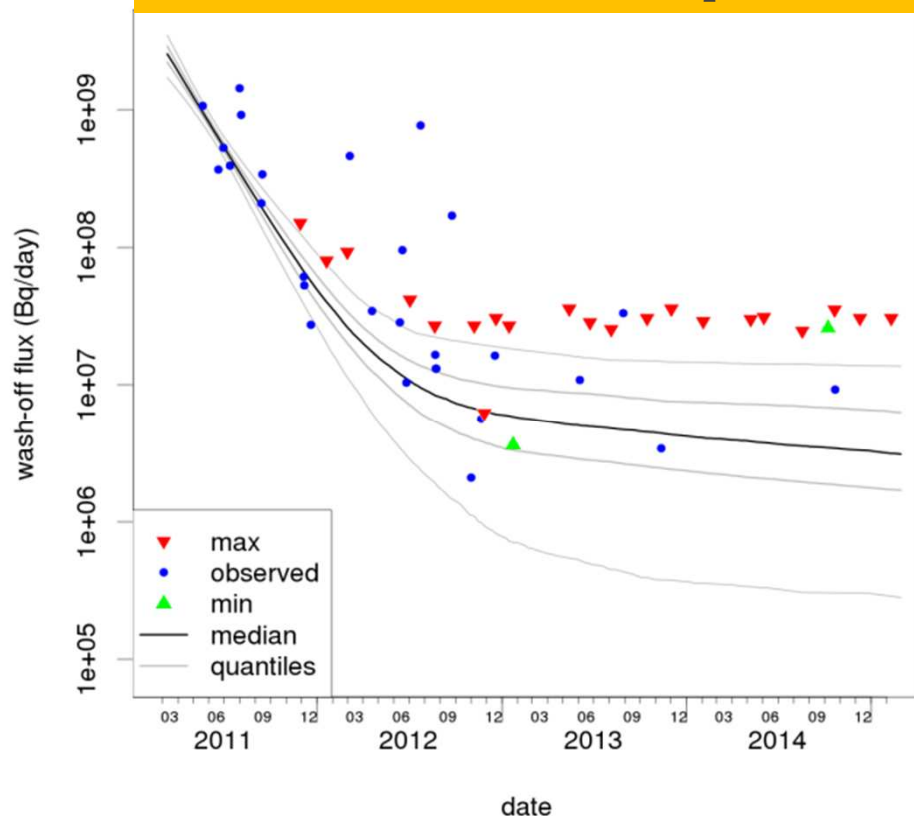
Théorème de Bayes

$$P(\theta|y) \propto P(y|\theta) \times P(\theta)$$

- Résolution Numérique:
 - Algorithme: Markov Chain Monte Carlo (MCMC)
 - Implémentation: GNU MCSim (Bois, 2009)

