


IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Apport de l'inférence bayésienne à la caractérisation des incertitudes dans la modélisation des transferts de polluants radioactifs dans l'environnement

Marie Simon-Cornu

IRSN PRP-ENV/SESURE, Cadarache



Apport de l'inférence bayésienne à la caractérisation des incertitudes dans la modélisation des transferts de polluants radioactifs dans l'environnement

Des attentes

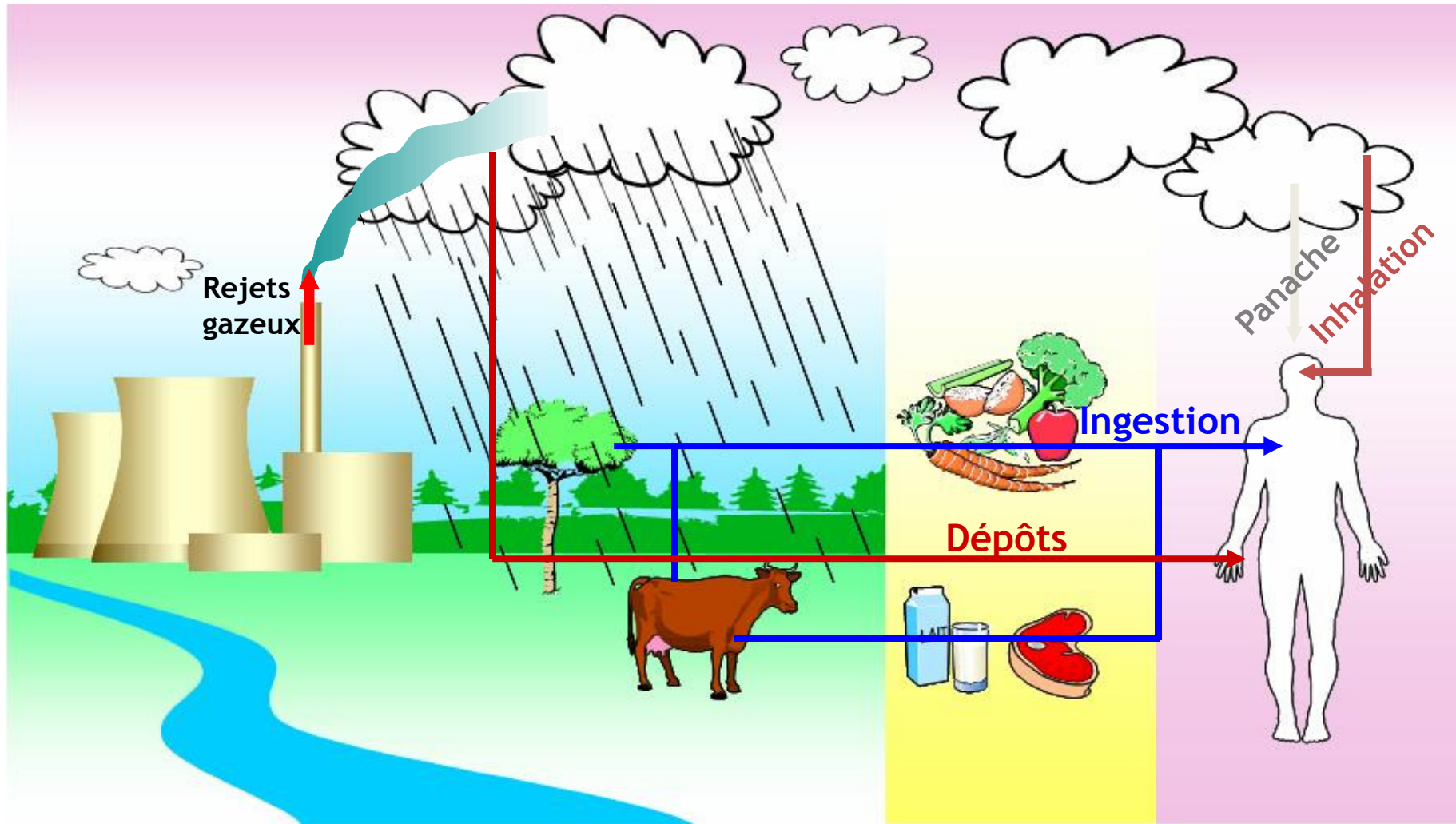
- Introduction à la radioécologie
- Place du bayésien dans les SRA et roadmaps en radioécologie

Des avancées

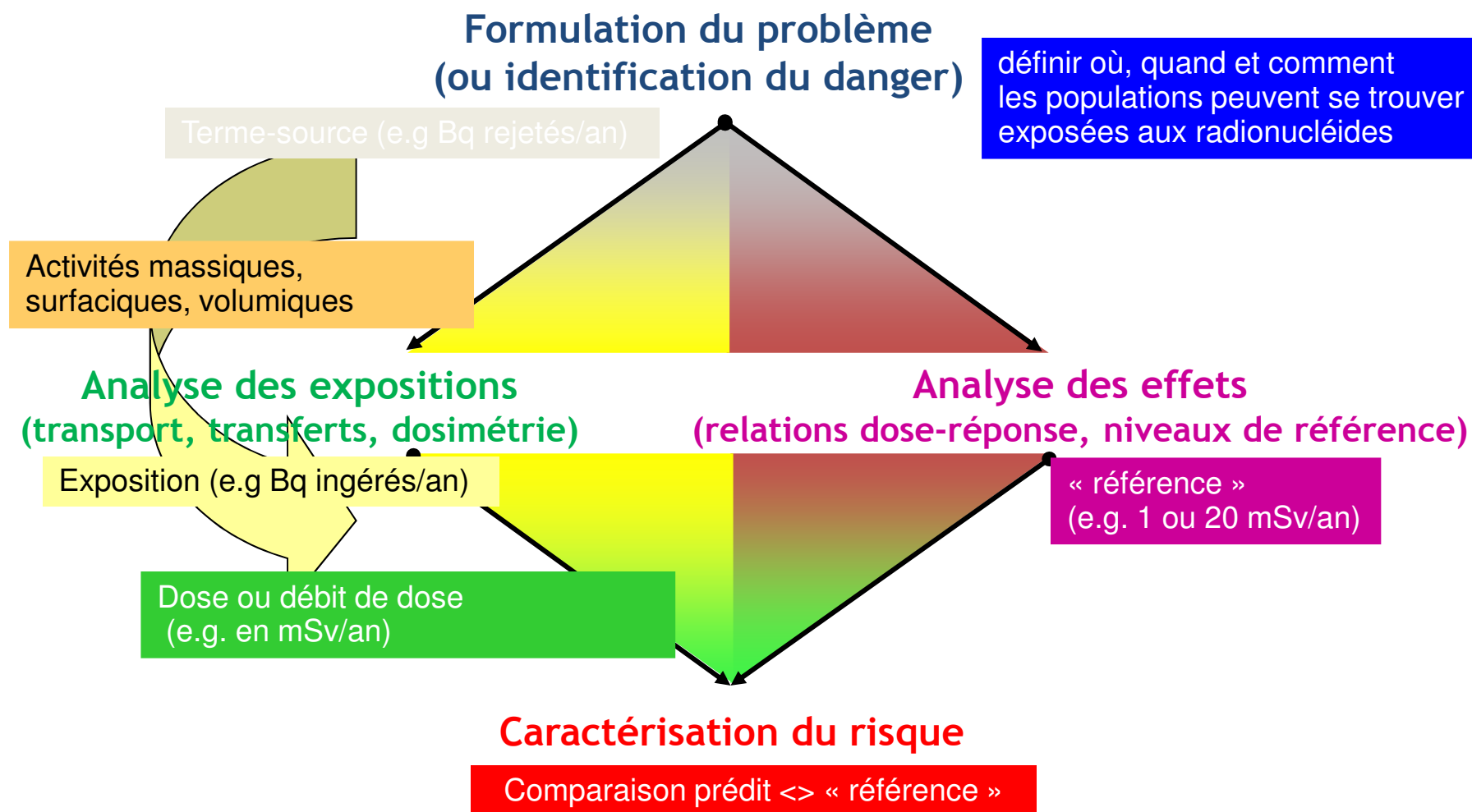
Des perspectives

Pour alimenter les outils d'aide à la décision et d'évaluation d'impact dosimétrique

Voies de transfert : Rejets radioactifs gazeux



Contexte de l'évaluation des risques



Les ordres de grandeurs de la dose efficace

- 10 mSv



Scanner abdomino-pelvien

- 3,8 mSv/an



Exposition moyenne aux rayonnements en F.

- 1 mSv/an



Limite annuelle d'exposition au public

- 0,05 mSv



Radio des poumons

- 0,03 mSv



Vol Paris - New York

- 0,01 mSv/an



Voisinage d'une installation nucléaire

Codes de calcul en radioécologie - domaine d'application








■ Nature et objectif des calculs

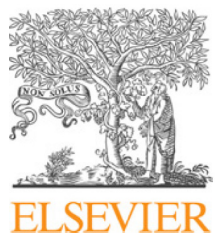
- **Simulation** du transport/transfert des radionucléides dans l'environnement
 - Transport = phénomènes physiques (e.g. dispersion atmosphérique)
 - Transferts = phénomènes bio-géo-chimiques
 - Activités massiques, volumiques, surfaciques (Bq/kg, Bq/m²...)
- **Evaluation** de l'impact dosimétrique à l'homme
 - Débits de dose (Sv/an...)
 - Doses (Sv)

■ Scenarios

- Fonctionnement **normal**, incidentel ou **accidentel** d'installations nucléaires
- **Multi-rejets** : atmosphérique, aquatique fluvial et marin
- **Multi-milieus** : atmosphérique, fluvial, marin, agricole, et interfaces
- **Multi-expositions** :
 - Irradiation externe : immersion panache, exposition aux dépôts
 - Contamination interne : inhalation (panache et remise en suspension), ingestion (boisson, aliments, accidentelle)

Matrice de transfert (impact homme)

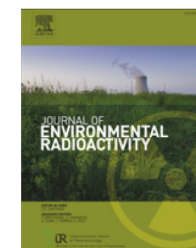
SOURCE 	Rejet atmo	Rejet fluvial	Rejet marin			
	ATMO 	Dépôts	Dépôts	Dépôts		Inhalation externe
		FLUVIAL 		Abreuvement Irrigation	Prélèvement	Inhalation externe
			MARIN 		Prélèvement	Inhalation externe Ingestion acc.
				AGRICOLE 	Prélèvement	Inhalation externe
					ALIMENT 	Ingestion
						DOSE HOMME 



Contents lists available at [SciVerse ScienceDirect](http://SciVerse.Sciencedirect.com)

Journal of Environmental Radioactivity

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jenvrad



Short communication

An invitation to contribute to a strategic research agenda in radioecology

T.G. Hinton^{a,*}, J. Garnier-Laplace^a, H. Vandenhove^b, M. Dowdall^c, C. Adam-Guillermin^a, F. Alonzo^a, C. Barnett^d, K. Beaugelin-Seiller^a, N.A. Beresford^d, C. Bradshaw^e, J. Brown^c, F. Eyrolle^a, L. Fevrier^a, J.-C. Gariel^a, R. Gilbin^a, T. Hertel-Aas^f, N. Horemans^b, B.J. Howard^d, T. Ikäheimonen^g, J.C. Mora^h, D. Oughton^f, A. Real^h, B. Salbu^f, M. Simon-Cornu^a, M. Steinerⁱ, L. Sweeck^b, J. Vives i Batlle^b

^a French Institute of Radiation Protection and Nuclear Safety (IRSN), Bat 159, BP 3, 13115 Saint-Paul-Lez-Durance, France

^b Belgian Nuclear Research Centre (SCK•CEN), Belgium

^c Norwegian Radiation Protection Authority (NRPA), Norway

^d Natural Environment Research Council (NERC), United Kingdom

^e Stockholm University (SU), Sweden

^f Norwegian University of Life Sciences (UMB), Norway

^g Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK), Finland

^h Research Centre in Energy, Environment and Technology (CIEMAT), Spain

ⁱ German Federal Office for Radiation Protection (BfS), Germany

2.1.2. Acquire the data necessary for parameterisation of the key processes controlling the transfer of radionuclides



ELSEVIER

Short communi

An invitatic

T.G. Hinton^{a,*},
C. Barnett^d, K.
J.-C. Gariel^a, R.
D. Oughton^f, A.

^a French Institute of Radi

^b Belgian Nuclear Resear

^c Norwegian Radiation Pr

^d Natural Environment R

^e Stockholm University (S

^f Norwegian University o

^g Radiation and Nuclear .

^h Research Centre in Ene

ⁱ German Federal Office f

The data for model parameterization will require laboratory-based research and field studies, as well as ongoing reviews of published information from the larger scientific community. Scarcity of data is one of the major sources of uncertainty, even for the simplest equilibrium models. Recently, the IAEA made a compilation of parameter values for estimating radionuclide transfers and found major data gaps (IAEA, 2009). For numerous elements, soil-to-plant transfer factors were available for only 10% of the plant and soil group combinations. The scarcity of data increases with trophic level and stages in the human food chain. For approximately 50% of the required radionuclide-animal product combinations, no transfer coefficient data were available (IAEA, 2009).

There is also a need to consider alternative approaches to address this problem. The wide range of radionuclides, human foodstuffs and (especially) species of wildlife means that, pragmatically, we may never be in the position of having empirical data for everything. Some approaches to extrapolate data have been suggested for application across species such as phylogeny (i.e., using 'common ancestry' to categorise transfer) and allometric (mass dependent) relationships, as well as extrapolating across the periodic table using chemical analogues. Other approaches, such as Bayesian statistics, allow a low number of empirical observations to be supported by inferences from more comprehensive, larger datasets.



ZO^a,
er^a,
h,

Intention for launching Radioecology research working group (02 February 2015)

Title and acronym: Human Food Chain

Leadership

Nick Beresford (NERC-CEH, UK)

Bayesian statistics

In recent years, the use of probabilistic modelling has generated a substantial interest in **deriving more robust parameter values for modelling purposes**. In particular, Bayesian methods offer modellers and decision-makers options when faced with a **lack of knowledge and data**.

The Bayesian Theorem provides a method for modification of probability in the light of new evidence. It allows for **both prior knowledge (e.g. generic data) and site-or study specific empirical data** to be used. In a food dose assessment model, the use of Bayesian networks could **aid the separation of uncertainty and variability in model parameters**. Linked to this, the second task will explore how Bayesian statistics can **improve the parameterisation of models**. Bayesian statistics will be used to **estimate probability distributions of transfer parameters** and it will also address **how we can pool site-specific and generic data**.

Apport de l'inférence bayésienne à la caractérisation des incertitudes dans la modélisation des transferts de polluants radioactifs dans l'environnement

Des attentes

Des avancées :

➤ Thèse de Moustapha Sy sur la voie foliaire (situation accidentelle)

➤ Travaux de Nicoulaud *et al.* sur la sorption/désorption dans les sols

Des perspectives

Pour alimenter les outils d'aide à la décision et d'évaluation d'impact dosimétrique

Thèse de doctorat de Mouhamadou Moustapha Sy

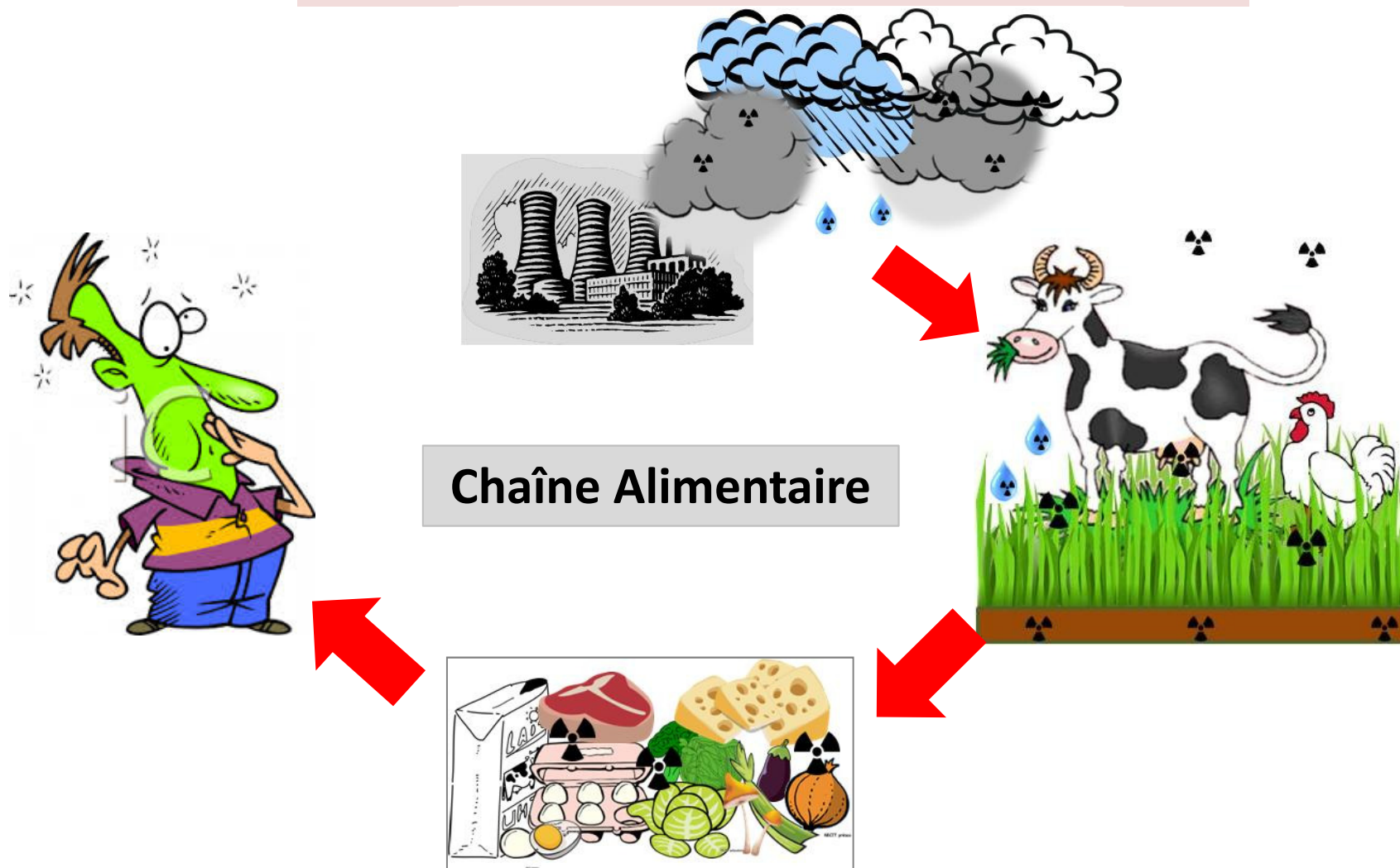
Analyse d'incertitude en situation accidentelle

Transfert de radionucléides dans l'environnement et
évaluation de l'exposition humaine par voie alimentaire

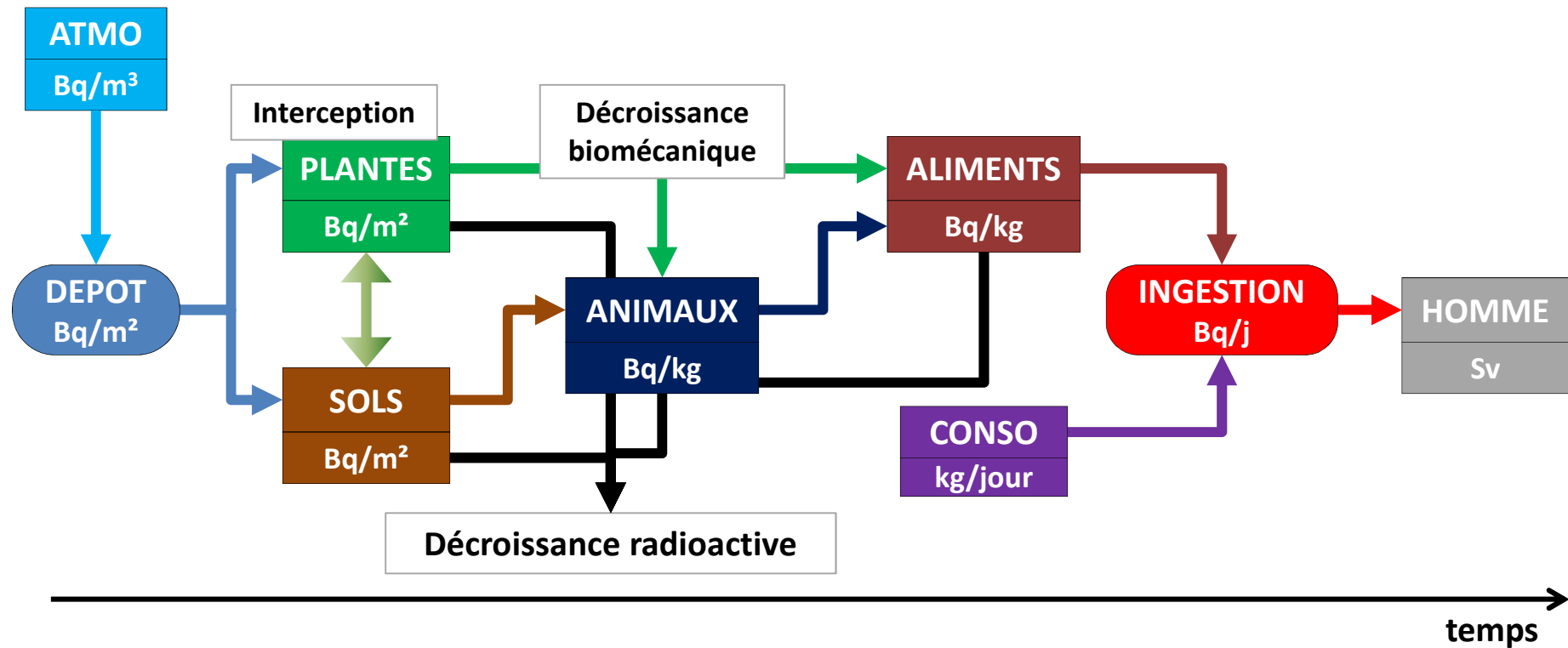


Analyse d'incertitude en situation accidentelle

Transfert de radionucléides dans l'environnement et évaluation de l'exposition humaine par voie alimentaire