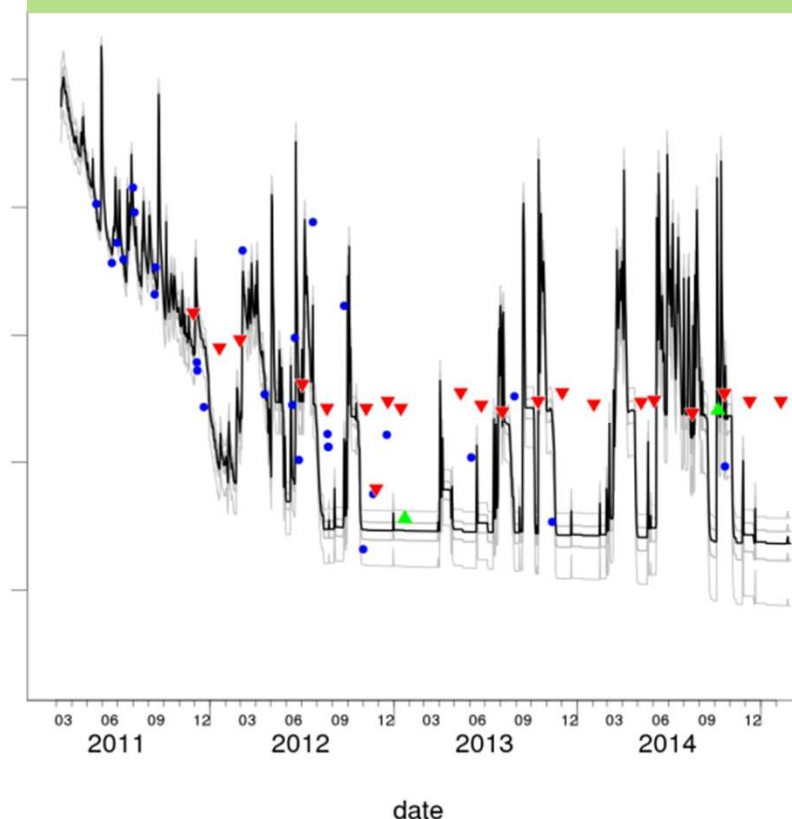
FLUX AJUSTÉS

Formulation classique



- forte incertitude
(RMSE=3050 Bq/s, EF=0.41)
- export année 1 (%): [0.09–0.11]

Formulation modifiée



- incertitude réduite
(RMSE=1600 Bq/s, EF=0.83)
- export année 1(%): [0.21-0.26]

■ Methodologique

- l'approche fonction de transfert classique est incertaine
- l'approche modifiée a un meilleur pouvoir explicatif
- l'approche Bayésienne permet d'exploiter toute l'information disponible

■ Pratique

- reconstruction des flux pour la rivière Nitta mais avec pouvoir explicatif limité (~ 140 MBq/day and ~ 0.6 Bq/L)

■ Perspectives

- intra bassins: il faudrait plus d'information pour faire la “quadrature” des flux (e.g. conditions hydrologiques)
- inter bassins: comment généraliser à d'autres bassins versants?

■ Densité de contamination en ^{137}Cs (Bq/m²)

- Totale (Nagao *et al.*, 2014; Ochiai *et al.*, 2015; Eyrolle-Boyer *et al.*, 2016)
- Distribution (Chartin *et al.*, 2013; Evrard *et al.*, 2014; Lepage *et al.*, 2016)

■ Conditions sur les versants

- Occupation du sol (Shinomiya *et al.*, 2014; Yoshimura *et al.*, 2015)
- Couverture végétale (Yoshimura *et al.*, 2015)

■ Temps

- délai (Iwagami *et al.*, 2015, 2016)
- saison (Tsuji *et al.*, 2016)