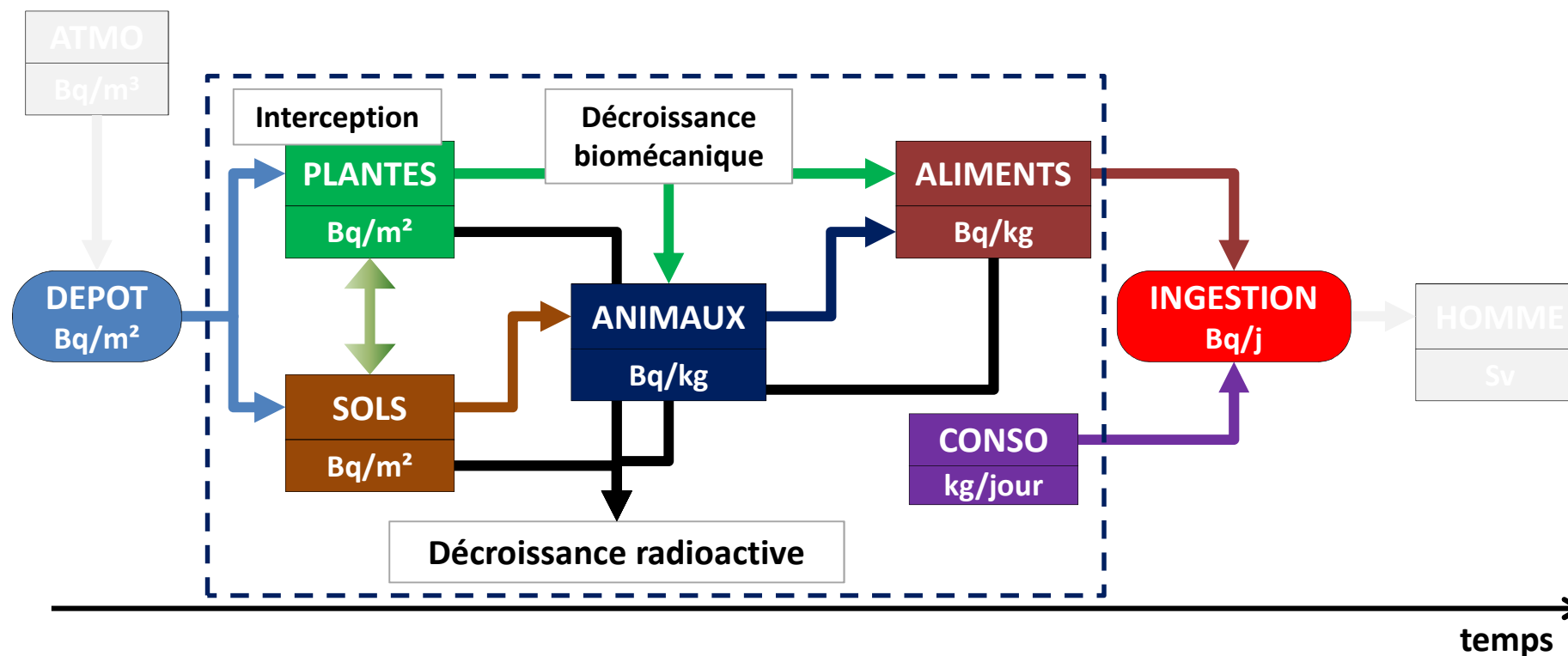


Analyse d'incertitude en situation accidentelle
Transfert de radionucléides dans l'environnement et
évaluation de l'exposition humaine par voie alimentaire

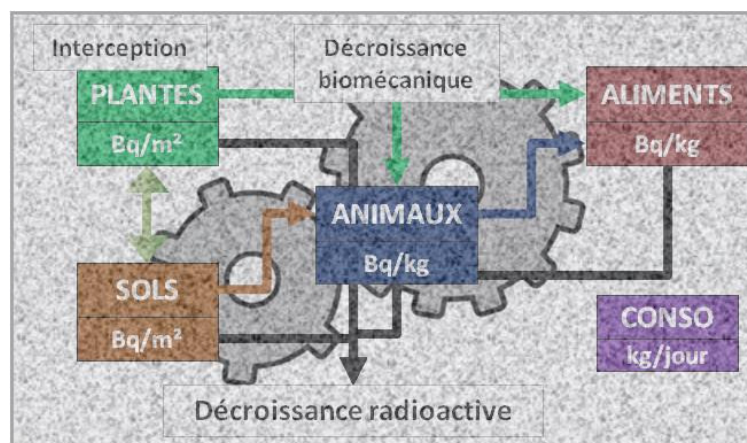
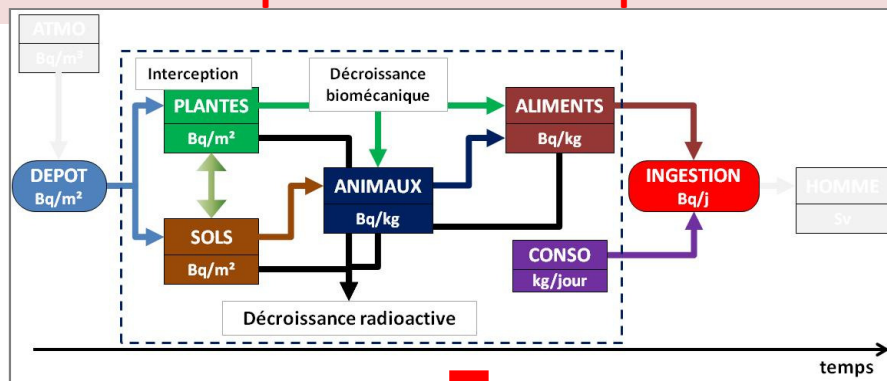


Analyse d'incertitude en situation accidentelle

Transfert de radionucléides dans l'environnement et évaluation de l'exposition humaine par voie alimentaire



Analyse d'incertitude en situation accidentelle
Transfert de radionucléides dans l'environnement et
évaluation de l'exposition humaine par voie alimentaire



Analyse d'incertitude en situation accidentelle

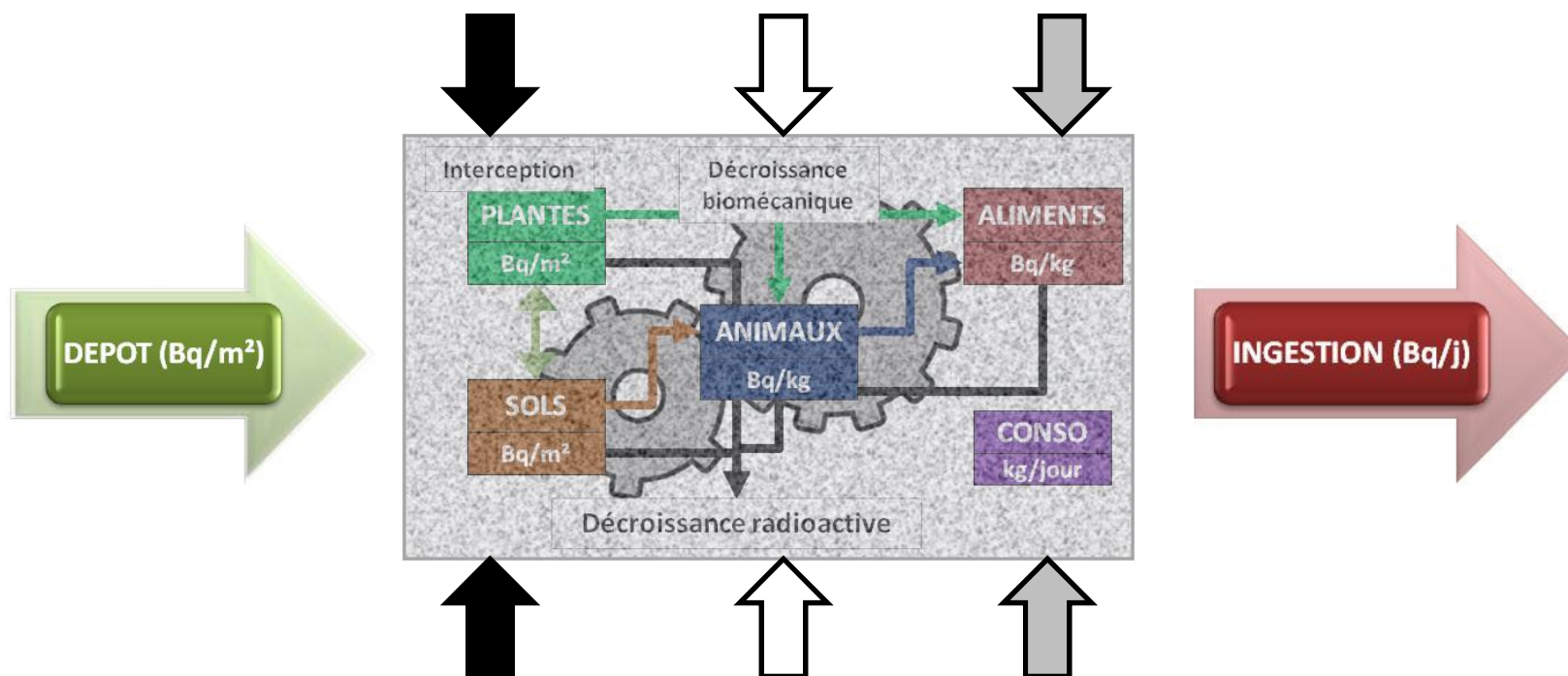
Transfert de radionucléides dans l'environnement et évaluation de l'exposition humaine par voie alimentaire

- Processus de transfert
- Activités Humaines



Incertitudes

Incertitude
Variabilité



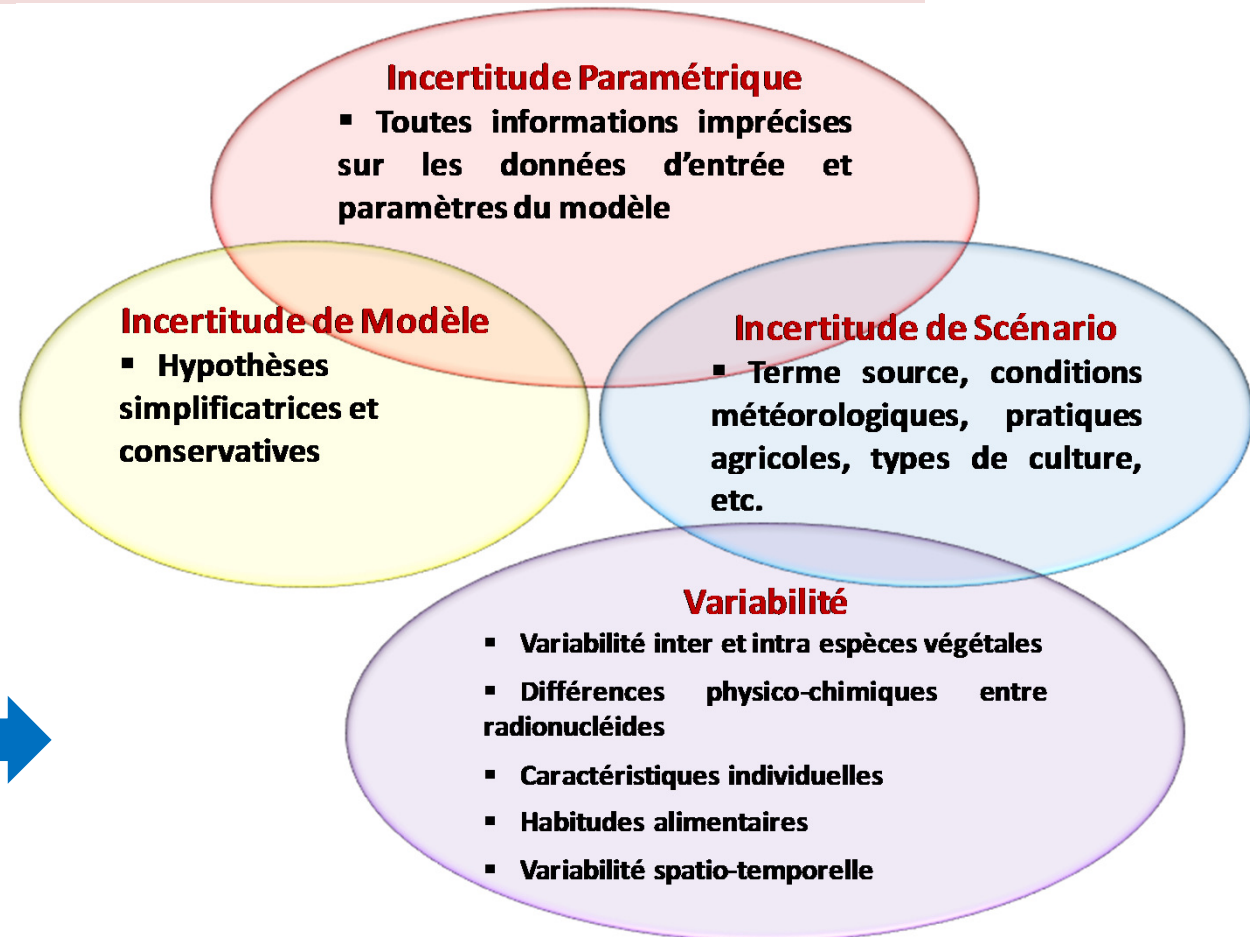
Analyse d'incertitude en situation accidentelle

Transfert de radionucléides dans l'environnement et évaluation de l'exposition humaine par voie alimentaire

Incertitude



Variabilité



Problématique

Paramètres et Hypothèses à retenir ?

Aide à la décision post-accidentelle en avenir **incertain** dans le cadre des évaluations prédictives des conséquences radiologiques et dosimétriques d'une exposition accidentelle des populations.



- **Incertitude sur les paramètres contextuels**

ex: Terme source (Bedwell *et al.* 2015)

- **Incertitude sur les paramètres radioécologiques**

ex: Transfert par la voie foliaire. Un facteur 4 a été trouvé dans le cadre d'une étude menée sur un scénario accidentel hypothétique (Sy *et al.* Soumis)

→ **Importante incertitude sur les doses par ingestion prédites**

Nécessité de développer/d'améliorer les outils d'aide à la décision
→ Prise en compte de l'incertain dans les évaluations de l'exposition humaine par ingestion de denrées contaminées.

Problématique

Paramètres et Hypothèses à retenir ?

Aide à la décision post-accidentelle en avenir **incertain** dans le cadre des évaluations prédictives des conséquences radiologiques et dosimétriques d'une exposition accidentelle des populations.



- **Incertitude sur les paramètres contextuels**

ex: Terme source (Bedwell *et al.* 2015)

- **Incertitude sur les paramètres radioécologiques**

ex: Transfert par la voie foliaire. Un facteur 4 a été trouvé dans le cadre d'une étude menée sur un scénario accidentel hypothétique (Sy *et al.* Soumis)

→ **Importante incertitude sur les doses par ingestion prédites**

Nécessité de développer/d'améliorer les outils d'aide à la décision

→ **Prise en compte de l'incertain dans les évaluations de l'exposition humaine par ingestion de denrées contaminées.**

Objectif

Développer une méthodologie d'analyse des incertitudes pour l'évaluation des risques alimentaires en situation (post-) accidentelle.

- Affiner la détermination des paramètres radioécologiques décrivant les mécanismes de transfert de radionucléides dans l'environnement
- Identifier les processus clés de transfert de radionucléides en situation accidentelle
- Enrichir les connaissances sur les paramètres radioécologiques et contextuels
- Améliorer la prise en compte des incertitudes sur ces paramètres

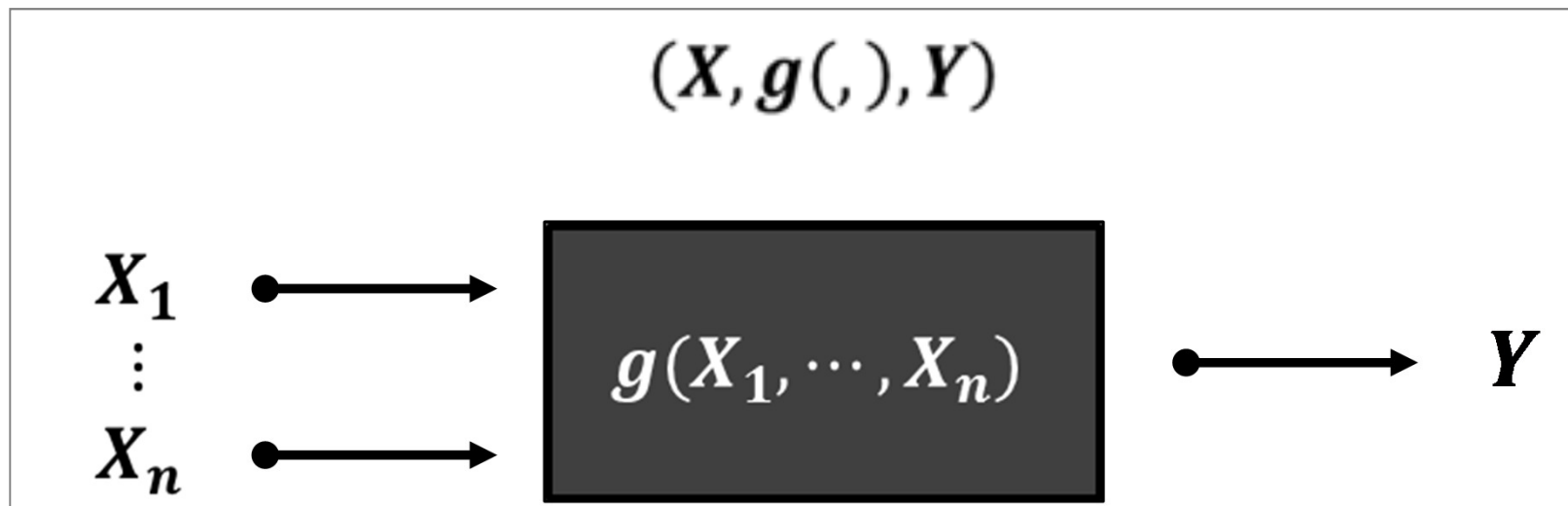
Alimenter les outils d'aide à la décision et d'évaluation d'impact dosimétrique développés à l'IRSN

Objectif

Développer une méthodologie d'analyse des incertitudes pour l'évaluation des risques alimentaires en situation (post-) accidentelle.

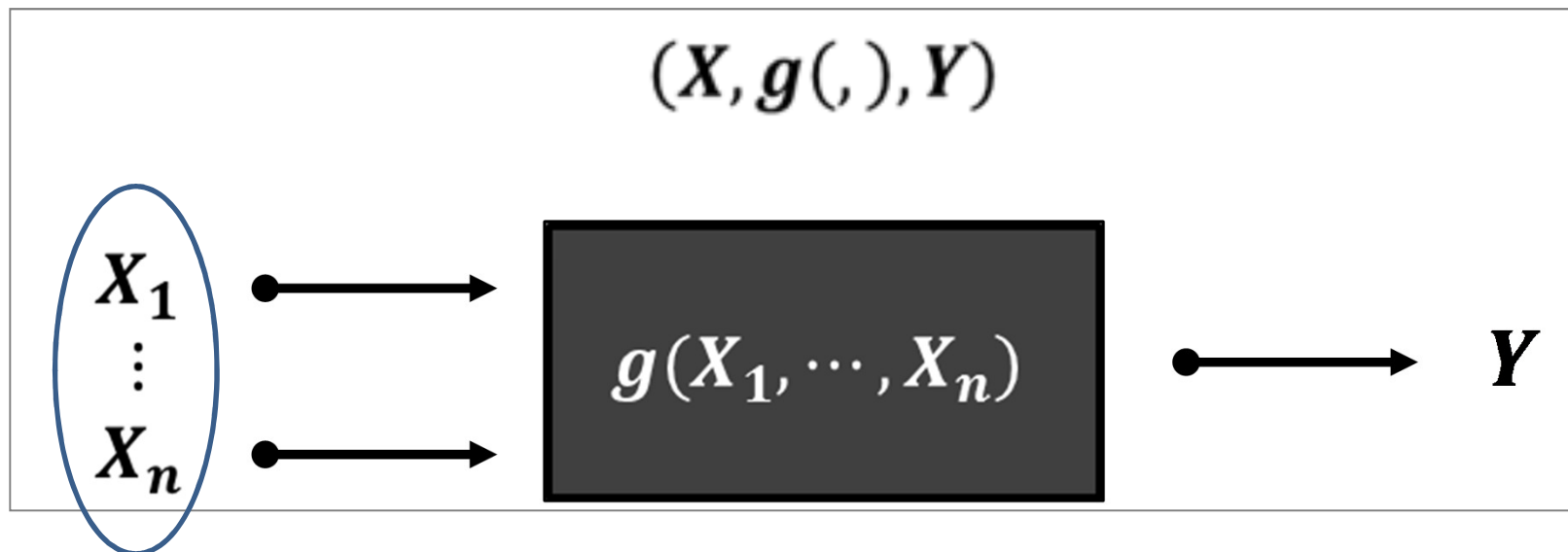
- Affiner la détermination des paramètres radioécologiques décrivant les mécanismes de transfert de radionucléides dans l'environnement
- Identifier les processus clés de transfert de radionucléides en situation accidentelle
- Enrichir les connaissances sur les paramètres radioécologiques et contextuels
- Améliorer la prise en compte des incertitudes sur ces paramètres

Modèle \approx triplet $(X, g(\cdot), Y)$ combinant une fonction $g(\cdot, \cdot)$ représentant la structure mathématique, un ensemble de paramètres d'entrée X_1, \dots, X_n et une ou plusieurs sorties Y .



Proposer une représentation mathématique de l'imprécision ou du manque de connaissances exactes sur les valeurs d'un paramètre

Modèle \approx triplet $(X, g(\cdot), Y)$ combinant une fonction $g(\cdot, \cdot)$ représentant la structure mathématique, un ensemble de paramètres d'entrée X_1, \dots, X_n et une ou plusieurs sorties Y .



Proposer une représentation mathématique de l'imprécision ou du manque de connaissances exactes sur les valeurs d'un paramètre

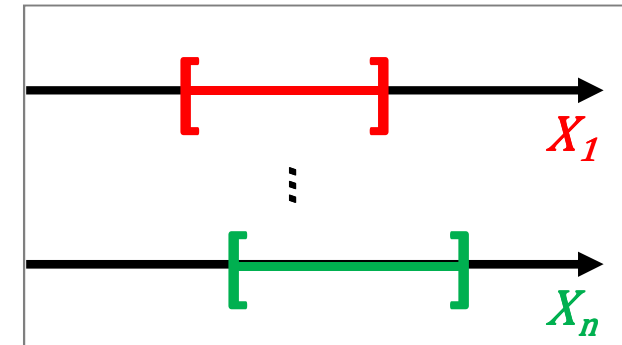
Proposer une représentation mathématique de l'imprécision ou du manque de connaissances exactes sur les valeurs d'un paramètre

Selon la **nature** et la « **quantité** » de l'information disponible
 → Différentes approches peuvent être envisagées

▪ Intervalles

Lorsque l'on connaît le domaine de variation du paramètre

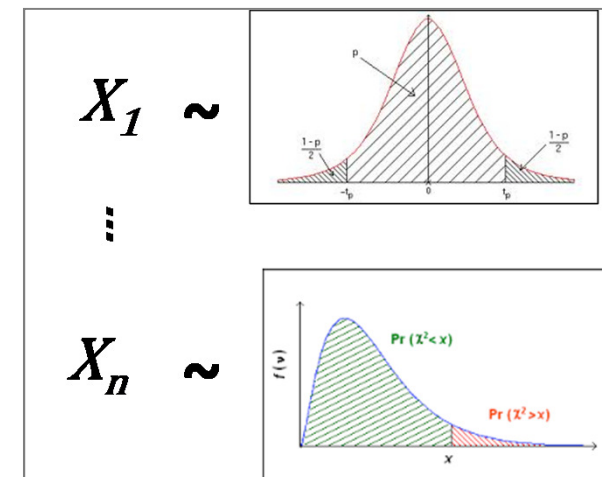
→ Représenter par un intervalle **[min , max]**



▪ Approche probabiliste

Lorsque l'on connaît la loi de probabilité exacte de chaque paramètre ou que l'on peut l'estimer par inférence statistique

→ Chaque paramètre est une **V.A.** représentée par sa **distribution de probabilité.**



❑ Intérêt cadre probabiliste

- Flexibilité dans la modélisation de problèmes complexes (utilisation du conditionnement)
- Cadre théorique et axiomatique bien établis
- Représentation cohérente de l'incertitude
- Outils performants pour la modélisation du risque (calcul probabiliste)

❑ Objectif

Déterminer, pour chaque paramètre incertain, la **distribution de probabilité** caractérisant l'incertitude sur les valeurs du paramètre.

❑ Méthodologie

Méta-analyse de **données** issues de la littérature scientifique reposant sur une **modélisation hiérarchique** des paramètres d'intérêt et une calibration des modèles par **inférence bayésienne**.

Inférence bayésienne

❖ Paradigme bayésien

L'art de mélanger les couleurs ?

Connaissance *a priori* & Observations → Connaissance *a posteriori*

❖ Contexte paramétrique

$p(\theta)$ distribution *a priori* du paramètre d'intérêt inconnu θ

$p(X|\theta)$ la loi des données observées $X = (X_1, \dots, X_N)$

$p(\theta|X)$ distribution *a posteriori*

Th. Bayes
Prob. Conditionnelles

$$p(\theta|X) = \frac{p(X|\theta)p(\theta)}{p(X)} = \frac{p(X|\theta)p(\theta)}{\int p(X|\theta)p(\theta)d\theta}$$

❖ Calcul de la distribution *a posteriori* : Algorithmes MCMC

❖ Intérêt Inférence bayésienne

▪ Performante

- ✓ Inférence des modèles hiérarchiques
- ✓ Caractérisation des incertitudes lorsque données rares et/ou incomplètes

▪ Caractère relativement « innovant » en radioécologie

Modélisation hiérarchique

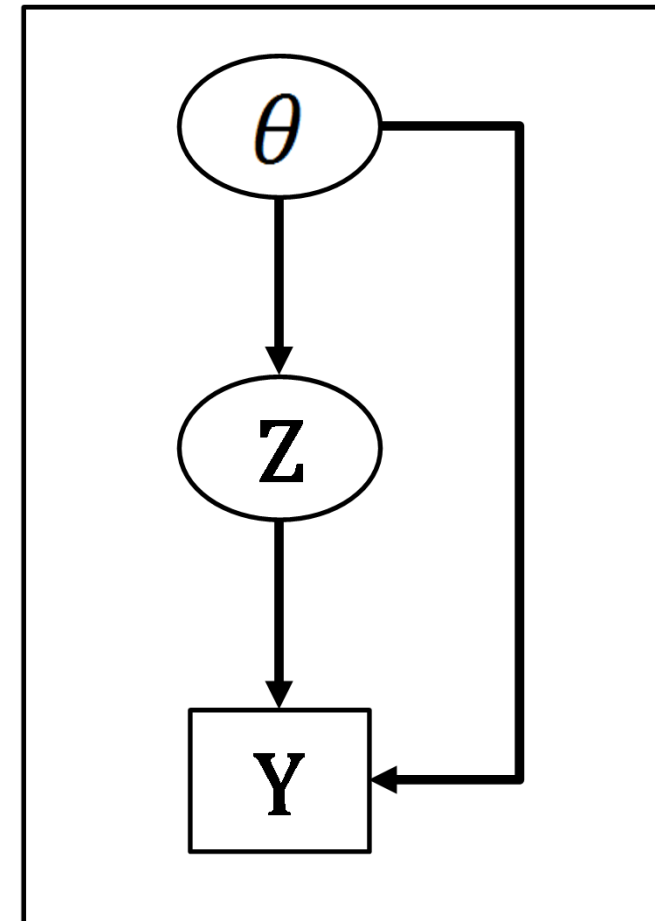
La **modélisation hiérarchique** repose sur le développement de **relations stochastiques multi-niveaux** permettant de saisir les composantes importantes des phénomènes étudiés.



- **Décomposition du problème**

- Réduction de la complexité.
- Caractériser les processus sous-jacents que l'on a du mal à modéliser spécifiquement.

- La **structure hiérarchique** des modèles a pour but de caractériser l'**incertitude** sur les valeurs des **paramètres radioécologiques** et de saisir toute la **variabilité**.



Applications : Interception Foliaire

**Fraction de radionucléides déposés (temps sec ou humide)
à la surface des végétaux qui est interceptée**



- **Fixation des substances déposées** (par temps sec ou contenues dans les gouttes d'eau de pluie)
 - Caractéristiques physico-chimiques des substances.
- **Interception/rétention des gouttes d'eau de pluie**
 - Capacité de stockage d'eau de la plante.

Conditions climatiques

- Régimes pluvieux
- Evaporation
- Conditions aérodynamiques

Plantes

- Développement des plantes
- Rugosité des feuilles
- Structure des feuilles/tiges

Substances

- Type de substances
- Forme physico-chimique

Applications : Interception Foliaire

**Fraction de radionucléides déposés (temps sec ou humide)
à la surface des végétaux qui est interceptée**



- ❑ **Paramètre radioécologique important** dans l'évaluation de l'exposition des populations humaines en situation accidentelle (via la chaîne alimentaire)
- ❑ **Attentes soulevées** concernant
 - Caractérisation de l'incertitude sur ce paramètre (TRS472)
 - Enrichissement de la base de données probabiliste de SYMBIOSE



Réel besoin de **caractériser l'incertitude** sur les valeurs du paramètre d'**interception**

Applications : Interception Foliaire

**Fraction de radionucléides déposés (temps sec ou humide)
à la surface des végétaux qui est interceptée**



- **Facteur d'interception f (-)**

$$f = \frac{\text{Dépôt}_{veg} \text{ (Bq m}^{-2}\text{)}}{\text{Dépôt}_{Sol+veg} \text{ (Bq m}^{-2}\text{)}}$$

- **Facteur d'interception massique f_B (m²/kg)**

$$f_B = \frac{f}{\text{Biomasse} \text{ (kg m}^{-2}\text{)}}$$

- **Facteur d'interception normalisé par le LAI f_{LAI} (m²/m²)**

$$f_{LAI} = \frac{f}{\text{LAI} \text{ (m}^2 \cdot \text{m}^{-2}\text{)}}$$

Revue étendue de la littérature scientifique

- Références couvrant plusieurs décennies et une large variété d'éléments, d'espèces végétales

☐ Interception Sèche

145 données

(f, B)

f = facteur d'interception défini entre 0 et 1

B = Biomasse fraîche (kg/m²)

6 éléments

Argent, Baryum, Césium, Iode gazeux,
Strontium et Tellure

5 espèces végétales

Herbe, Salade, feuilles de Haricot, de
Radis et de Pomme de terre

☐ Interception Humide

363 données

(f, B, H, I)

f = facteur d'interception défini entre 0 et 1

B = Biomasse sèche (kg/m²)

H = Hauteur de pluie (mm)

I = Intensité de pluie (mm/h)

Large variété de substances

Eau, Anion, Cations (monovalent et
divalent), Particules de polystyrène

3 espèces végétales

Herbe, Trèfle et Mauvaises herbes

Applications : Interception Foliaire

☐ Interception Sèche

Régression non-linéaire (Chadwick et Chamberlain, 1970)

$$f = 1 - \exp(-\mu * B)$$

B (kg/m²) : Biomasse
lode / Autres substances

☐ Interception Humide

Régression Linéaire (Hoffman *et al.*, 1989,1992)

$$f = \min \left\{ 1, f_0 \times H^\alpha \times B^\beta \times I^\gamma \right\}$$

H (mm): Hauteur de pluie
 I (mm h⁻¹): Intensité de la pluie
 B (kg dw m⁻²) : Biomasse sèche
 lode / cations / particules (~µm)

Applications : Interception Foliaire

☐ Interception Sèche

Régression non-linéaire (Chadwick et Chamberlain, 1970)

$$f = 1 - \exp(-\mu * B)$$

B (kg/m²) : Biomasse
lode / Autres substances

☐ Interception Humide

Régression Linéaire (Hoffman *et al.*, 1989,1992)

$$f = \min \left\{ 1, \frac{LAI \times L \times k}{H} \right\}$$

H (mm)
 L (mm)
 B (kg)
lode

Ecosys-87 (RODOS)

(Müller & Pröhl, 1990, 1993)

$$f = \min \left\{ 1, \frac{LAI \times L \times k}{H} \times \left[1 - \exp \left(-\frac{\ln(2)}{3} \times \frac{H}{L \times k} \right) \right] \right\}$$

LAI (m².m⁻²): Indice de surface foliaire

L (mm): Epaisseur max. film d'eau sur les feuilles

k (-): Affinité chimique de la substance

lode / Cations monovalents / Cations Divalent

Applications : Interception Foliaire

❑ Interception Sèche

Régression non-linéaire (Chadwick et Chamberlain, 1970)

$$f = 1 - \exp(-\mu * B)$$

B (kg/m²) : Biomasse
Iode / Autres substances

❑ Interception Humide

Régression Linéaire (Hoffman *et al.*, 1989,1992)

$$f = \min\left\{1, \frac{LAI \times L \times k}{H}\right\}$$

H (mm)
 L (mm)
 B (kg Iode)

Ecosys-87 (RODOS)

(Müller & Pröhl, 1990, 1993)

$$f = \min\left\{1, \frac{LAI \times L \times k}{H} \times \left[1 - \exp\left(-\frac{\ln(2)}{3} \times \frac{H}{L \times k}\right)\right]\right\}$$

LAI (m².m⁻²): Indice de surface foliaire
 L (mm): Epaisseur max. film d'eau sur les feuilles
 k (-): Affinité chimique de la substance
Iode / Cations monovalents / Cations Divalent



SYMBIOSE (Calmon *et al.*, 2009)

$$f = f(H)$$

Iode / Autres substances

Interception Sèche

$$f^* = \text{logit}(A \times (1 - \exp^{-G \times B})) + \varepsilon$$

$$F_{ijk}^* = \mu_{ijk} + \epsilon_{ijk}$$

$$\mu_{ijk} = \text{logit}\left(A_i \times \left(1 - \exp^{-G_j \times \widetilde{B}_{ijk}}\right)\right)$$

$$\widetilde{B}_{ijk} = \frac{B_{ijk}}{DMC}$$

$$\epsilon_{ijk} \sim \text{i.i.d } N(0, S^2)$$

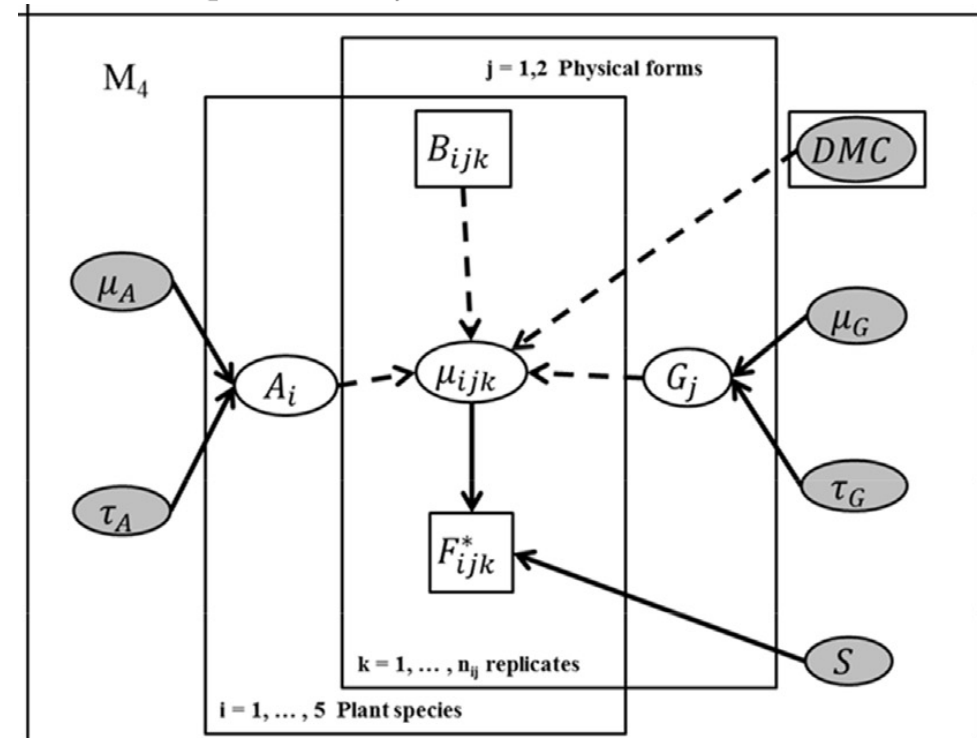
$$A_i \sim \text{i.i.d } \text{Beta}(\mu_A \times \tau_A, (1 - \mu_A) \times \tau_A)$$

$$G_j \sim \text{i.i.d } \text{Gamma}(\mu_G \times \tau_G, \tau_G)$$

$i = 1, \dots, 5$ plantes

$j = 1, 2$ formes physiques

$k = 1, \dots, n_{ij}$ répliques



- M_1 Pas variabilité plante-spécifique
Pas variabilité élément-spécifique

- M_3 Pas variabilité plante-spécifique
Variabilité élément-spécifique

- M_2 Variabilité plante-spécifique
Pas de variabilité élément-spécifique

- M_4 Variabilité plante-spécifique
Variabilité élément-spécifique

☐ Interception Sèche

Applications : Interception Foliaire

Models	Dbar	pD	DIC
M ₁	279.3	3.1	282.4
M ₂	278.9	3.7	282.6
M₃	245.9	4.1	250.0
M₄	242.9	5.5	248.4

Critère de qualité d'ajustement.

Models	PPLC* (-)	Coverage Ratio (in %)	Average Width 95%CI (-)
M ₁	89.42	96.55	2.52
M ₂	90.12	96.55	2.52
M₃	71.51	97.24	2.26
M₄	70.32	97.24	2.23

Critères d'évaluation des performances prédictives.
Calculés à partir de la validation croisée.

M₃ meilleur modèle



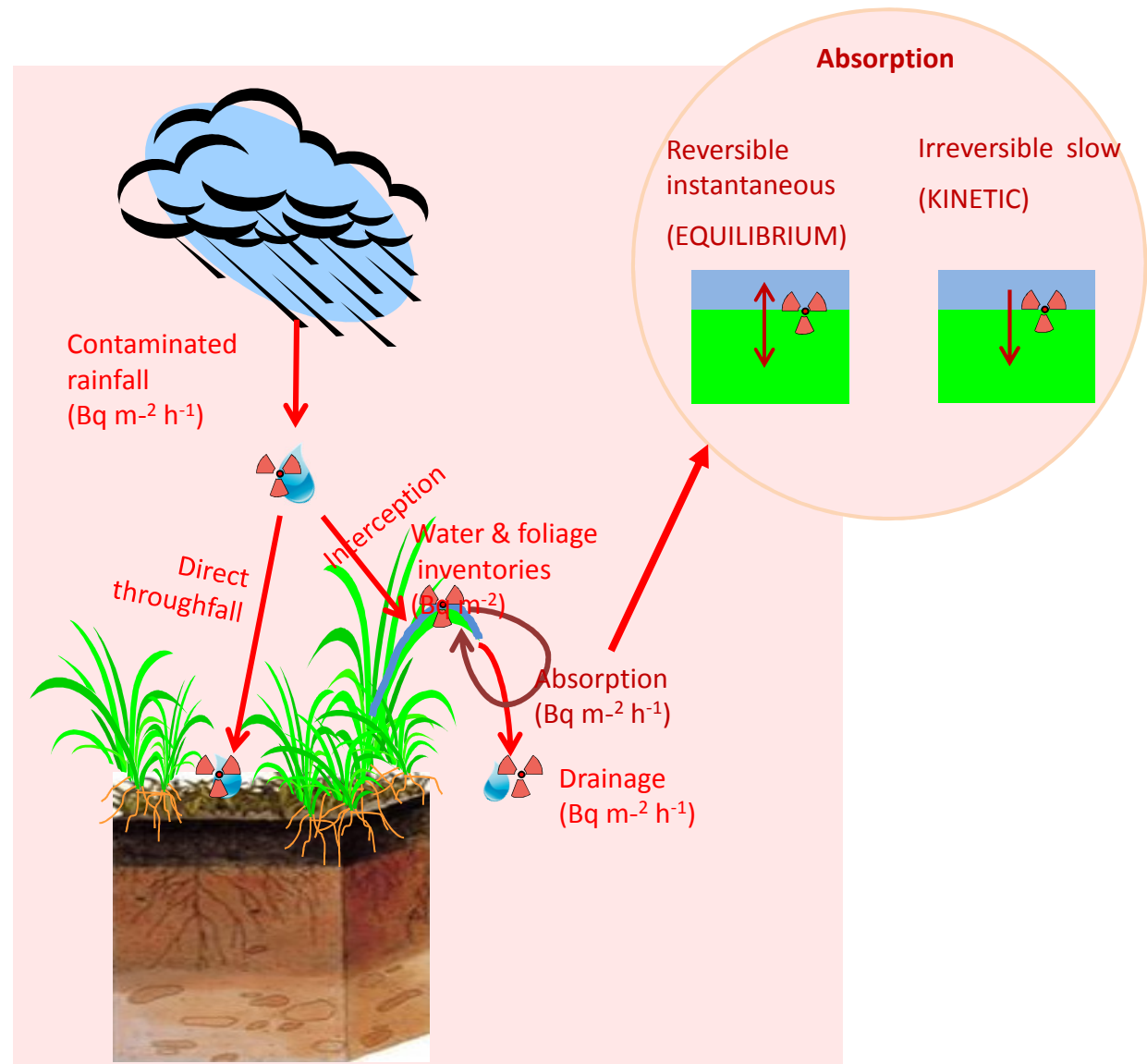
× **Même interception maximale pour toutes plantes**