■ Hydrologie/érosion

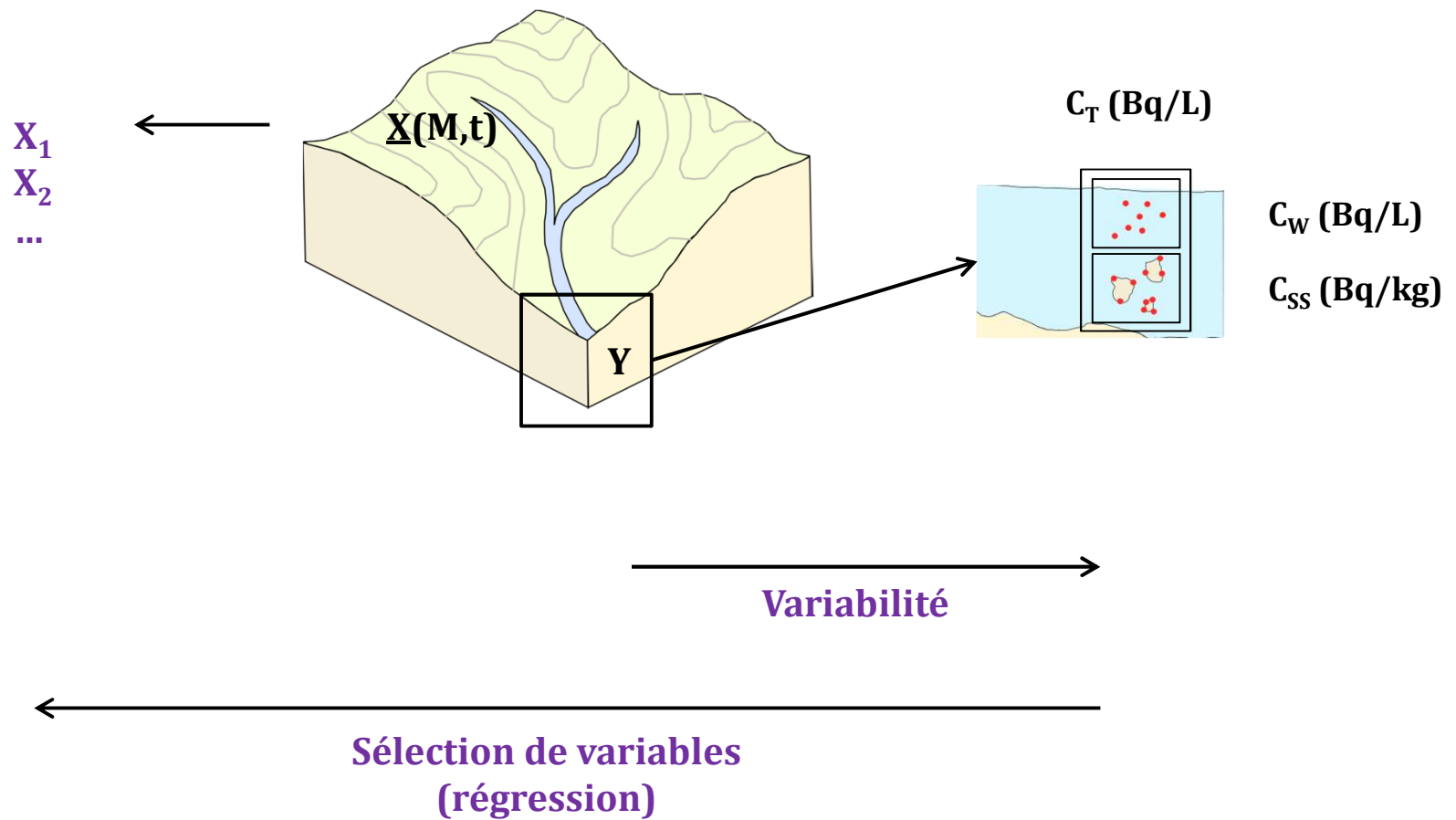
- Précipitations (Iwagami *et al.*, 2016)
- Débit de base/crue (Ueda *et al.*, 2013, Nagao *et al.*, 2013)
- Connectivité (Kurikami *et al.*, 2014; Lopez-Vincente *et al.*, 2017)

META-ANALYSE: APERCU

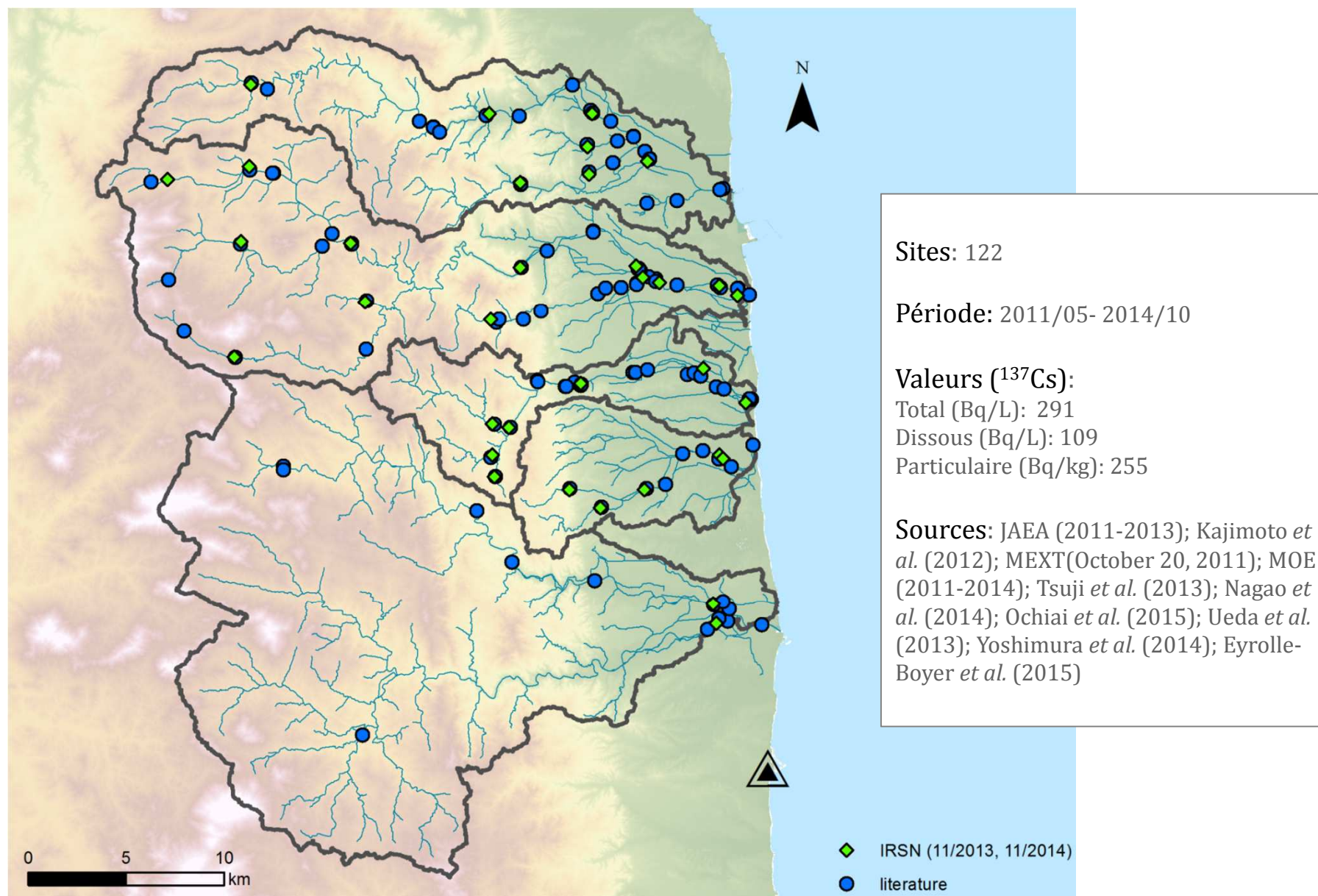
Conditions (X)
(variables scalaires)

Unités expérimentales
(bassins versants)

Observations Y(t)