✓ **Différence Iode gazeux vs autres particules**

☐ Interception Humide

Applications : Interception Foliaire

- 1 modèle empirique
- 2 modèles semi-mécanistes



☐ Interception Humide

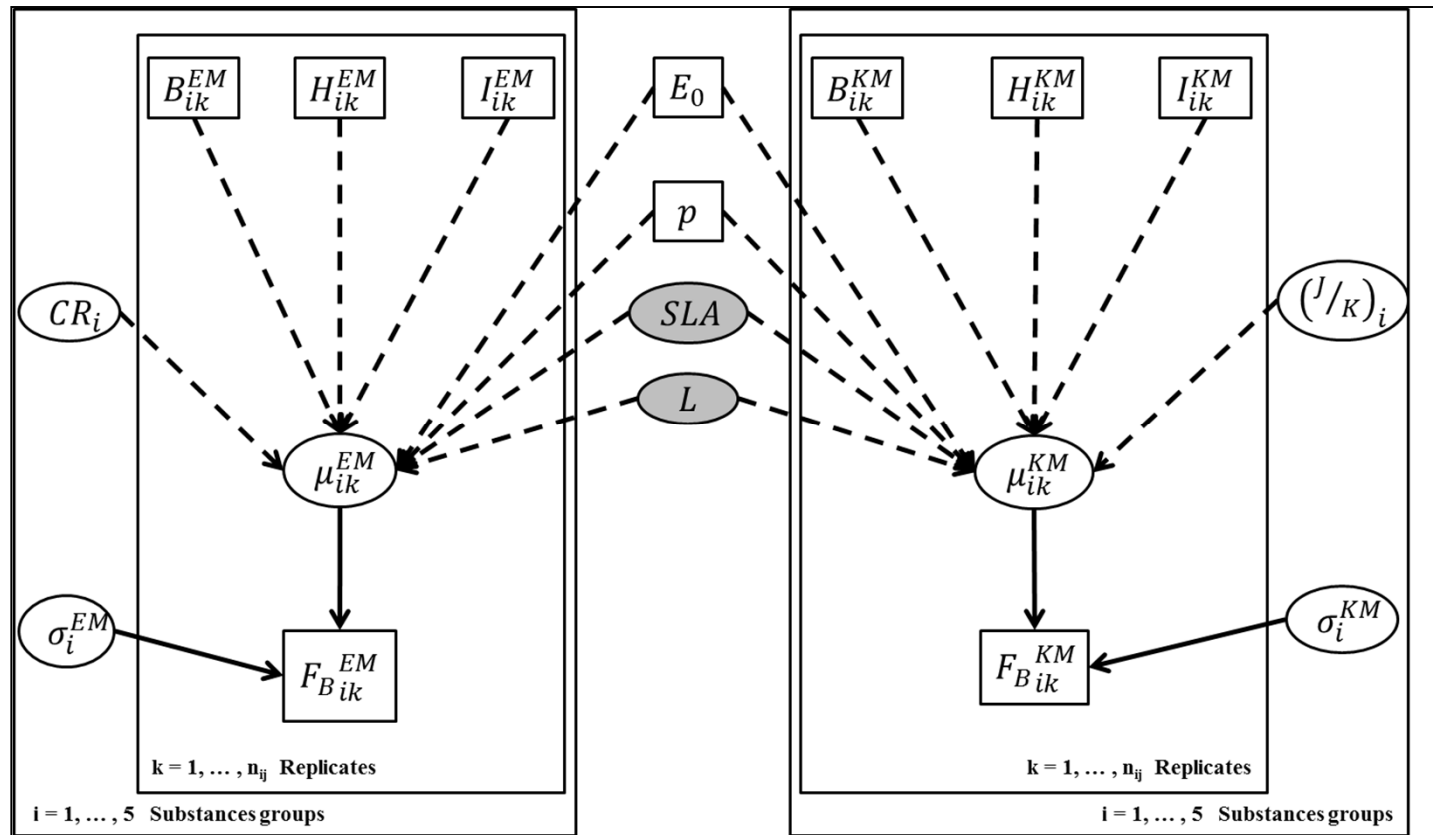
Applications : Interception Foliaire

$$f_B \approx \begin{cases} \frac{1-p}{B} & \text{si } T \leq T_s \\ \frac{1-p}{B \times T \times \lambda} \left[\frac{D_s}{SLA \times B \times L} \times T_s + \frac{\alpha}{SLA \times B \times L} \times T + \left(\frac{D_s}{\alpha + D_s} - \frac{D_s}{\alpha + (1-p) \times I} \right) \times (1 - e^{(-\lambda \times (T - T_s))}) \right] & \text{si } T > T_s \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_s \approx \frac{SLA \times B \times L}{(1-p) \times I} \quad : \text{ Temps de saturation en eau (h)} \\ \alpha = \frac{J}{K} \times LAI \quad : \text{ Vitesse d'absorption efficace (mm/h)} \\ D_s = (1-p) \times I - E_0 \quad : \text{ Vitesse de drainage (mm/h)} \\ \lambda = \frac{\alpha + D_s}{LAI \times L} \quad : \text{ Taux de drainage (h}^{-1}\text{)} \end{array} \right.$$

Interception Humide

Applications : Interception Foliaire



- Deux approches du mécanisme d'absorption proposées
- Estimation simultanée des paramètres SLA et L
- Variabilité spécifique à la valence de l'élément
→ 8 modèles (4 par approche)

☐ Interception Humide

Applications : Interception Foliaire

Modèle	Hypothesis on <i>CR</i> or <i>J/K</i>	PPLC
Cinétique	Cs ≠ Be/Sr ≠ Poly	37.01
	Poly = Be/Sr	38.34
	Cs = Be/Sr	40.21
	Poly = Cs = Be/Sr	42.59
Equilibre	Cs ≠ Be/Sr ≠ Poly	62.04
	Poly = Be/Sr	62.31
	Cs = Be/Sr	69.37
	Poly = Cs = Be/Sr	71.28

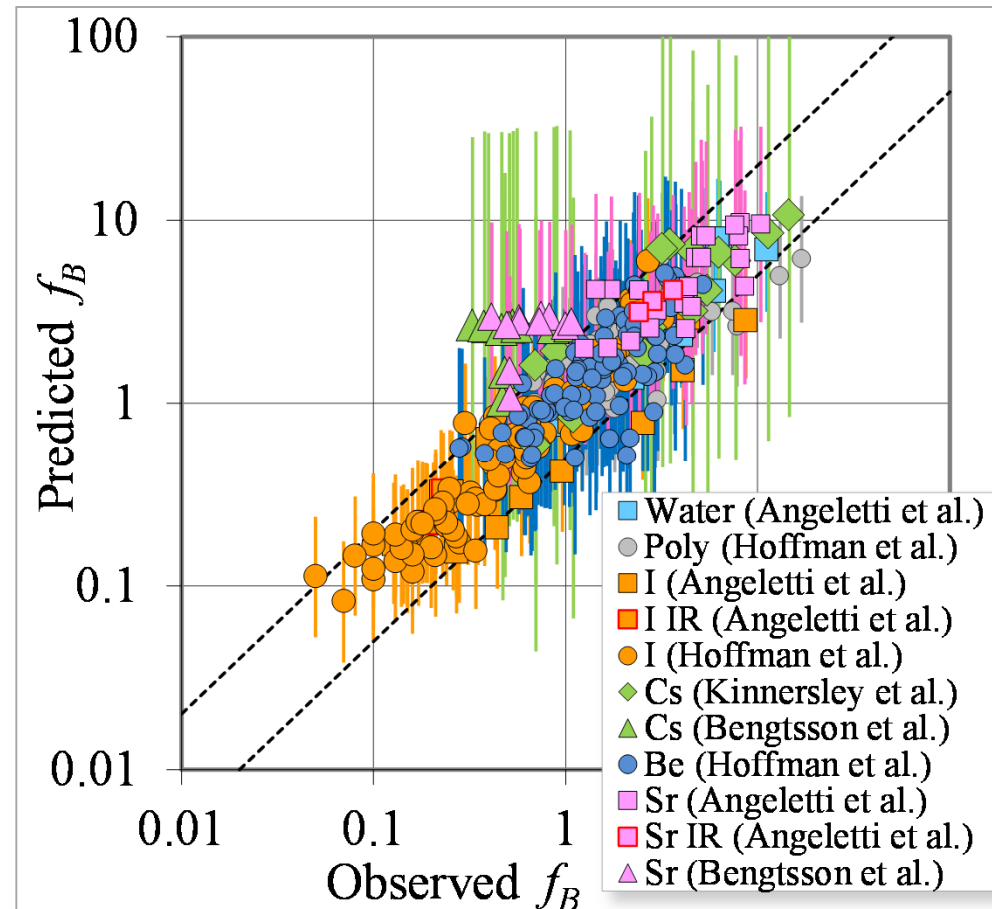
Critère d'évaluation des performances prédictives calculé à partir de la validation croisée



- **Absorption cinétique** présente de meilleurs résultats
- Variabilité due à la **charge électrique** des substances
 - Séparation entre anion et autres particules
 - Séparation entre cations divalent et monovalent
 - Séparation entre cations et particules de polystyrène

☐ Interception Humide

Applications : Interception Foliaire



- ☐ Résultats satisfaisants pour l'ensemble des substances
 - Bonne représentation de la variabilité induite par la charge électrique des substances
- ☐ Résultats moins bons pour les valeurs issues de **Bengtsson et al. (2014)**
 - Très forte intensité & durée d'exposition très courte.

Développer une méthodologie d'analyse des incertitudes pour l'évaluation des risques alimentaires en situation (post-) accidentelle.

- ❑ Quantification de l'incertitude sur les paramètres radioécologiques décrivant la voie foliaire
 - **Interception sèche et humide**
 - **Perte au champs**
- Développement de modèles hiérarchiques permettant
 - **de saisir la variabilité plante/substance-spécifique dans les processus étudiés**
 - **de comprendre plus finement les mécanismes de l'interception humide**
- Développement de modèles prédictifs adaptés à des enjeux opérationnels
- Bases de données particulièrement riches destinées à alimenter les outils d'aide à la décision en situation accidentelle (*e.g.* SYMBIOSE)
- ❑ Etude de l'impact de l'incertitude sur ces paramètres sur les sorties des modèles d'évaluation de l'exposition des populations par la voie alimentaire
 - Identification de l'influence de la voie foliaire dans le calcul d'impact dosimétrique
 - Identification de l'influence de paramètres contextuels tels que la nature des dépôts

- **Simon-Cornu M., Beaugelin-Seiller K., Boyer P., Calmon P., Garcia-Sanchez L., Mourlon C., Nicoulaud V., Sy M. M., Gonze M-A. (2015).** *Evaluating variability and uncertainty in radiological impact assessment with the probabilistic database of SYMBIOSE.* J. Environ. Radioact. 139. pp 91-102.
- **Sy M. M., Ancelet S., Henner P., Hurtevent P., Simon-Cornu M. (2015).** *Foliar interception of radionuclides in dry conditions: A meta-analysis using a Bayesian Modeling Approach.* J. Environ. Radioact. 147. pp 63-75.
- **Sy M. M., Gonze M.-A., Métivier J.M., Nicoulaud-Gouin, V., Simon-Cornu M. (2016).** *Uncertainty analysis in post-accidental risk assessment models: an application to the Fukushima accident.* *Annals of Nuclear Energy.* Sous presse.
- **Gonze M.-A., Sy M. M.,** *Interception of wet deposited atmospheric pollutants by herbaceous vegetation: Data review and modelling.* Science of the Total Environment. Sous presse
- **Sy M. M., Hosseini A., Liland A., Simon-Cornu M., Thorning H.** *Uncertainty and variability in food chain exposure by radioactive fallouts. What can Hierarchical Bayesian modelling bring to radioecology community.* J. Environ. Radioact. En cours de révision.

Apport de l'inférence bayésienne à la caractérisation des incertitudes dans la modélisation des transferts de polluants radioactifs dans l'environnement

Des attentes

Des avancées :

➤ Thèse de Moustapha Sy sur la voie foliaire (situation accidentelle)

➤ Travaux de Nicoulaud *et al.* sur la sorption/désorption dans les sols

Des perspectives

Pour alimenter les outils d'aide à la décision et d'évaluation d'impact dosimétrique

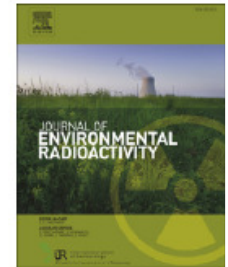


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Environmental Radioactivity

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jenvrad



Identifiability of sorption parameters in stirred flow-through reactor experiments and their identification with a Bayesian approach



V. Nicoulaud-Gouin ^{a, *}, L. Garcia-Sanchez ^b, M. Giacalone ^a, J.C. Attard ^a, A. Martin-Garin ^b, F.Y. Bois ^c

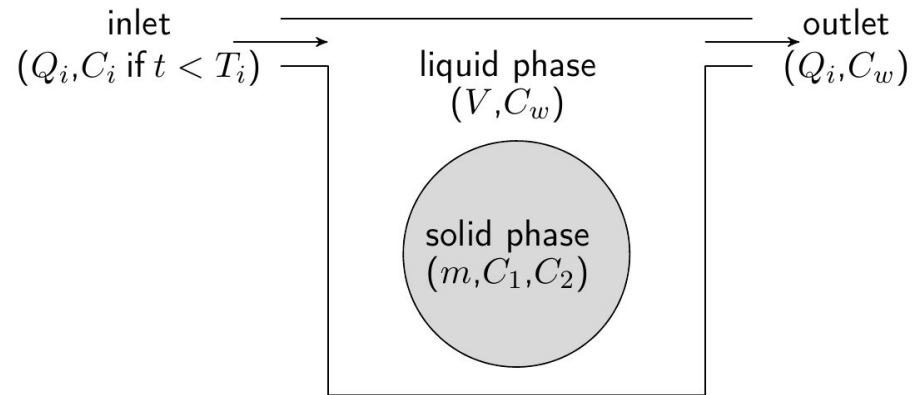
^a Radionuclide Transfers in the Environment Research Laboratory (LRTE), IRSN, centre de Cadarache, bât. 159, BP 3, 13115, Saint-Paul-lez-Durance, France

^b Laboratory of Biogeochemistry, Bioavailability and Transfers of Radionuclides (L2BT), IRSN, centre de Cadarache, bât. 183, BP 3, 13115, Saint-Paul-lez-Durance, France

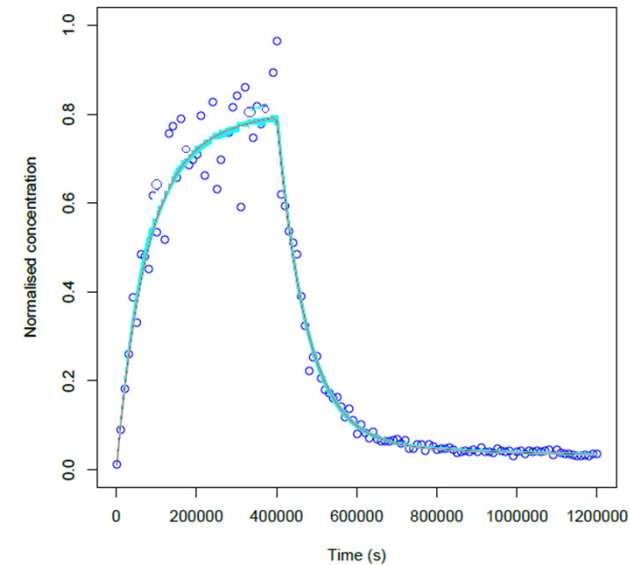
^c Models for Ecotoxicology and Toxicology Unit (METO), INERIS, Parc ALATA, BP 2, 60550, Verneuil-en-Halatte, France

The Bayesian approach is gaining audience in the field of radioecology (Beresford et al., 2014; Hosseini et al., 2013; Sy et al., 2015), including sorption parameter identification (Norden, 2010), **because its output directly quantifies parameter uncertainty and makes use of prior knowledge.**

Stirred flow-through reactor (CSTR)

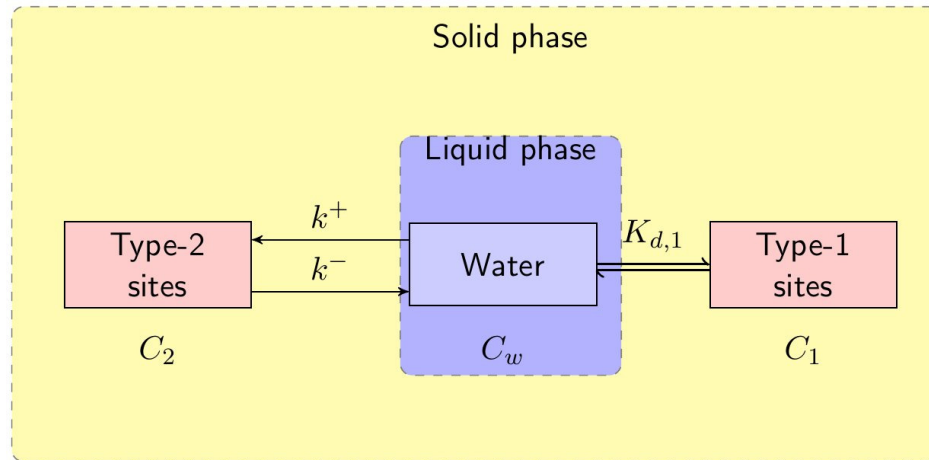


Physical model f and main physical variables characterizing stirred flow-through reactor experiments.



$$C_w(t) = f(\theta, t)$$

EK model and alternative models



(Nicoulaud-Gouin et al., 2016, J. Environ. Radioact.)

EK model	Parameters	Description
M_1	$K_{d,1}$	Pure equilibrium
M_2	$K_{d,1}$ k^+	Irreversible on Type-2 sites
M_3	$K_{d,1}$ k^+ k^-	Full EK model

Aims

- **Define experimental designs**
- **Abilities of the Bayesian approach to select a sorption model among alternatives**
- **Estimate its parameters**
- **Compare Bayesian approach with Maximum likelihood approach**

Methods

- **Simulating experiments and choosing different experimental designs**
- **Bayesian inference was performed by SAMCAT and GNU-MCSim software**
- **Maximum likelihood was conducted in R environment**

Simulated experiments and experimental designs

6 simulated CSTR experiments with the following EK parameters, and different experimental conditions, added by a random normal noise with a coefficient of variation of 10%

$K_{d,1}$	k^+	k^-
150	$5 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-7}$

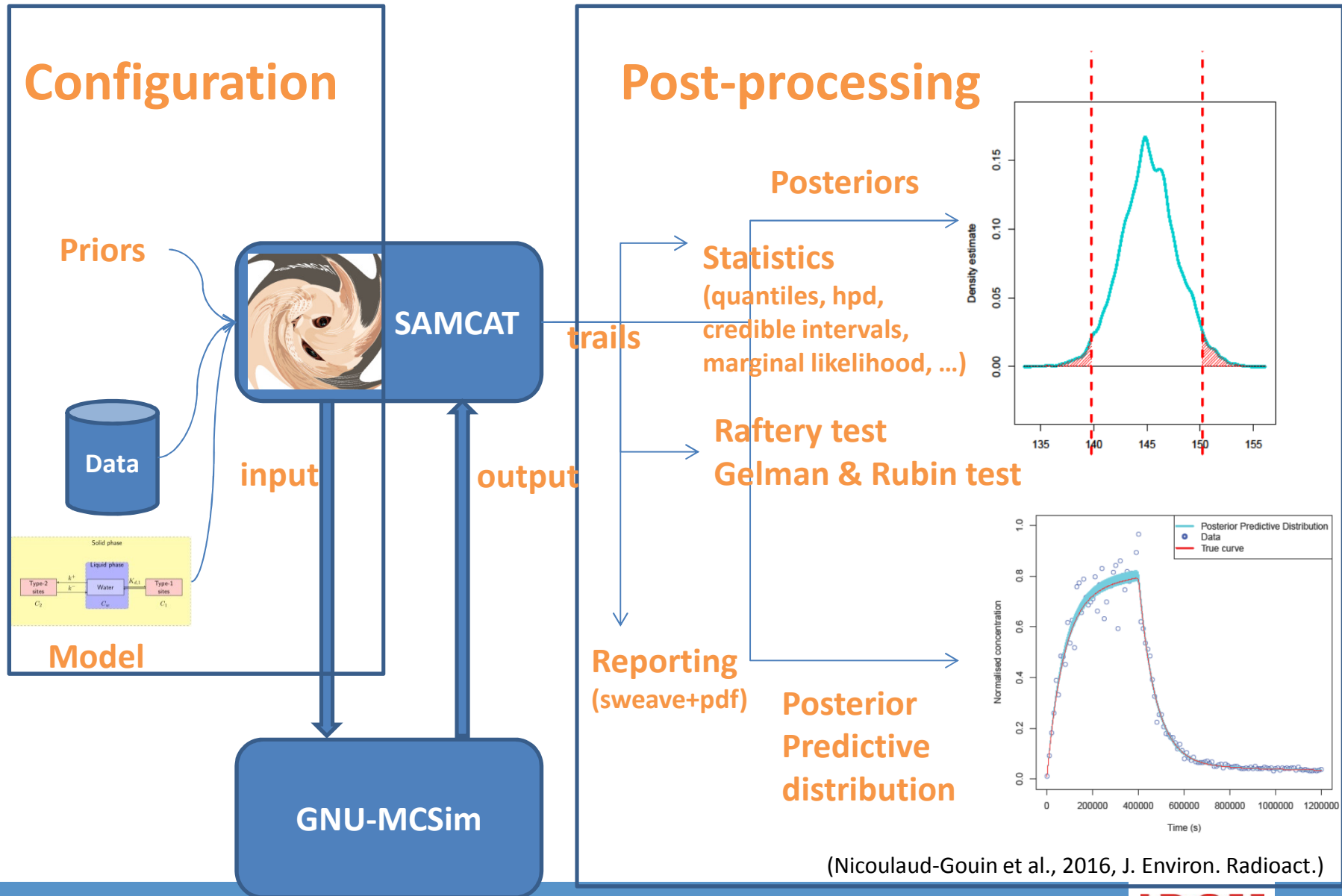
Designs	Experiments	Q_i	C_i	Equilibrium reached
A	1 & 2	Different	Different	Yes
B	1 & 3	Equal	Different	Yes
C	1 & 4	Different	Equal	Yes
D	5 & 6	Different	Different	No

Prior distributions

Model	Parameter	Unit	Prior distribution
Sorption model EK	$K_{d,1}$	L/kg	LogU(0.1,1000)
Sorption model EK	k^+	L/kg/s	LogU(10^{-10} ,0.1)
Sorption model EK	k^-	s^{-1}	LogU(10^{-10} ,0.1)
Additive error model	σ	-	InvGamma(3,0.05)
Proportional error model	σ	-	InvGamma(3,0.05)

EK model	Parameters
M_1	$K_{d,1}$
M_2	$K_{d,1}$ k^+
M_3	$K_{d,1}$ k^+ k^-

SAMCAT software and GNU-MCSim



Discrepancy measure

$$D(\theta) = \sum_t \frac{(c_w(t) - f(\tilde{\theta}, t))^2}{f(\tilde{\theta}, t)}$$

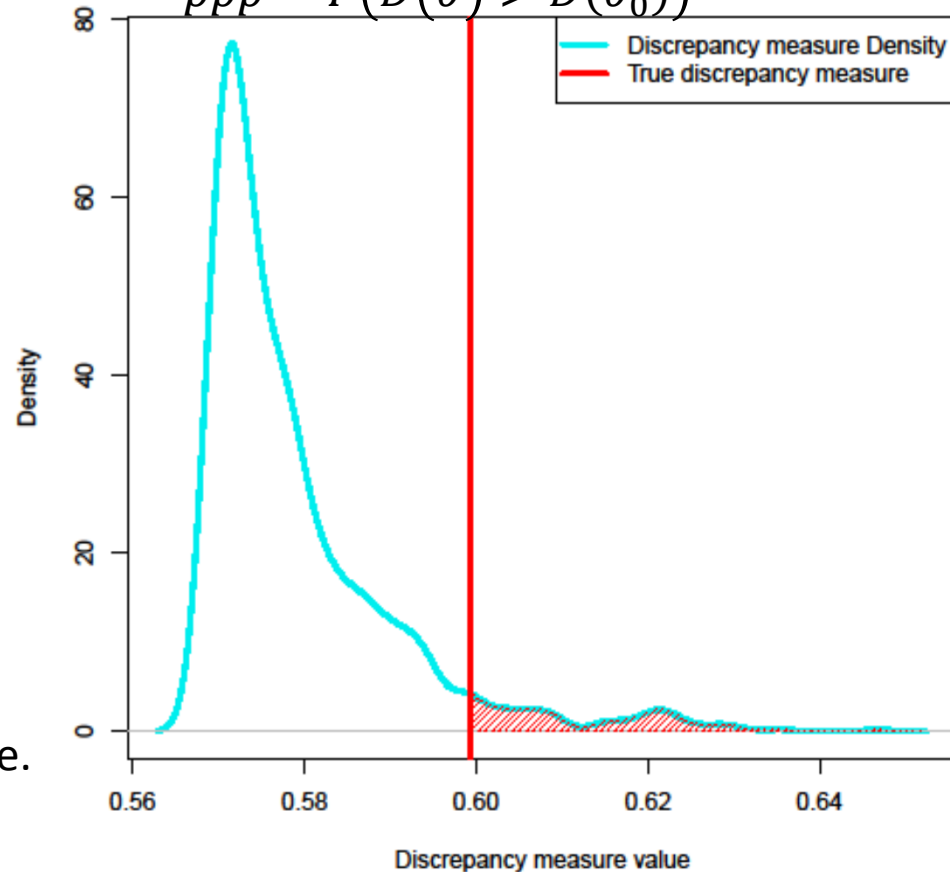
Designs	ppp- value
A	0.404
B	0.058
C	0.211
D	0.674

The best design is A according to ppp-value.

A > D > C > B

Posterior-predictive p-value :

$$ppp = P(D(\tilde{\theta}) > D(\theta_0))$$



(Nicoulaud-Gouin et al., 2016, J. Environ. Radioact.)

Discrepancy measure for design B the worst design.

Marginal loglikelihood

Type	Model	Error model	GRI	EF	ML
Design A	M1	Proportional	1.98	0.81	124.1
Design A	M2	Proportional	1.98	0.808	130.5
Design A	M3	Proportional	1.11	0.98	494.2
Design A	M1	Additive	2.35	0.905	153.8
Design A	M2	Additive	3.17	0.974	262.4
Design A	M3	Additive	1.11	0.98	284.2

(Nicoulaud-Gouin et al., 2016, J. Environ. Radioact.)

	Model	Error model	GRI	EF	ML
Design A	M1	Proportional	-	-	-
Design A	M2	Proportional	-	-	-
Design A	M3	Proportional	1.005	0.98	511
Design A	M1	Additive	1.448	0.934	165
Design A	M2	Additive	1.74	0.976	282
Design A	M3	Additive	1.005	0.979	307

Conclusion

- **Optimal design with at least two experiments with different Q_i and different C_i**
- **Bayesian inference more efficient than maximum likelihood inference**
- **Perspective to apply on other experimental devices and other sorption models**

Identifiability of sorption parameters in stirred flow-through reactor experiments and their identification with a Bayesian approach (2016)

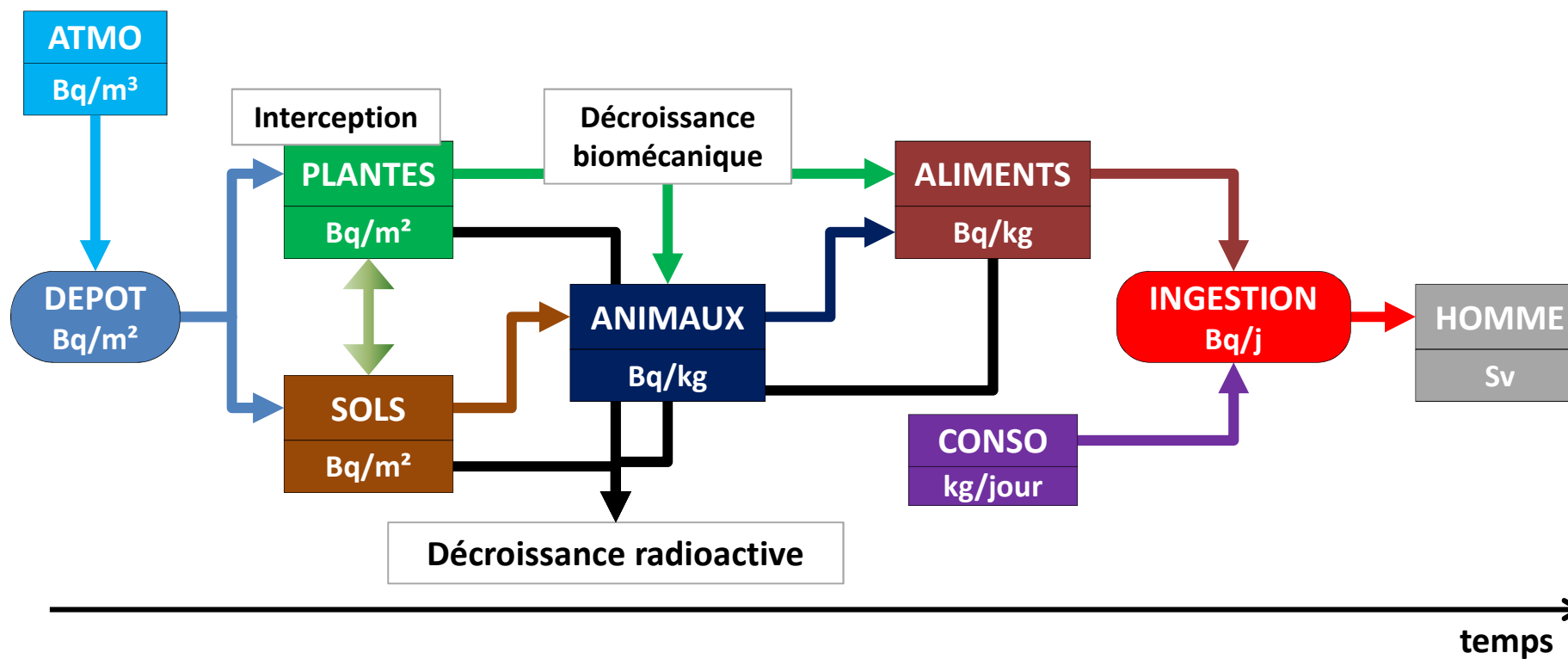
V. Nicoulaud-Gouin, L. Garcia-Sanchez, M. Giacalone, J.C. Attard, A. Martin-Garin, F.Y. Bois

Apport de l'inférence bayésienne à la caractérisation des incertitudes dans la modélisation des transferts de polluants radioactifs dans l'environnement

- Des attentes
- Des avancées
- Des perspectives

Pour alimenter les outils d'aide à la décision et d'évaluation d'impact dosimétrique

Quel T0 et que faire des observations (surveillance) postérieures à T0 ?



Quel T0 et que faire des observations (surveillance) postérieures à T0 ?

- Terme source (Bq/s)
- Panache (Bq/m³)
- Dépôt (Bq/m²)
- Sols, eaux...(Bq/kg)
- Aliment (Bq/kg)
- Etude de l'alimentation totale (Bq/jour)

Modèles vs. surveillance sur le terrain



Merci

- **Simon-Cornu M., Beaugelin-Seiller K., Boyer P., Calmon P., Garcia-Sanchez L., Mourlon C., Nicoulaud V., Sy M. M., Gonze M-A. (2015).** *Evaluating variability and uncertainty in radiological impact assessment with the probabilistic database of SYMBIOSE.* J. Environ. Radioact. 139. pp 91-102.
- **Sy M. M., Ancelet S., Henner P., Hurtevent P., Simon-Cornu M. (2015).** *Foliar interception of radionuclides in dry conditions: A meta-analysis using a Bayesian Modeling Approach.* J. Environ. Radioact. 147. pp 63-75.
- **Sy M. M., Gonze M.-A., Métivier J.M., Nicoulaud-Gouin, V., Simon-Cornu M. (2016).** *Uncertainty analysis in post-accidental risk assessment models: an application to the Fukushima accident.* *Annals of Nuclear Energy.* Sous presse.
- **Gonze M.-A., Sy M. M.,** *Interception of wet deposited atmospheric pollutants by herbaceous vegetation: Data review and modelling.* Science of the Total Environment. Sous presse
- **Sy M. M., Hosseini A., Liland A., Simon-Cornu M., Thorning H.** *Uncertainty and variability in food chain exposure by radioactive fallouts. What can Hierarchical Bayesian modelling bring to radioecology community.* J. Environ. Radioact. Soumis le 28/01/16 et en cours de révision.

Conclusion

- Evaluation de l'impact de l'**incertitude sur les paramètres radioécologiques** et de la **variabilité spatiale des dépôts** sur les niveaux de ^{137}Cs attendus dans les légumes feuille après l'accident de Fukushima.
 - Influence de la voie foliaire dans les quelques mois (env. **6**) suivant l'arrêt des rejets.
 - Influence de la voie racinaire à long terme (env. **1 an**).
 - Impact de la nature des dépôts sur l'évolution des concentrations de ^{137}Cs dans les légumes feuille.
- Importance de bien caractériser l'**incertitude sur les paramètres contextuels**

Développer une méthodologie d'analyse des incertitudes pour l'évaluation des risques alimentaires en situation (post-) accidentelle.

- ❑ Quantification de l'incertitude sur les paramètres radioécologiques décrivant la voie foliaire
 - **Interception sèche et humide**
 - **Perte au champs**
- Développement de modèles hiérarchiques permettant
 - **de saisir la variabilité plante/substance-spécifique dans les processus étudiés**
 - **de comprendre plus finement les mécanismes de l'interception humide**
- Développement de modèles prédictifs adaptés à des enjeux opérationnels
- Bases de données particulièrement riches destinées à alimenter les outils d'aide à la décision en situation accidentelle (*e.g.* SYMBIOSE)
- ❑ Etude de l'impact de l'incertitude sur ces paramètres sur les sorties des modèles d'évaluation de l'exposition des populations par la voie alimentaire
 - Identification de l'influence de la voie foliaire dans le calcul d'impact dosimétrique
 - Identification de l'influence de paramètres contextuels tels que la nature des dépôts

- ❑ **Régionalisation des paramètres radioécologiques** avec une caractérisation de la **variabilité spatiale** liée aux facteurs environnementaux (e.g. types de plantes en fonction de la région, biomasse des plantes suivant les conditions climatiques)
 - **Interception foliaire**
- ❑ **Développement de modèles** permettant de caractériser la variabilité spatiale et l'**incertitude** en chaque point de l'espace.
 - **Quantités de radionucléides déposés**
 - **Nature des dépôts**
- ❑ Prise en compte de l'**incertitude** dans la **modélisation du transfert aux produits animaux**
 - **Incertitude sur les taux de transfert dans les différents compartiments biologiques**
 - **Développement de modèles mécanistes (e.g. modèles PBPK)**
- ❑ Eriger un pont entre modèle et mesures
 - **Utilisation des mesures environnementales pour réduire l'incertitude sur les paramètres contextuels**

Articles publiés

- **Simon-Cornu M., Beaugelin-Seiller K., Boyer P., Calmon P., Garcia-Sanchez L., Mourlon C., Nicoulaud V., Sy M. M., Gonze M-A. (2015).** *Evaluating variability and uncertainty in radiological impact assessment with the probabilistic database of SYMBIOSE.* J. Environ. Radioact. 139. pp 91-102.
- **Sy M. M., Ancelet S., Henner P., Hurtevent P., Simon-Cornu M. (2015).** *Foliar interception of radionuclides in dry conditions: A meta-analysis using a Bayesian Modeling Approach.* J. Environ. Radioact. 147. pp 63-75.
- **Sy M. M., Gonze M.-A., Métivier J.M., Nicoulaud-Gouin, V., Simon-Cornu M. (2016).** *Uncertainty analysis in post-accidental risk assessment models: an application to the Fukushima accident.* *Annals of Nuclear Energy.* Sous presse.

Articles en révision

- **Gonze M.-A., Sy M. M.,** *Interception of wet deposited atmospheric pollutants by herbaceous vegetation: Data review and modelling.* Science of the Total Environment. Soumis le 22/01/16 et révisé le 16 mars.
- **Sy M. M., Hosseini A., Liland A., Simon-Cornu M., Thorring H.** *Uncertainty and variability in food chain exposure by radioactive fallouts. What can Hierarchical Bayesian modelling bring to radioecology community.* J. Environ. Radioact. Soumis le 28/01/16 et en cours de révision.

Communications orales (proceedings)

- **Sy M. M., Simon-Cornu M. (2014).** *Risk assessment of radioactive cesium via consumption of leafy vegetables after an environmental contamination (e.g. Fukushima).* **Society for Risk Analysis Annual Meeting (SRA-2014).** Denver – USA. 7 - 11 December, 2014.
- **Sy M. M., Gonze M-A., Simon-Cornu M. (2015).** *Uncertainty analysis in post-accidental risk assessment models: An application to the Fukushima accident.* **The 7th European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR-2015).** Marseille – France. 24 - 26 March, 2015.

Proposer une représentation mathématique de l'imprécision ou du manque de connaissances exactes sur les valeurs d'un paramètre

Selon la **nature** et la « **quantité** » de l'information disponible
 → Différentes approches peuvent être envisagées

▪ « **P-Boxes** » et **Fonctions de croyance de Dempster-Shafer**

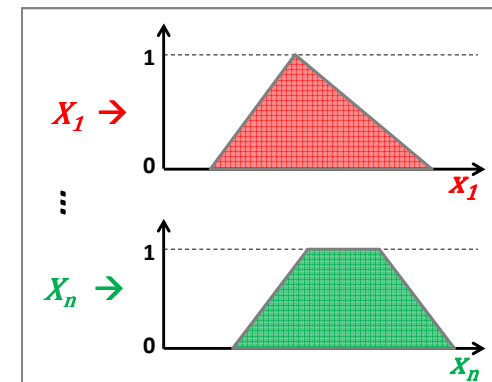
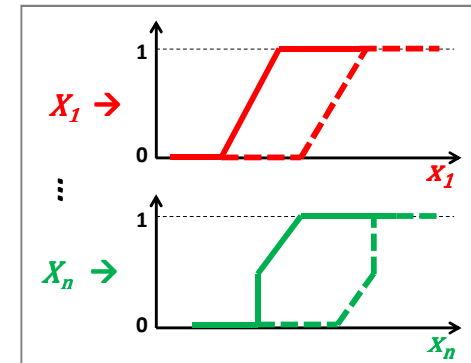
Ex: Lorsque l'échantillon à disposition est pauvre, ou que l'on connaît min, max et moyenne, ou min, max et quantiles.

→ Un encadrement de la probabilité inconnue est proposé soit par une **p-box**, soit par les **fonctions de croyance**.