OBSERVATIONS (Y): CONCENTRATIONS EN ^{137}Cs DES RIVIÈRES



CONDITIONS (X): TEMPS ET PRÉCIPITATIONS

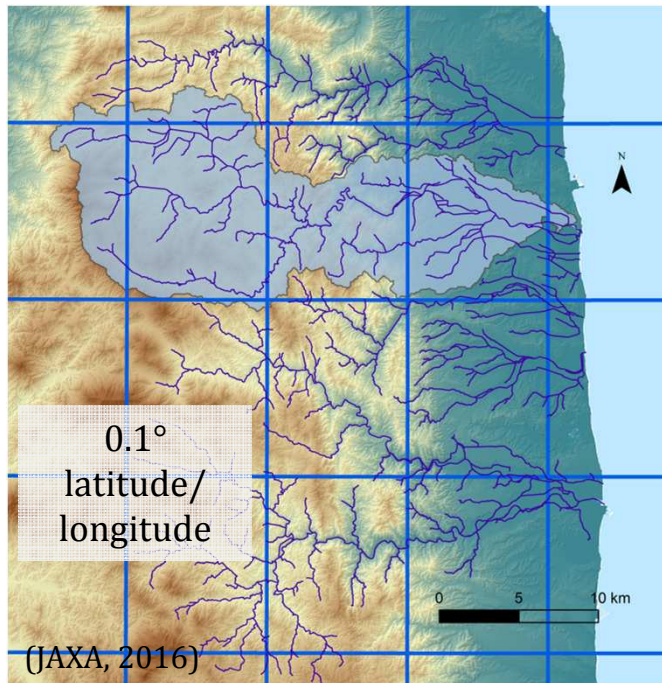
- Délai

$$\tau = t - t_0$$

- Saison

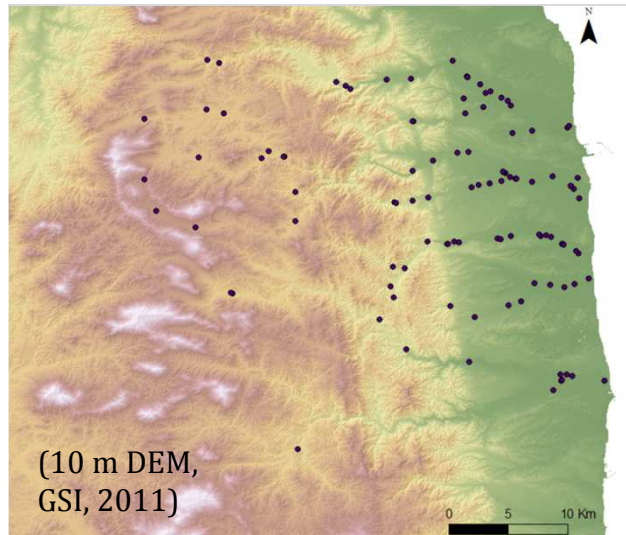
Printemps (Mars-Juin)
Typhon (Juillet-Octobre)
Hiver (Novembre-Février)

- Pluies antécédentes



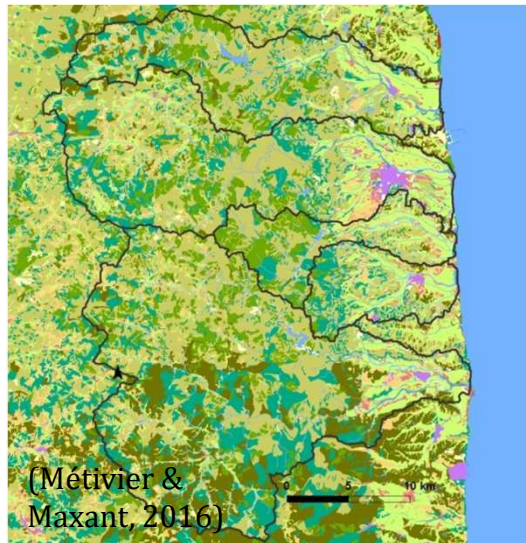
(mm):
R10d
R30d
R90d

CONDITIONS (X): MORPHOLOGIE ET OCCUPATION DU SOL



■ Pente

$\overline{SL}$	pente moyenne
SL_G	proportion de pentes faibles (<5%)
SL_S	proportion de pentes raides (>15%)

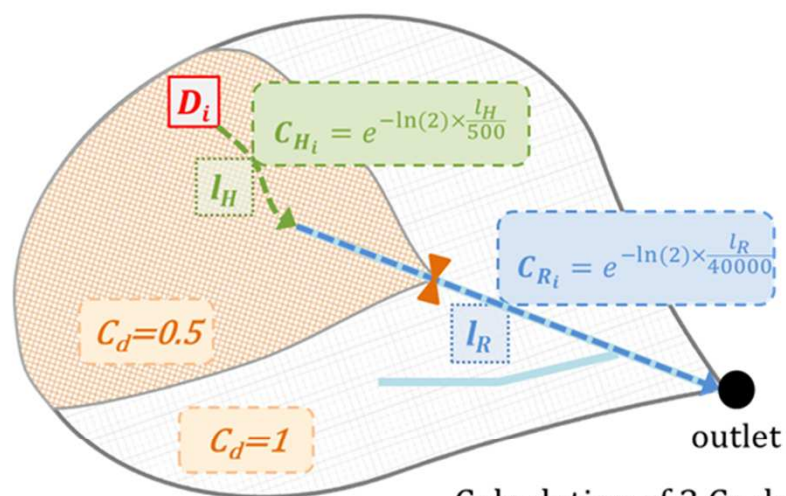


■ Occupation du sol

Lc_{for}	proportion de forêts
Lc_{agri}	proportion de zones agricoles

CONDITIONS (X): DENSITÉ DE CONTAMINATION EN ^{137}Cs

Indices de dépôt

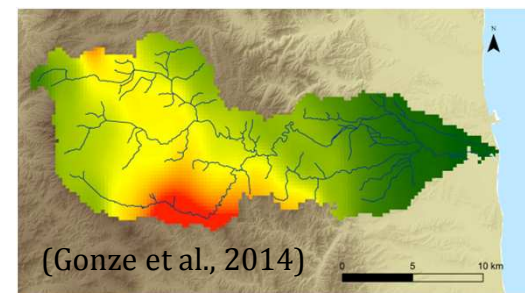


- Watershed W
- Dam upstream area
- River network
- Dam

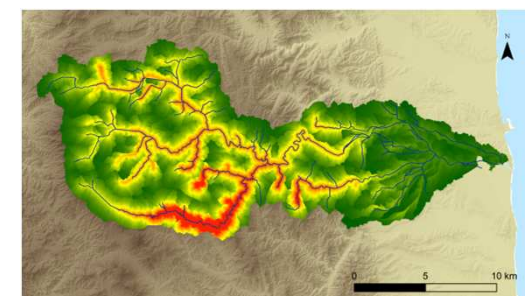
Calculation of 3 Cs deposit indices

$$\left\{ \begin{array}{l} D_0 = \frac{1}{S} \sum_{i \in W} D_i \\ D_l = \frac{1}{S} \sum_{i \in W} C_{H_i} C_{R_i} D_i \\ D_{l+d} = \frac{1}{S} \sum_{i \in W} C_{H_i} C_{R_i} C_{d_i} D_i \end{array} \right.$$

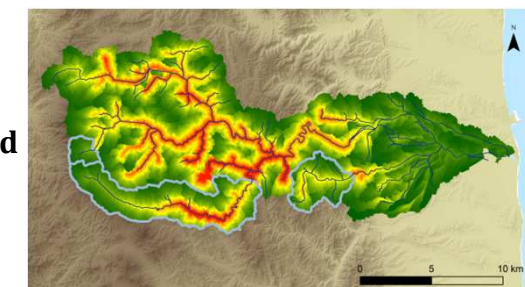
D_0



D_l



D_{l+d}



SÉLECTION DE VARIABLES

■ Modèles testés:

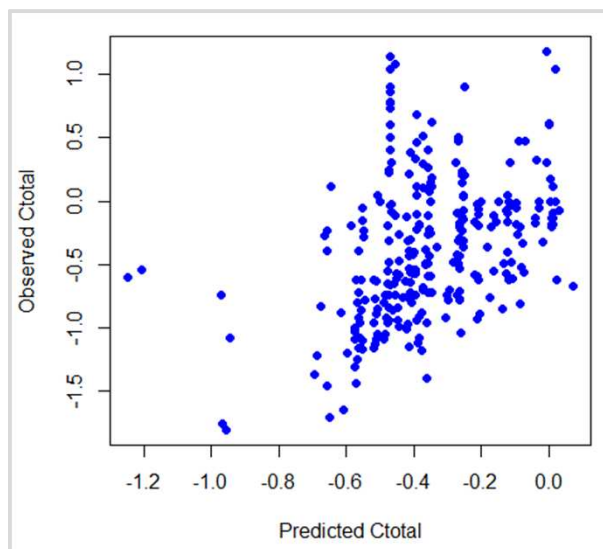
$$\begin{array}{ccccccc} Y & = & f & (X_1, X_2, \dots, X_p) & + & \varepsilon \\ \downarrow & & \downarrow & \downarrow & & \downarrow \\ \begin{array}{l} \log C_T \text{ (Bq/L)} \\ \log C_W \text{ (Bq/L)} \\ \log C_{SS} \text{ (Bq/kg)} \end{array} & & \text{linear} & \left[\begin{array}{l} \log D_0 \\ \log D_1 ; \text{Season} ; \\ \log D_{l+d} \end{array} \right. & \begin{array}{l} \text{Time} \\ \text{Slope} \\ \text{Land-cover} \\ \dots \end{array} & & \text{least-squares} \end{array}$$

■ Sélection: Critère d'Information d'Akaike (AIC)