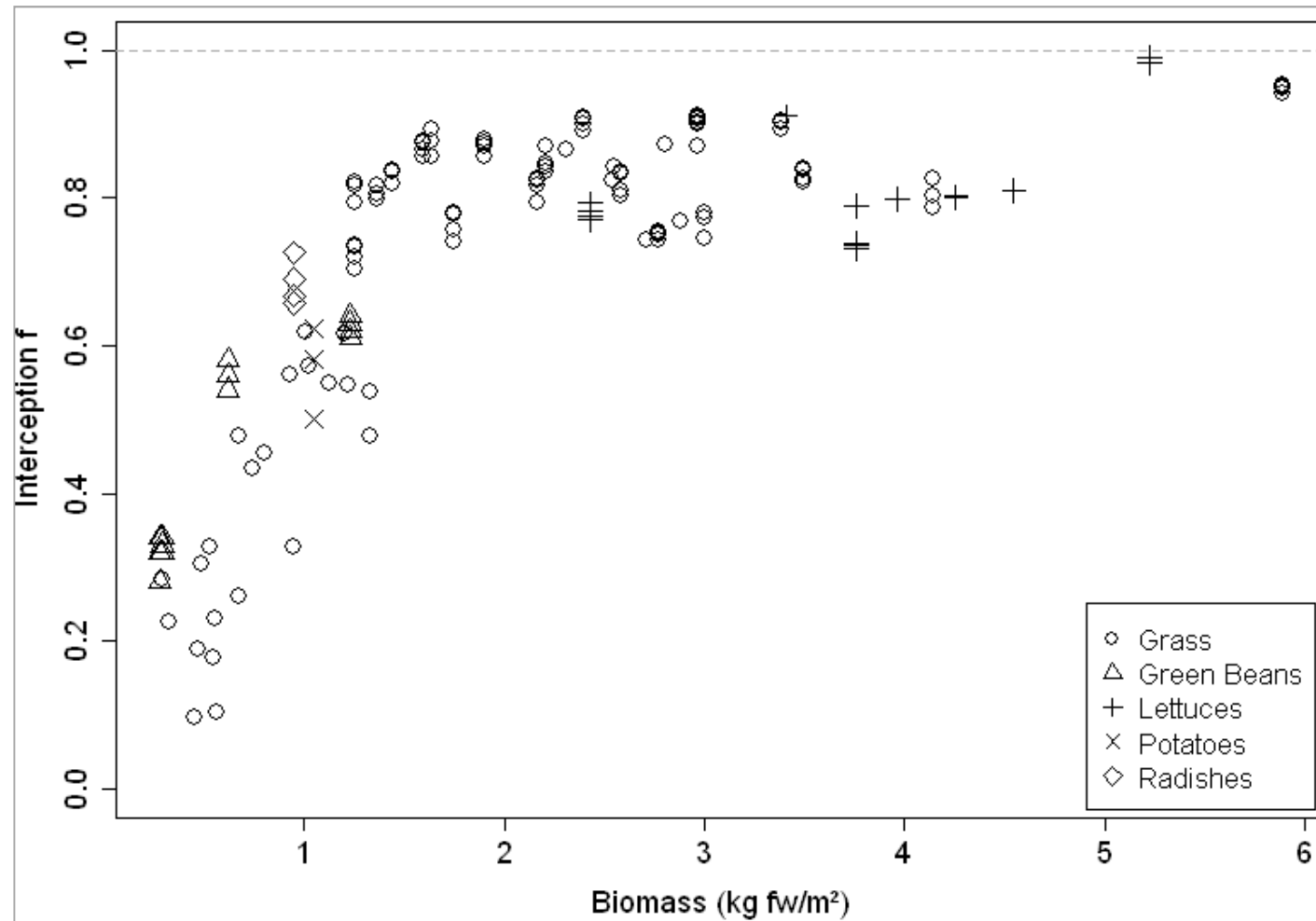
▪ **Distributions de possibilité**

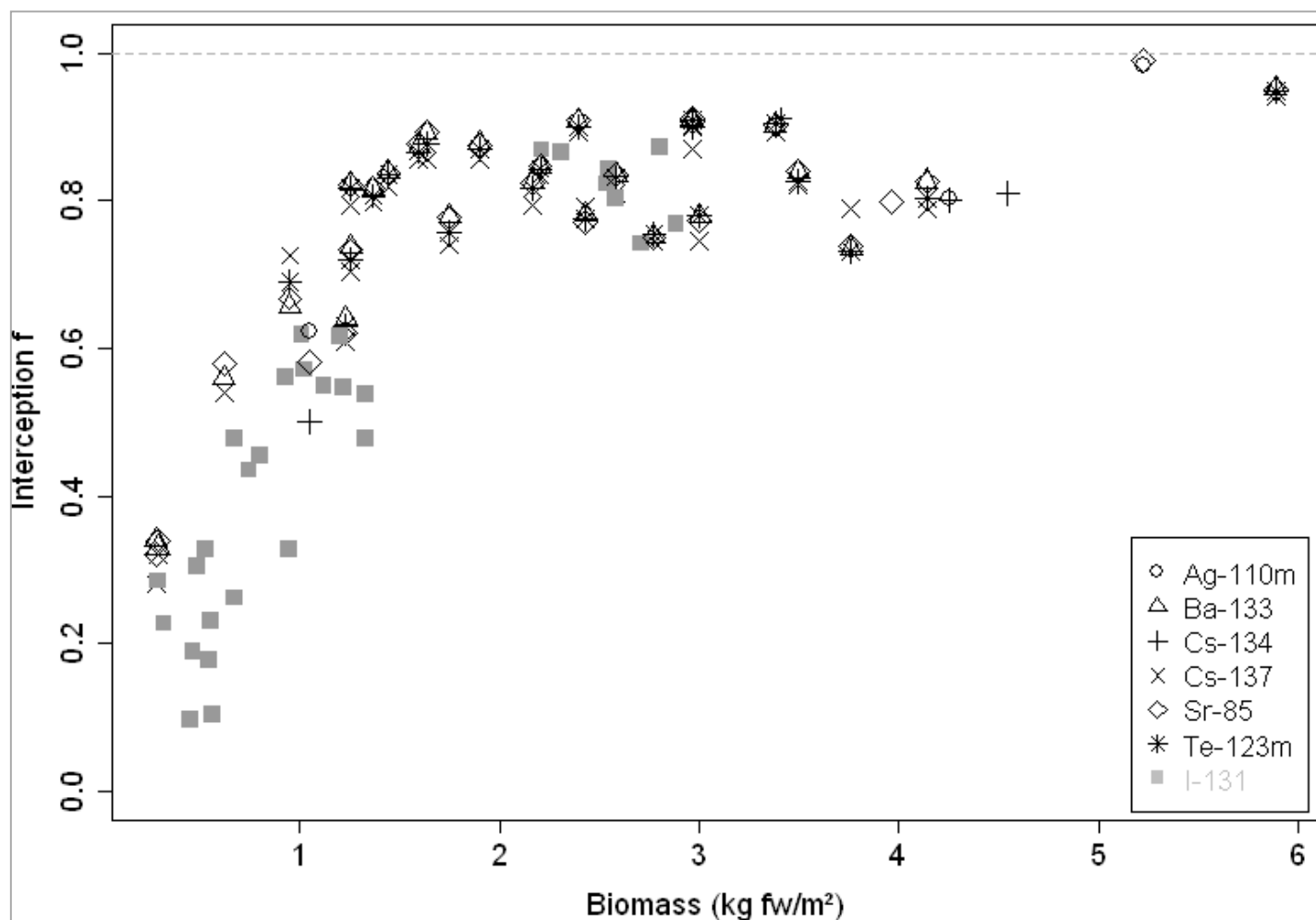
Ex: Lorsque l'on connaît min, max et mode ou min, max, moyenne et écart-type.

→ Chaque paramètre peut être représenté par sa **distribution de possibilité**.



Plant \ RN	^{110m}Ag	^{133}Ba	^{134}Cs	^{137}Cs	^{85}Sr	^{123m}Te	^{131}I	Total
Herbe	0	20	0	20	20	20	30	110
Haricot	0	4	0	4	4	1	0	13
Salade	2	2	3	2	4	2	0	14
Pomme de terre	1	0	1	0	1	0	0	3
Radis	0	1	0	1	1	1	0	4
Total	3	27	4	27	30	24	30	145



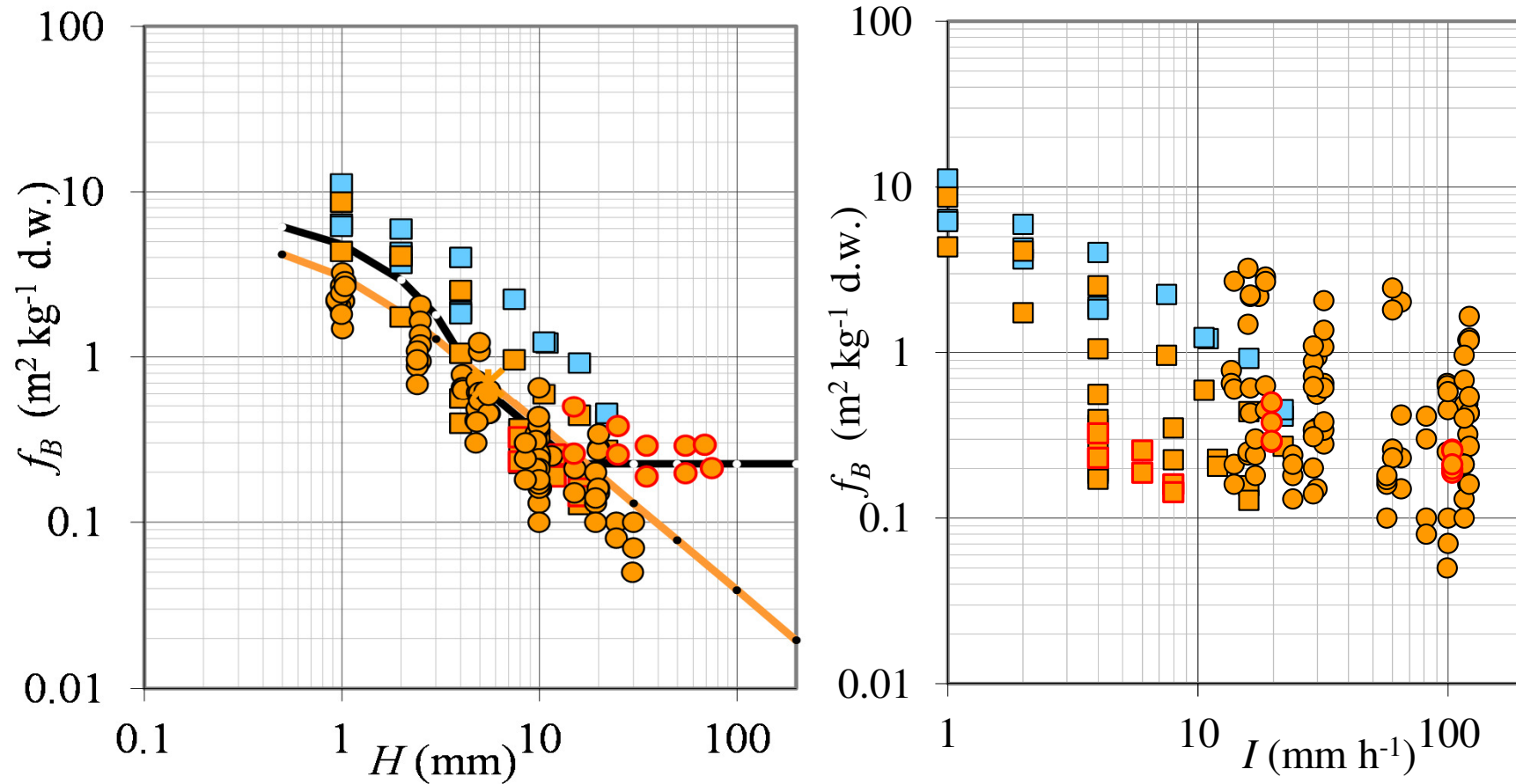


Selected experiments covering a wide range of plants (Grass, Clover, Weeds) and substances (water, ions, Poly particles)

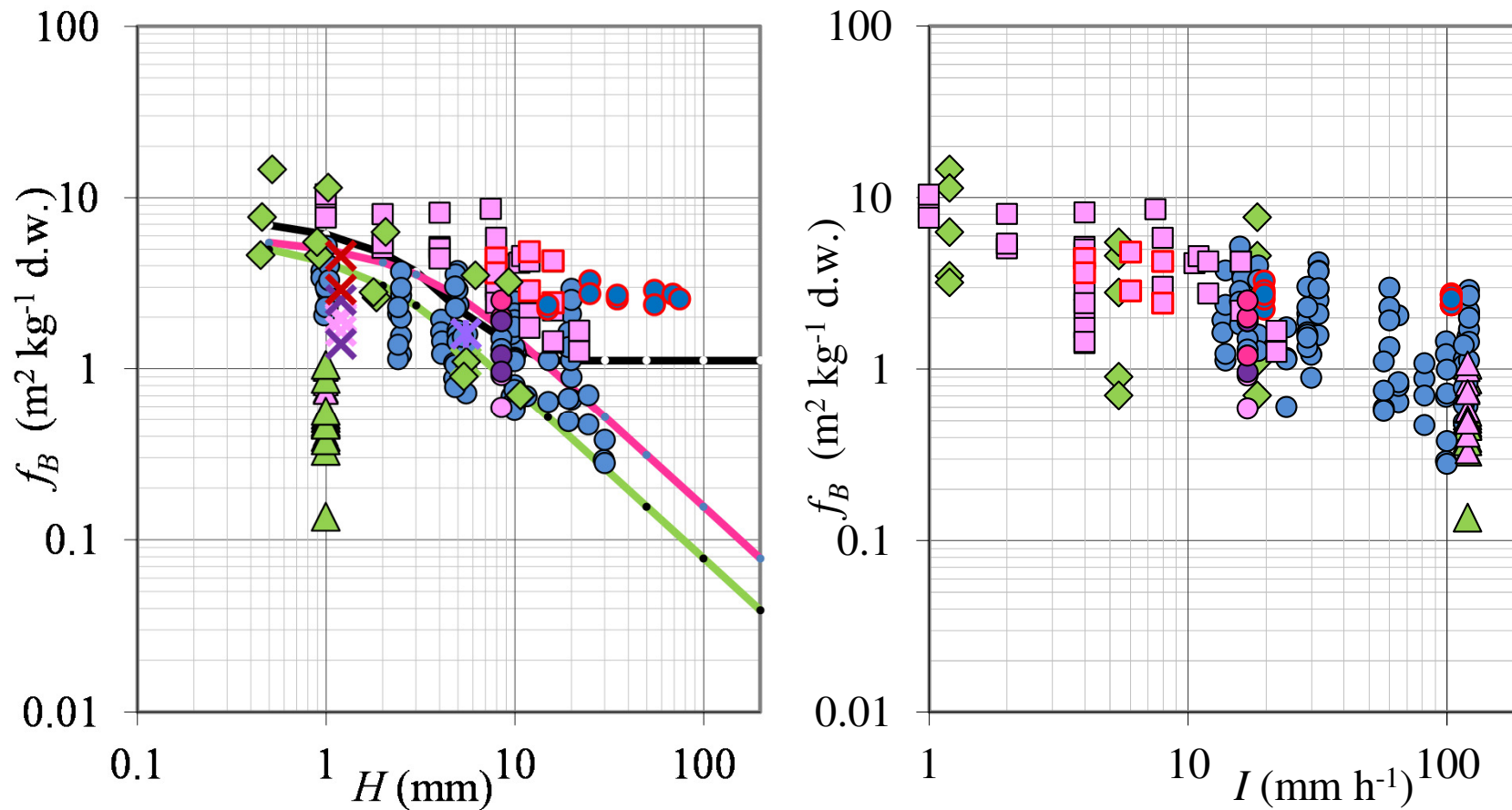
Plant (#data)	Substance	Availability of parameters						Reference
		f_B	f	H	I	B	LAI	
Calibration (363)								
G,CG (40)	I, Sr, H ₂ O	A	A	A	A	A	A	Angeletti and Levi (1977a)
C, G, GW (264)	I, Be, Poly3 μ m	A	A	A	A	A	NA	Hoffman et al. (1989)
G (20)	I, Sr	A	A	A	A	A	NA	Angeletti and Levi (1977b)*
G (15)	Cs	A	A	A	A	A	A	Kinnersley et al. (1997)*
G (24)	Cs, Sr	A	A	A	A	A	A	Bengtsson et al. (2014)*
Validation (77)								
CGW (9)	Cr, Pb, Sr, Poly1 μ m	A	A	A	NA	A	NA	Chadwick and Chamberlain (1970)*
G (3)	I, Cs, Ba	A	A	A	NA	A	NA	Jacob et al. (1993)*
C (20)	I, Sr	A	NA	A	A	NA	NA	Angeletti and Levi (1977b)*
G (30)	I, Be, Poly3 μ m	A	NA	A	A	NA	NA	Hoffman et al. (1989)
C, G, W (15)	I, Be, Sr, Cr,Cd	A	NA	A	A	NA	NA	Hoffman et al. (1995)

* Data never exploited for model development

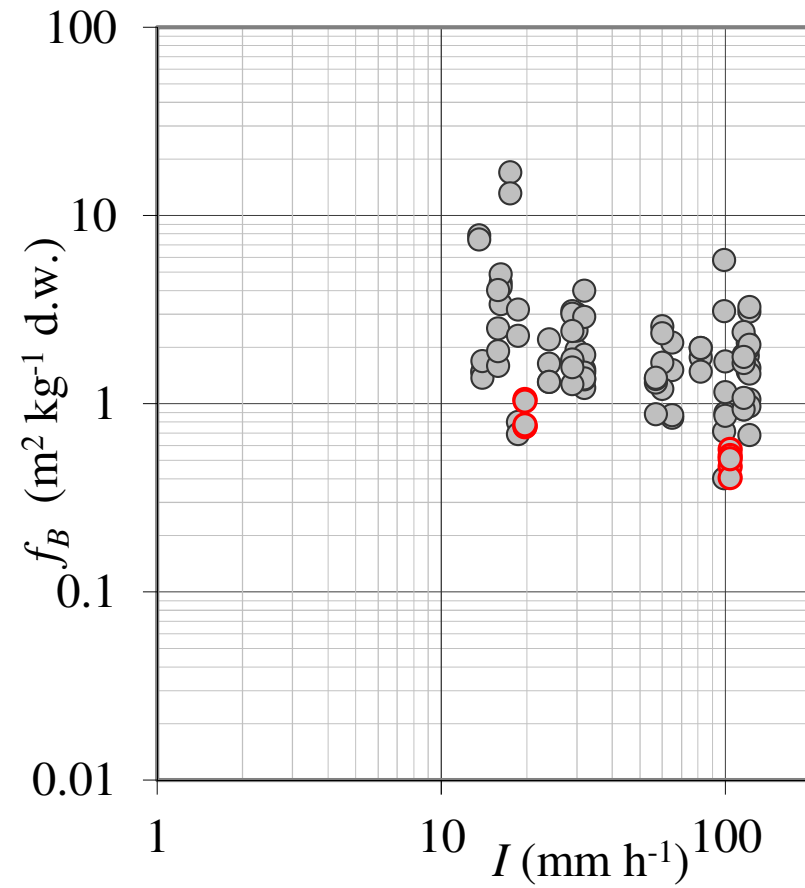
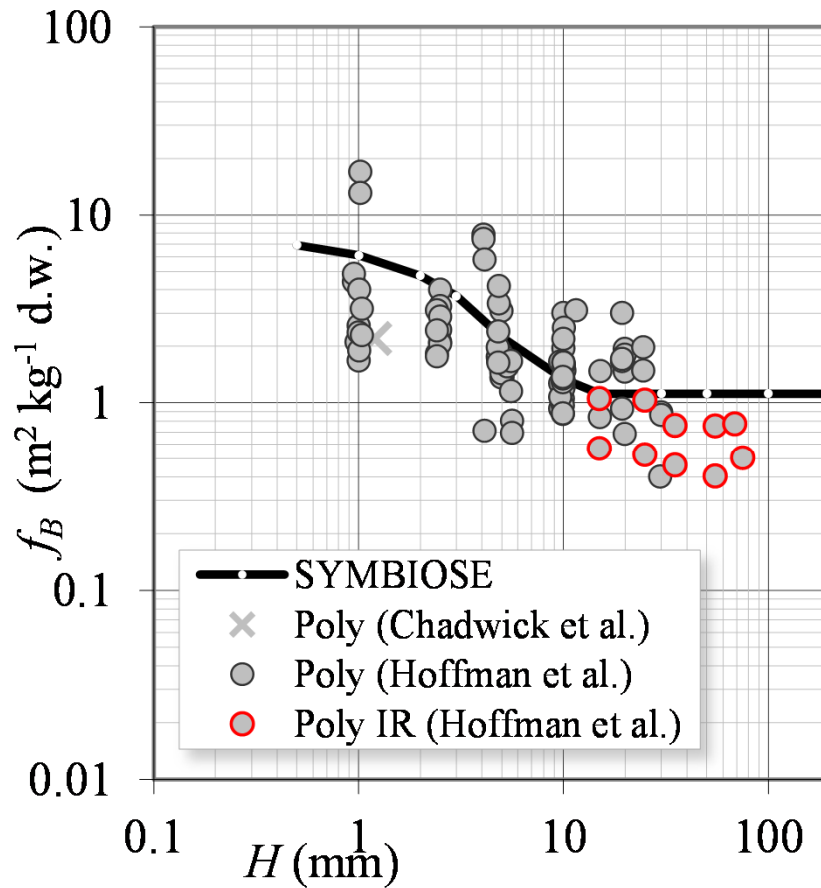
Dissolved anions: I⁻



Dissolved cations: Cs^+ , Be^{2+} , Sr^{2+} , ...