- erreur de modélisation
- nombre de paramètres

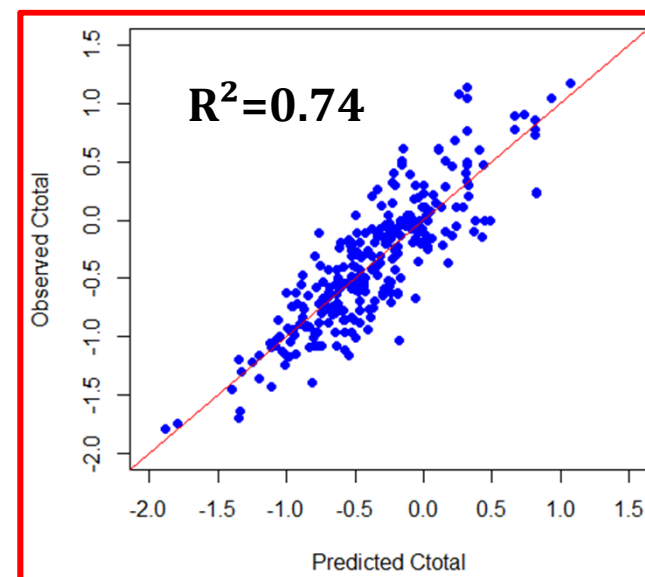
VARIABLES CRITIQUES

C_T (Bq/L)



Variables sélectionnées

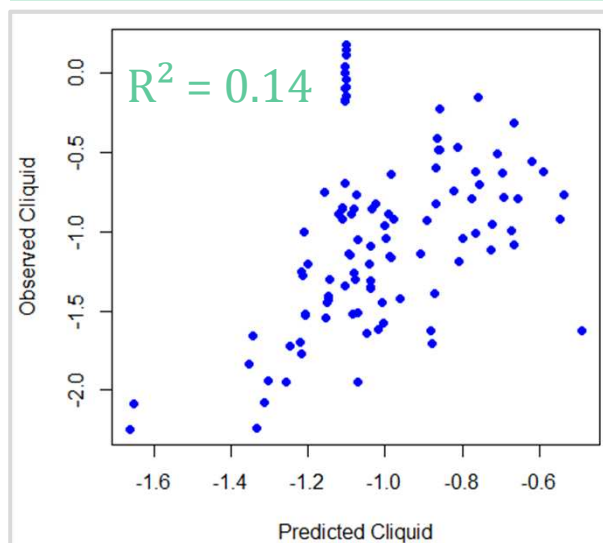
Model performance criterion	Value
R^2	0.74
GSE	1.91
Cross validation results	RPD values
mean RPD	1.80
median RPD	1.76
Selected variable	p-value
D_1	$< 2.2e-16$
τ	$< 2.2e-16$
Season	$2.54E-10$
SL	$8.67E-07$
SL_G	$1.05E-06$
R90d	$1.47E-05$
LC_{for}	$8.67E-05$
SL_S	$2.32E-04$
LC_{agri}	$1.17E-03$
R30d	$5.56E-03$



D_1 : suggère une origine locale du ^{137}Cs total
(près du réseau hydrographique)

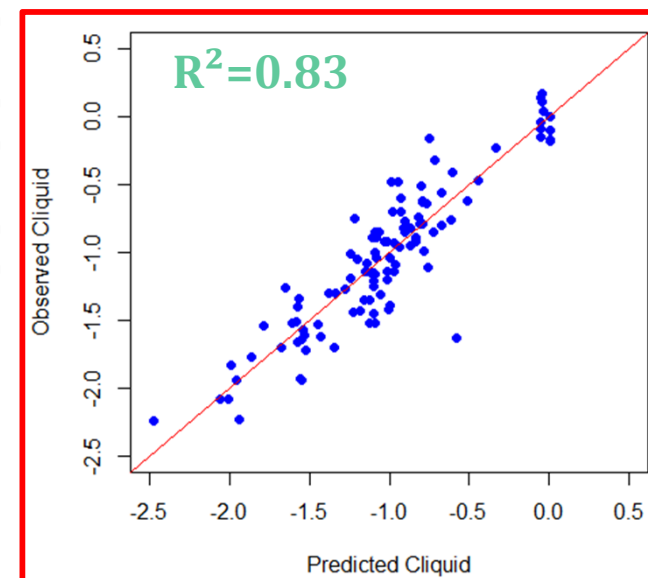
VARIABLES CRITIQUES

C_w (Bq/L)