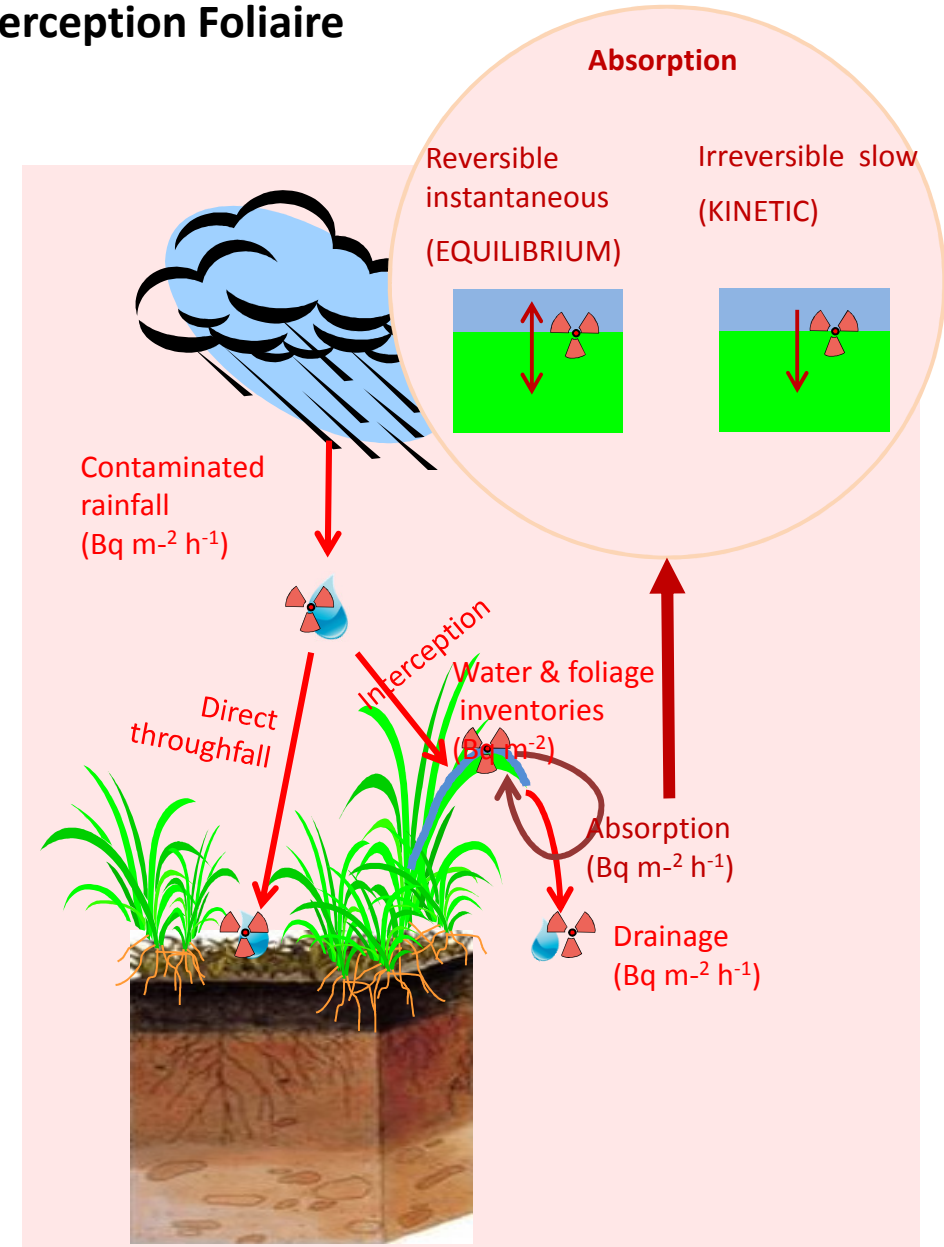
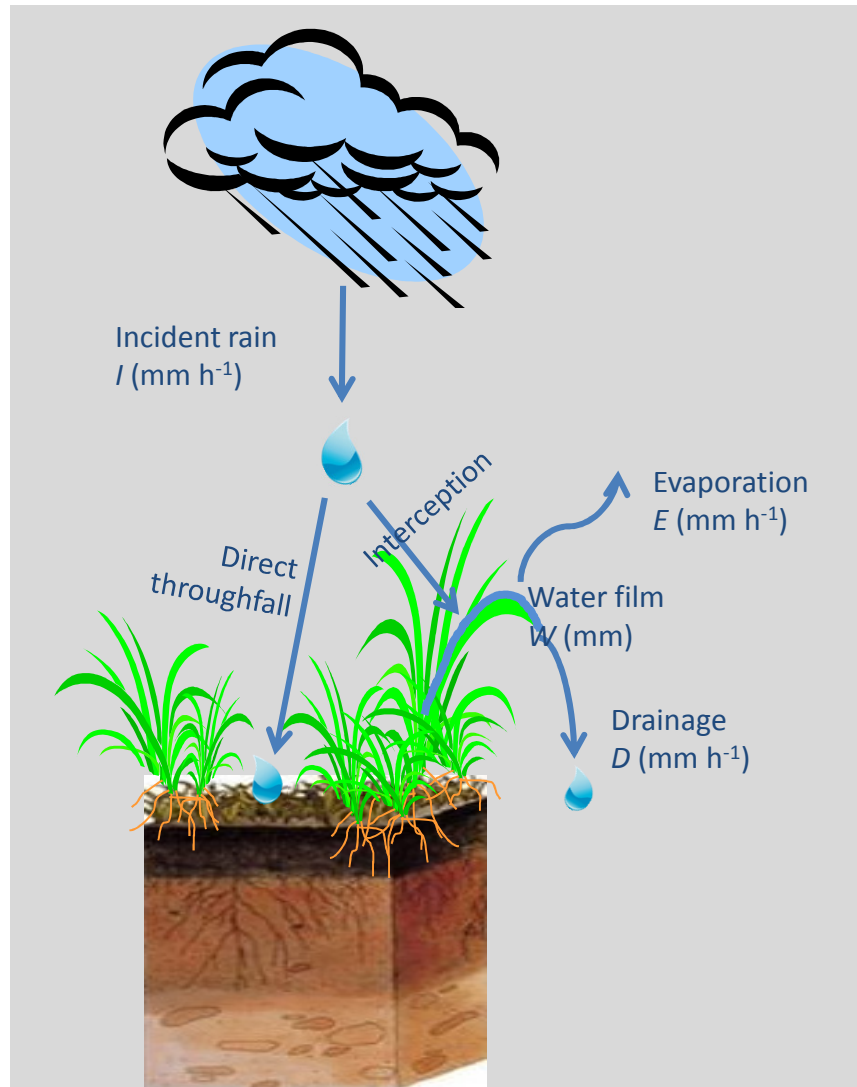


Polystyrene particles



Applications : Interception Foliaire

☐ Interception Humide : Approche alternative



Applications : Interception Foliaire

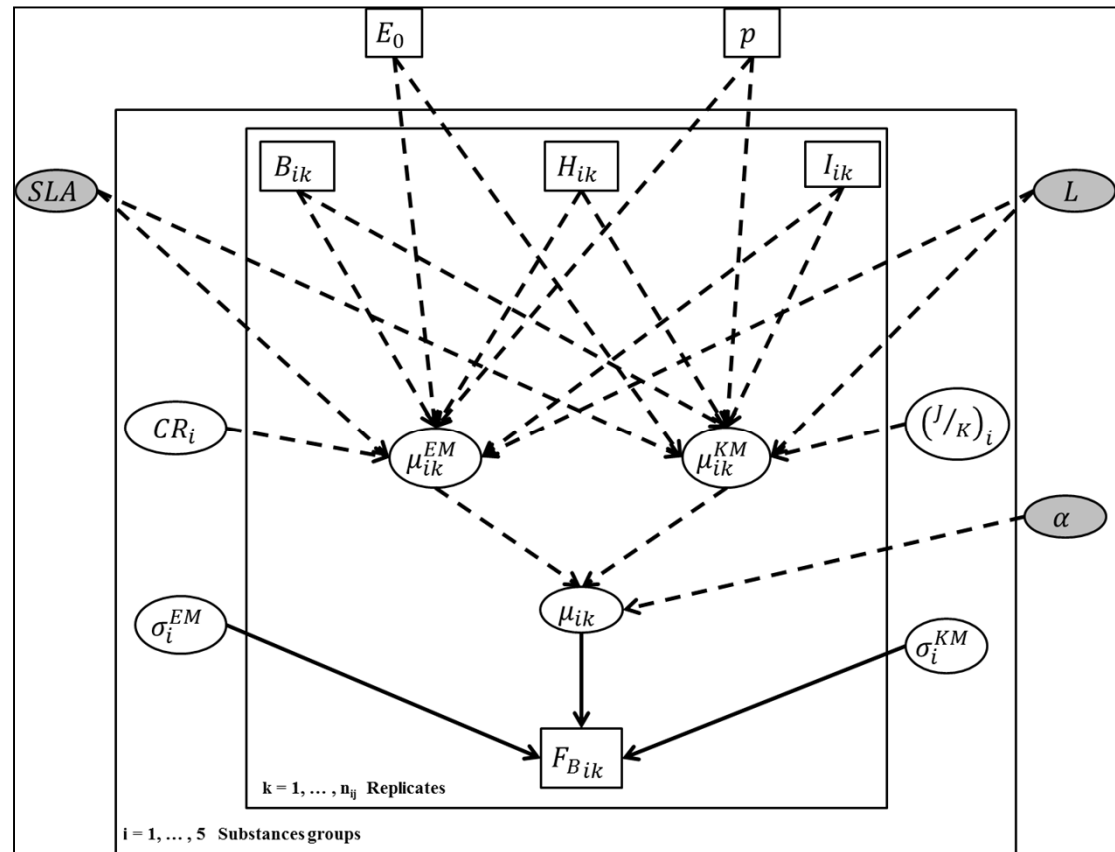
☐ Interception Humide : Approche alternative

▪ Réalité à mi-chemin entre l'absorption à l'équilibre et l'absorption cinétique

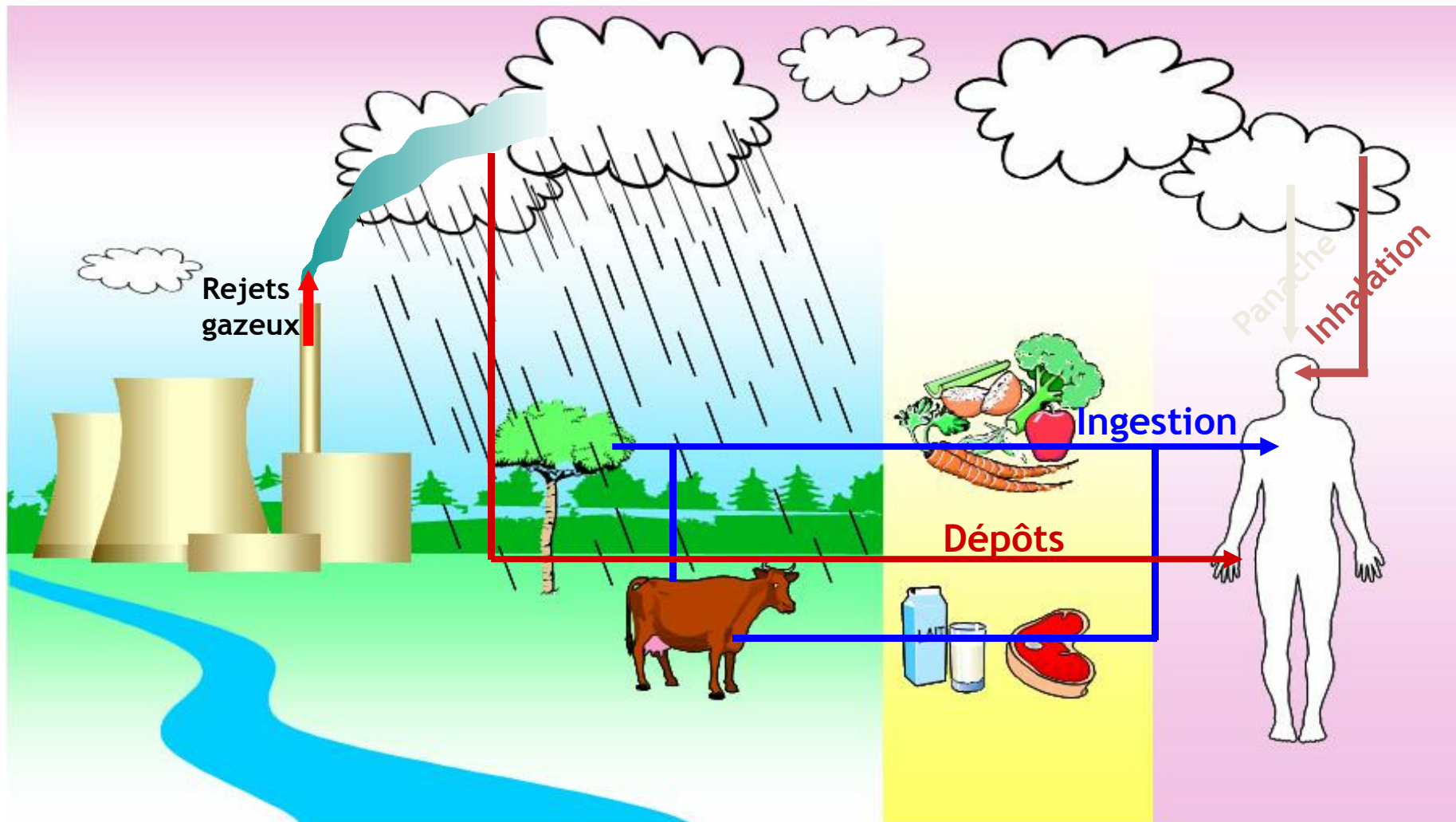
▪ Cohérence dans la modélisation des mécanismes et l'inférence des paramètres des modèles



✓ Mélange de loi log-normales

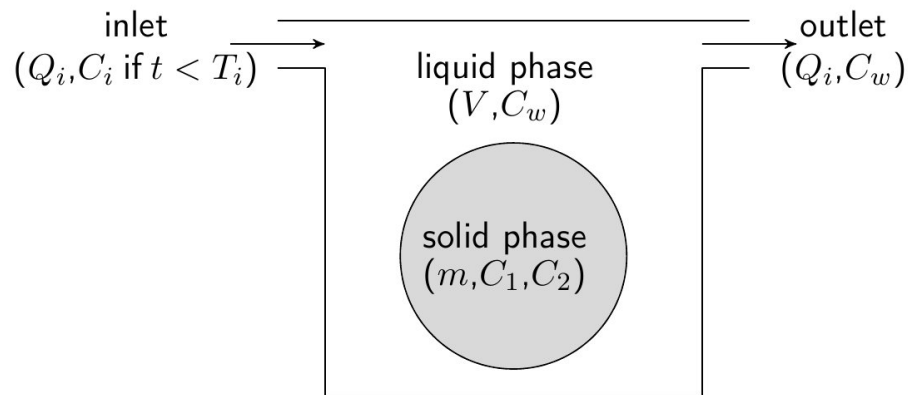


Voies de transfert : Rejets radioactifs gazeux

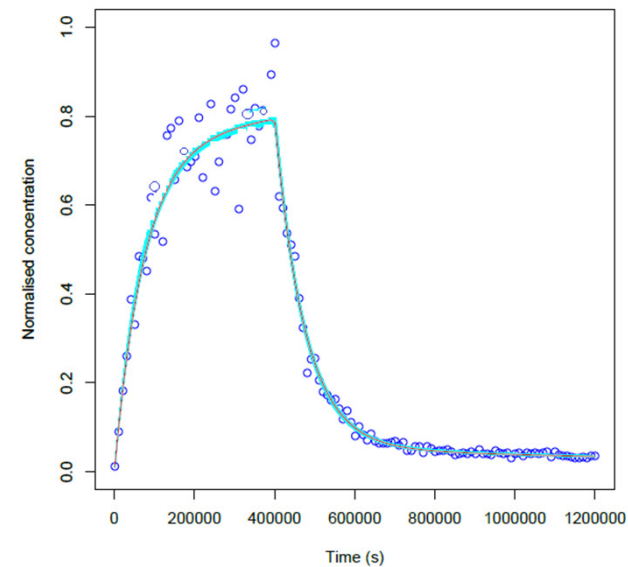


Introduction: an inversion problem

Stirred flow-through reactor (CSTR)

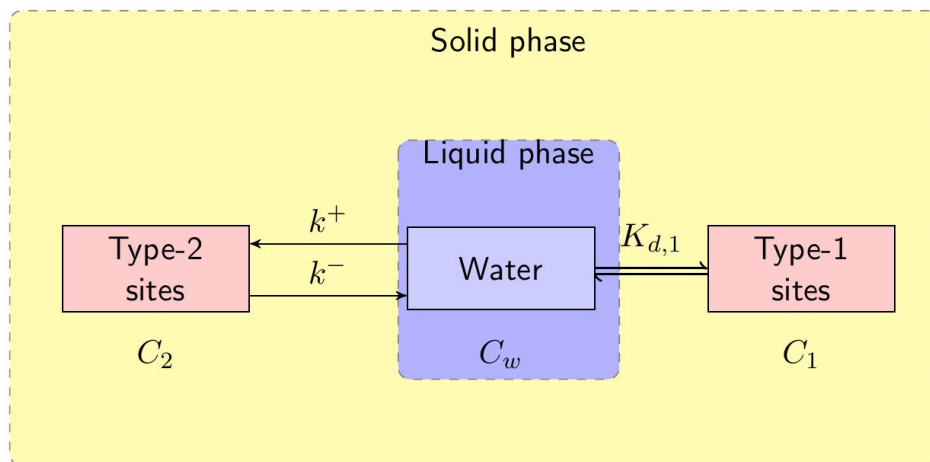


Physical model f and main physical variables characterizing stirred flow-through reactor experiments.



$$C_w(t) = f(\theta, t)$$

EK model and alternative models



(Nicoulaud-Gouin et al., 2016, J. Environ. Radioact.)

EK model	Parameters	Description
M ₁	$K_{d,1}$	Pure equilibrium
M ₂	$K_{d,1}$ k^+	Irreversible on Type-2 sites
M ₃	$K_{d,1}$ k^+ k^-	Full EK model

Aims

- Define experimental designs
- Abilities of the Bayesian approach to select a sorption model among alternatives
- Estimate its parameters
- Compare Bayesian approach with Maximum likelihood approach

Methods

- Simulating experiments and choosing different experimental designs
- Bayesian inference was performed by SAMCAT and GNU-MCSim software
- Maximum likelihood was conducted in R environment

Simulated experiments and experimental designs

$K_{d,1}$	k^+	k^-
150	$5 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-7}$

6 simulated CSTR experiments with the following EK parameters, and different experimental conditions, added by a random normal noise with a coefficient of variation of 10%

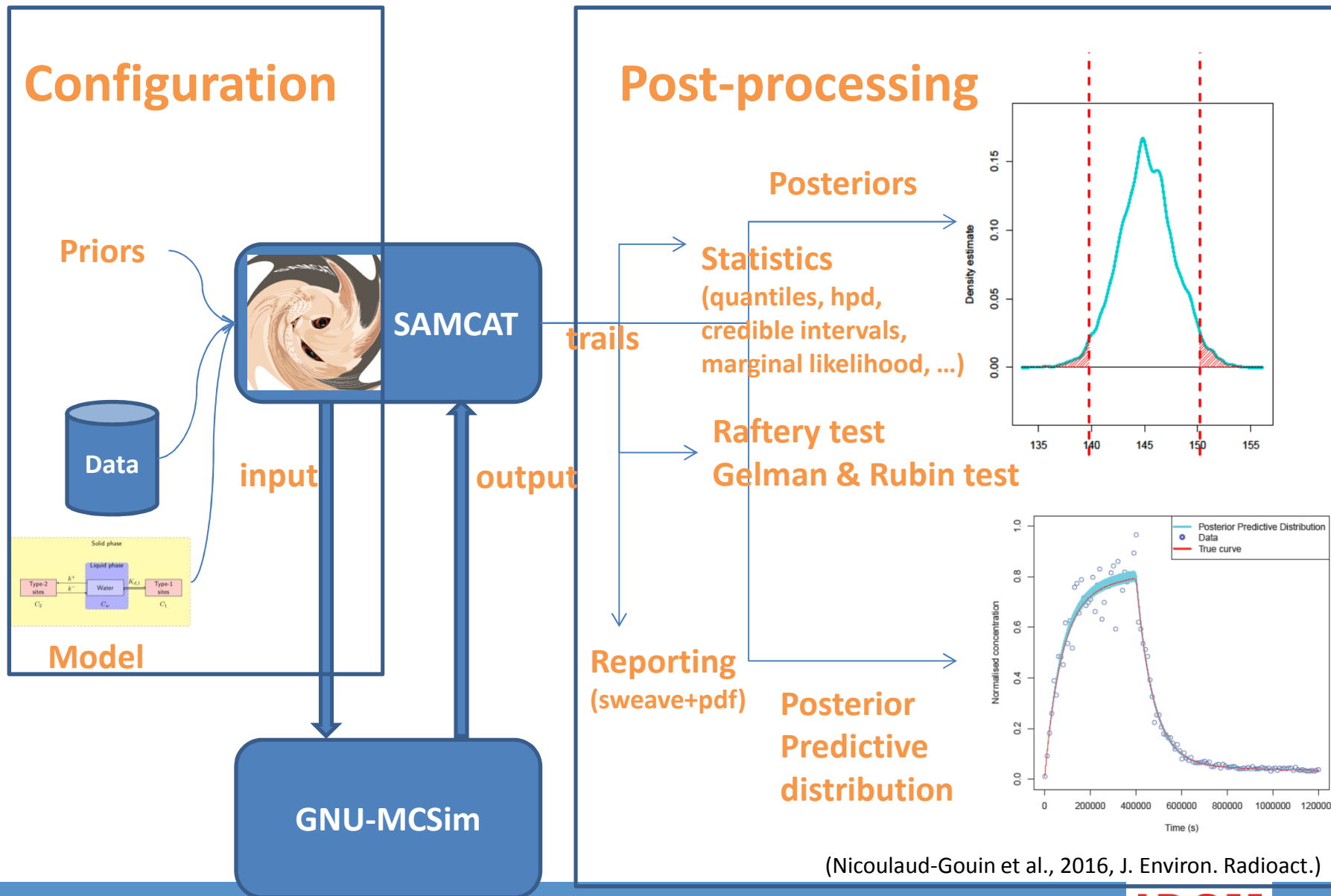
Designs	Experiments	Q_i	C_i	Equilibrium reached
A	1 & 2	Different	Different	Yes
B	1 & 3	Equal	Different	Yes
C	1 & 4	Different	Equal	Yes
D	5 & 6	Different	Different	No

Prior distributions

Model	Parameter	Unit	Prior distribution
Sorption model EK	$K_{d,1}$	L/kg	LogU(0.1,1000)
Sorption model EK	k^+	L/kg/s	LogU(10^{-10} ,0.1)
Sorption model EK	k^-	s^{-1}	LogU(10^{-10} ,0.1)
Additive error model	σ	-	InvGamma(3,0.05)
Proportional error model	σ	-	InvGamma(3,0.05)

EK model	Parameters
M_1	$K_{d,1}$
M_2	$K_{d,1}$ k^+
M_3	$K_{d,1}$ k^+ k^-

SAMCAT software and GNU-MCSim



Discrepancy measure

$$D(\theta) = \sum_t \frac{(c_w(t) - f(\tilde{\theta}, t))^2}{f(\tilde{\theta}, t)}$$

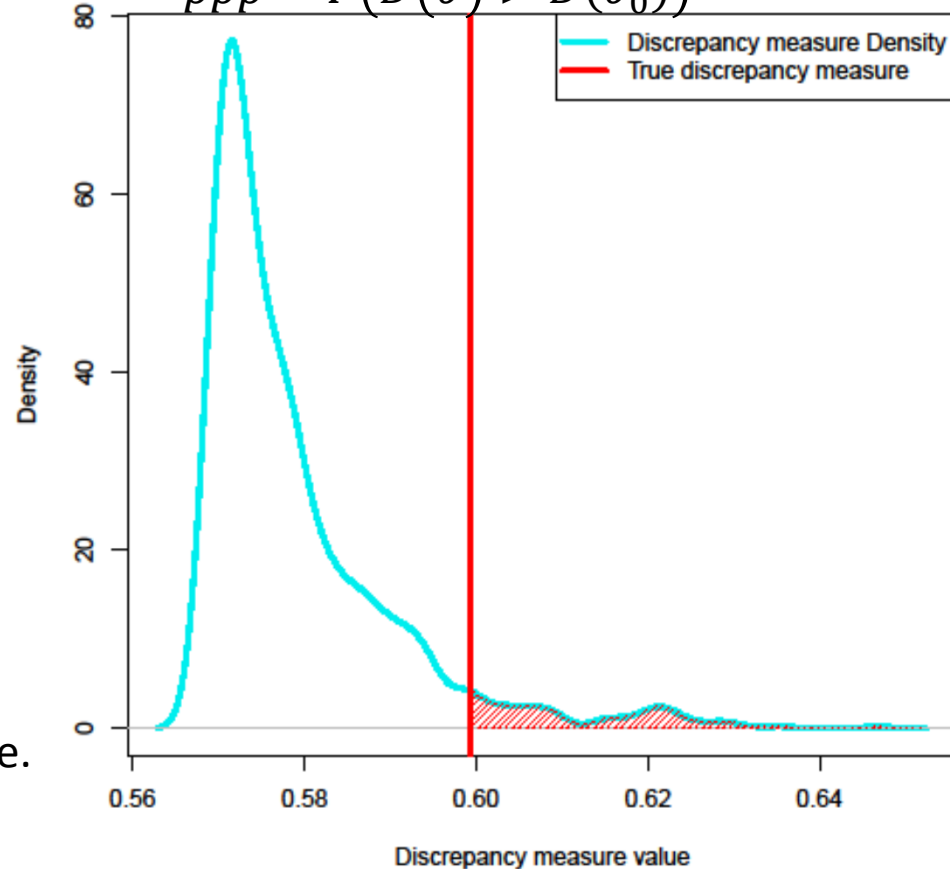
Designs	ppp- value
A	0.404
B	0.058
C	0.211
D	0.674

The best design is A according to ppp-value.