Variables sélectionnées

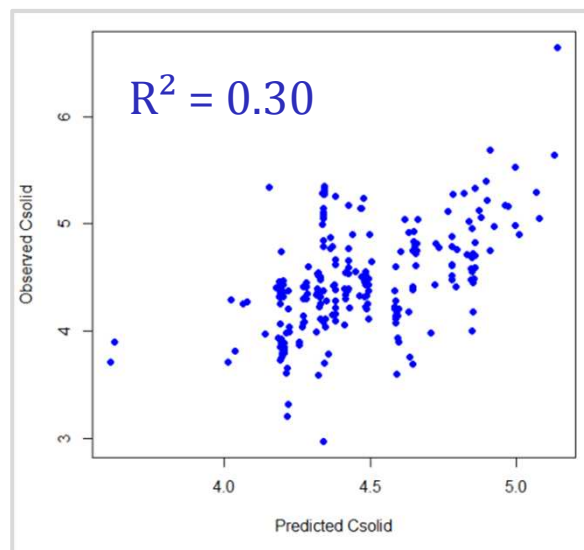
Model performance criterion	Value
R^2	0.83
GSE	1.70
Cross validation results	RPD values
mean RPD	2.14
median RPD	2.06
Selected variable	p-value
τ	< 2.2E-16
D_0	1.07E-11
Season	4.12E-06
SL_G	0.12
Lc_{for}	0.12
R90d	0.15



D_0 : suggère une origine diffuse du ^{137}Cs dissous

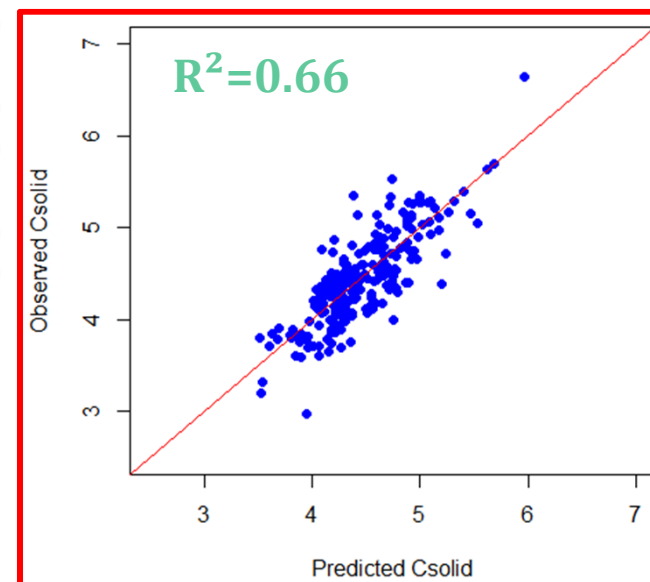
VARIABLES CRITIQUES

C_{ss} (Bq/kg)



Variables sélectionnées

Model performance criterion	Value
R^2	0.66
GSE	1.91
Cross validation results	RPD values
mean RPD	1.56
median RPD	1.53
Selected variable	p-value
D_{l+d}	$< 2.2E-16$
LC_{agri}	$5.46E-08$
LC_{for}	$6.04E-05$
Season	$1.16E-04$
SL_G	$2.43E-04$
$\overline{SL}$	$6.50E-03$
τ	$1.80E-02$
R90d	$2.92E-02$
R10d	$4.65E-02$



D_{l+d} : suggère une effect tampon des barrages sur le ^{137}Cs particulaire

■ Variabilité des concentrations en ^{137}Cs des rivières

- grandes dissimilarités (2-3 ordres de grandeur)...
- ... essentiellement multifactorielles
 - les variables critiques sont généralement dépôt et temps
 - le dépôt pondéré est un indicateur pertinent du terme source
 - d'autres propriétés sont aussi critiques: pente, occupation du sol...

■ Pour améliorer l'évaluation du lessivage

- calculer des descripteurs à partir de l'information SIG disponible
- les inclure dans les outils:
 - typologie des bassins versants
 - relation empiriques (e.g. fonction de transfert) par type de bassin versant