A > D > C > B

Posterior-predictive p-value :

$$ppp = P(D(\tilde{\theta}) > D(\theta_0))$$



(Nicoulaud-Gouin et al., 2016, J. Environ. Radioact.)

Discrepancy measure for design B the worst design.

Marginal loglikelihood

LogLikelihood

Type	Model	Error model	GRI	EF	ML
Design A	M1	Proportional	1.98	0.81	124.1
Design A	M2	Proportional	1.98	0.808	130.5
Design A	M3	Proportional	1.11	0.98	494.2
Design A	M1	Additive	2.35	0.905	153.8
Design A	M2	Additive	3.17	0.974	262.4
Design A	M3	Additive	1.11	0.98	284.2

(Nicoulaud-Gouin et al., 2016, J. Environ. Radioact.)

	Model	Error model	GRI	EF	ML
Design A	M1	Proportional	-	-	-
Design A	M2	Proportional	-	-	-
Design A	M3	Proportional	1.005	0.98	511
Design A	M1	Additive	1.448	0.934	165
Design A	M2	Additive	1.74	0.976	282
Design A	M3	Additive	1.005	0.979	307

Conclusion

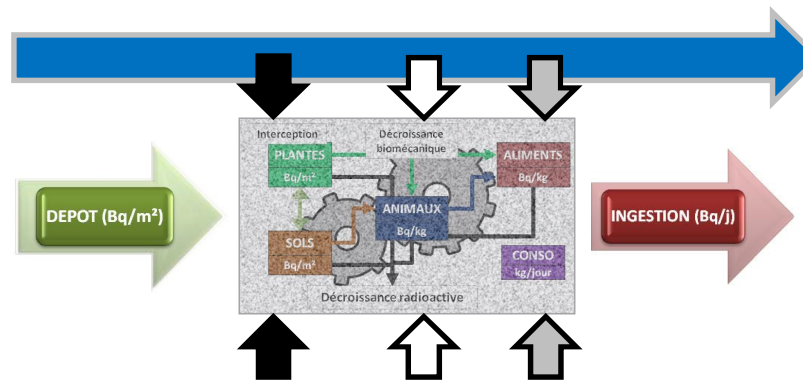
- **Optimal design with at least two experiments with different Q_i and different C_i**
- **Bayesian inference more efficient than maximum likelihood inference**
- **Perspective to apply on other experimental devices and other sorption models**

Identifiability of sorption parameters in stirred flow-through reactor experiments and their identification with a Bayesian approach (2016)

V. Nicoulaud-Gouin, L. Garcia-Sanchez, M. Giacalone, J.C. Attard, A. Martin-Garin, F.Y. Bois

Analyse d'incertitude

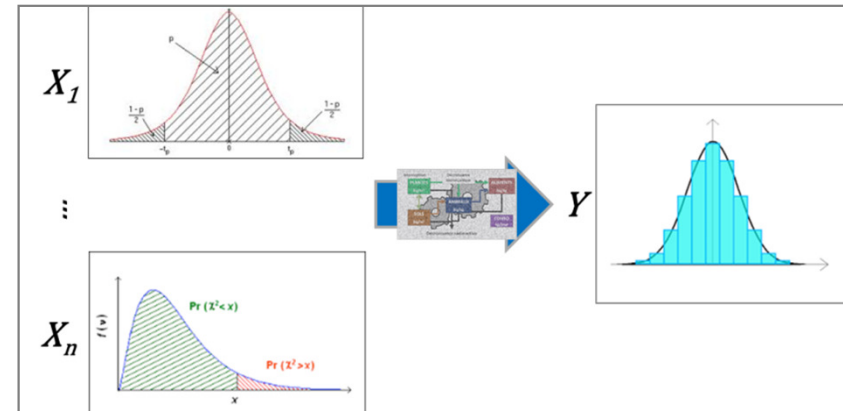
Etudier l'incertitude induite par l'incertitude sur les paramètres d'entrée



■ Simulation Stochastique (e.g. Monte Carlo)

Les distributions de probabilité caractérisant, pour chaque paramètre l'incertitude, sont utilisées pour des tirages aléatoires.

→ La sortie du modèle est représentée par sa **distribution de probabilité**.



Contexte

➤ Accident de Fukushima (Mars 2011)

Rejets atmosphériques suivis de dépôts

- Quantité élevée de RN dans l'environnement

➔ Parcelles agricoles

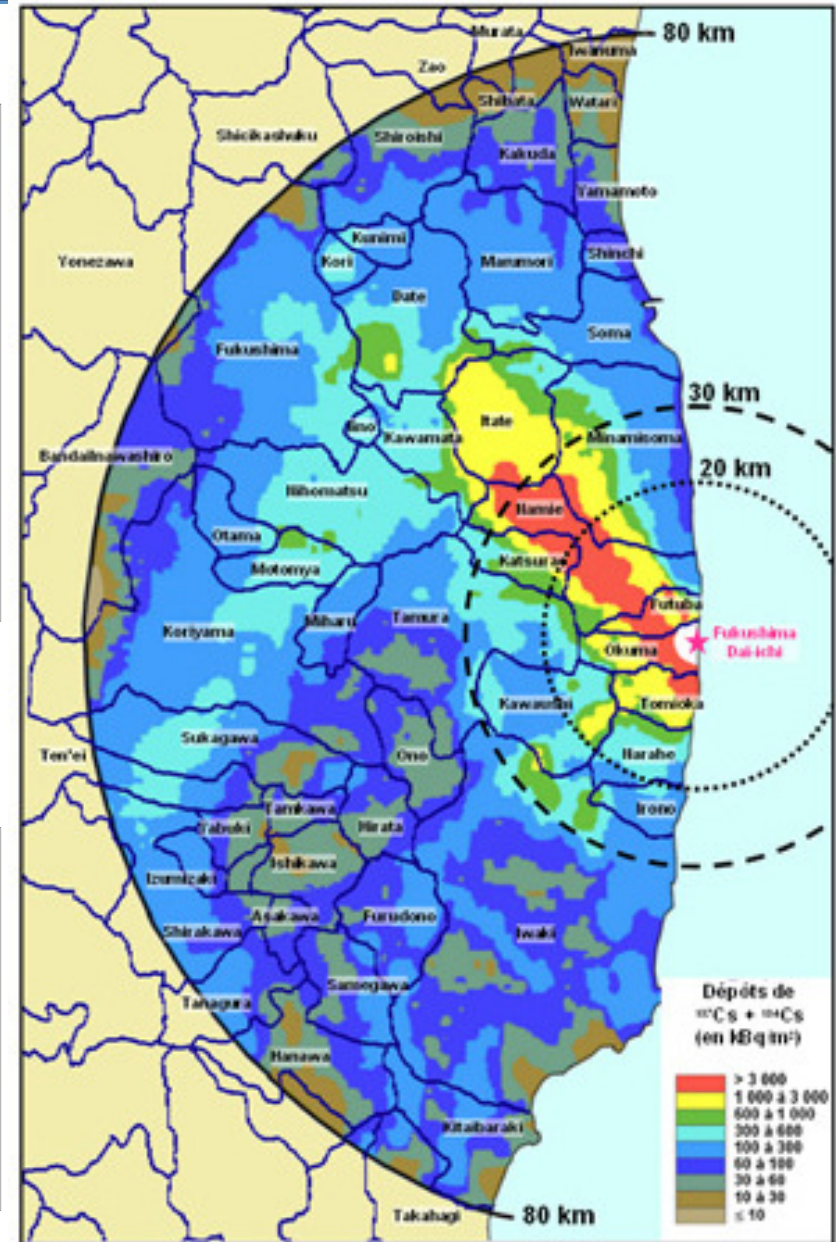
- Exposition des pop. locales via la chaîne alimentaire

Objectif

➤ Prédire ^{137}Cs dans les légumes feuilles au cours du temps

➤ Etudier l'impact sur les prédictions de

- Variabilité spatiale des dépôts
- Paramètres radioécologiques incertains

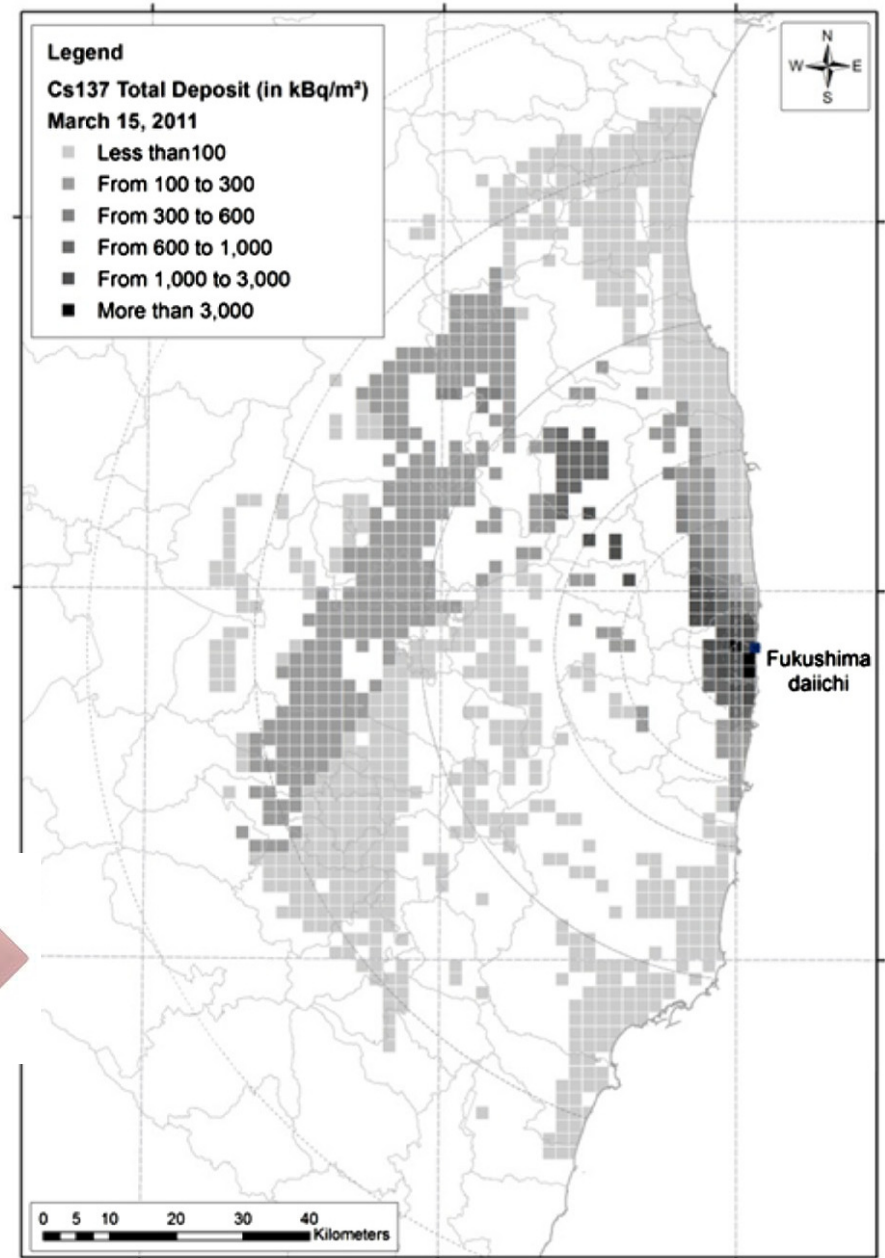
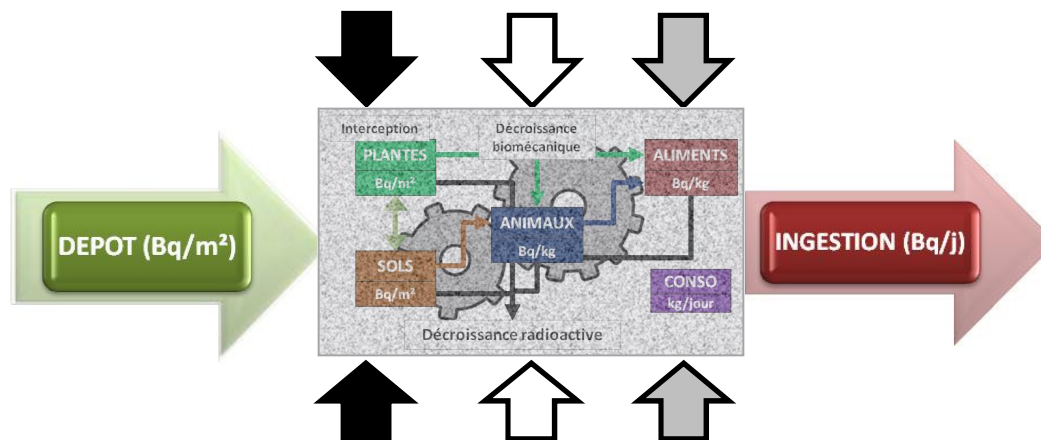


Source Médiathèque IRSN.fr

Variabilité spatiale sur les parcelles agricoles

- **Activité totale ^{137}Cs déposée ($\text{kBq}\cdot\text{m}^{-2}$)**
- **Proportion de dépôt sec (et humide donc)**

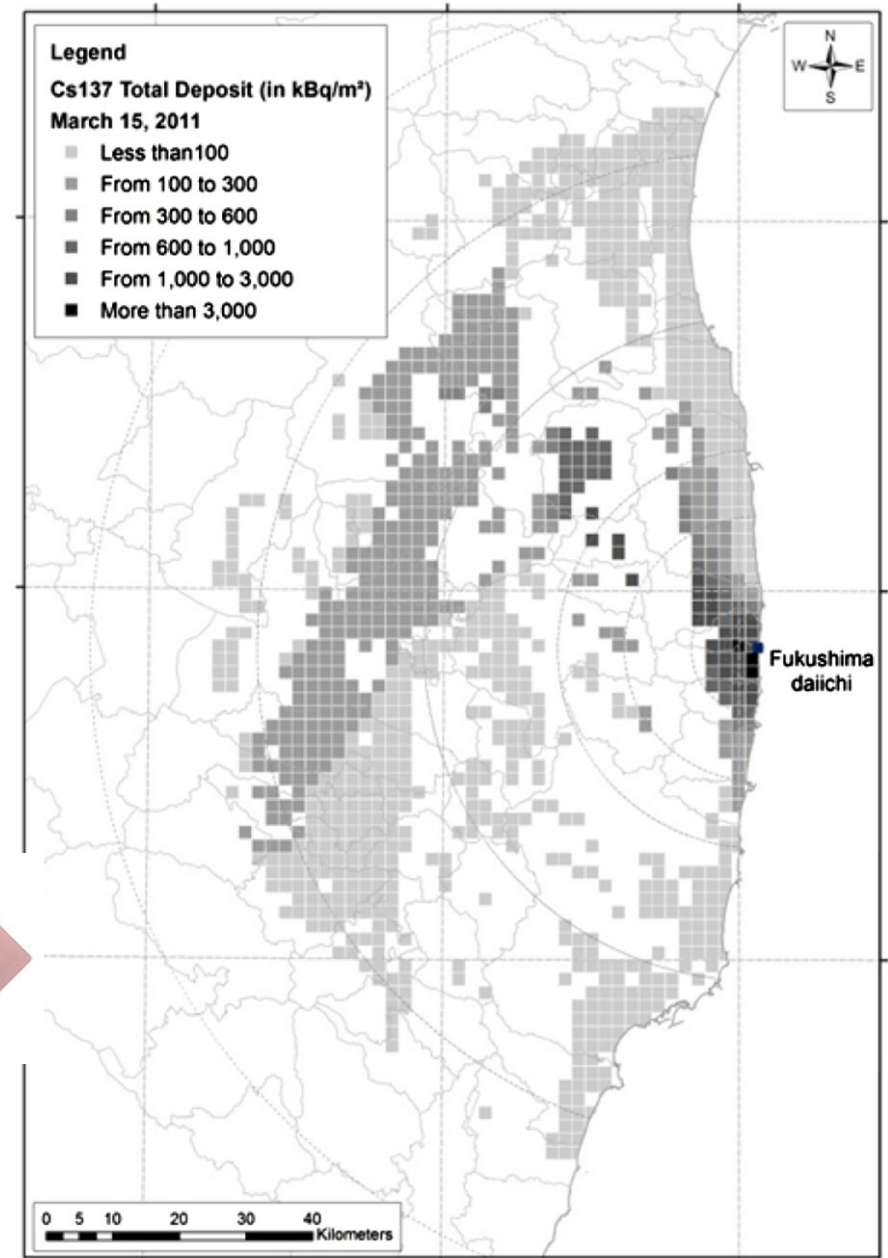
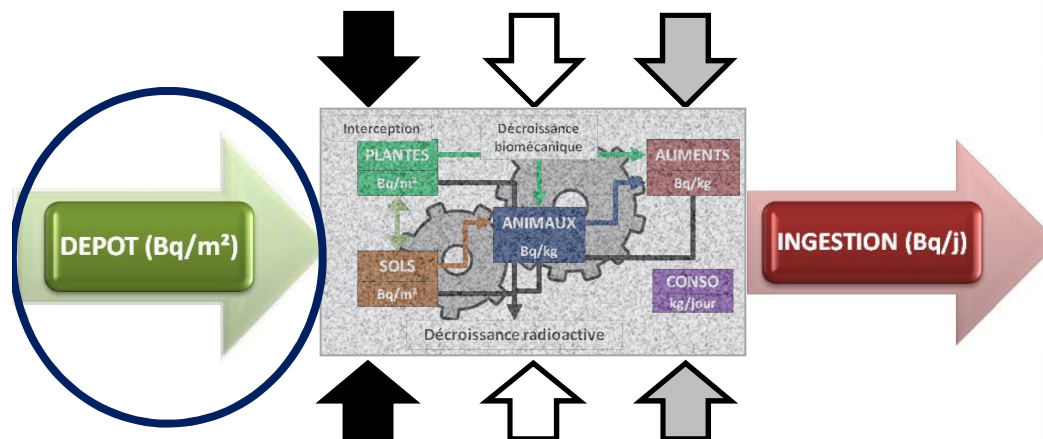
Approche développée par **Gonze *et al.*, (2014)** et basée sur des mesures Japonaises **80km** autour de la centrale de Fukushima (mesures ramenées au 15 Mars 2011).



Variabilité spatiale sur les parcelles agricoles

- **Activité totale ^{137}Cs déposée ($\text{kBq}\cdot\text{m}^{-2}$)**
- **Proportion de dépôt sec (et humide donc)**

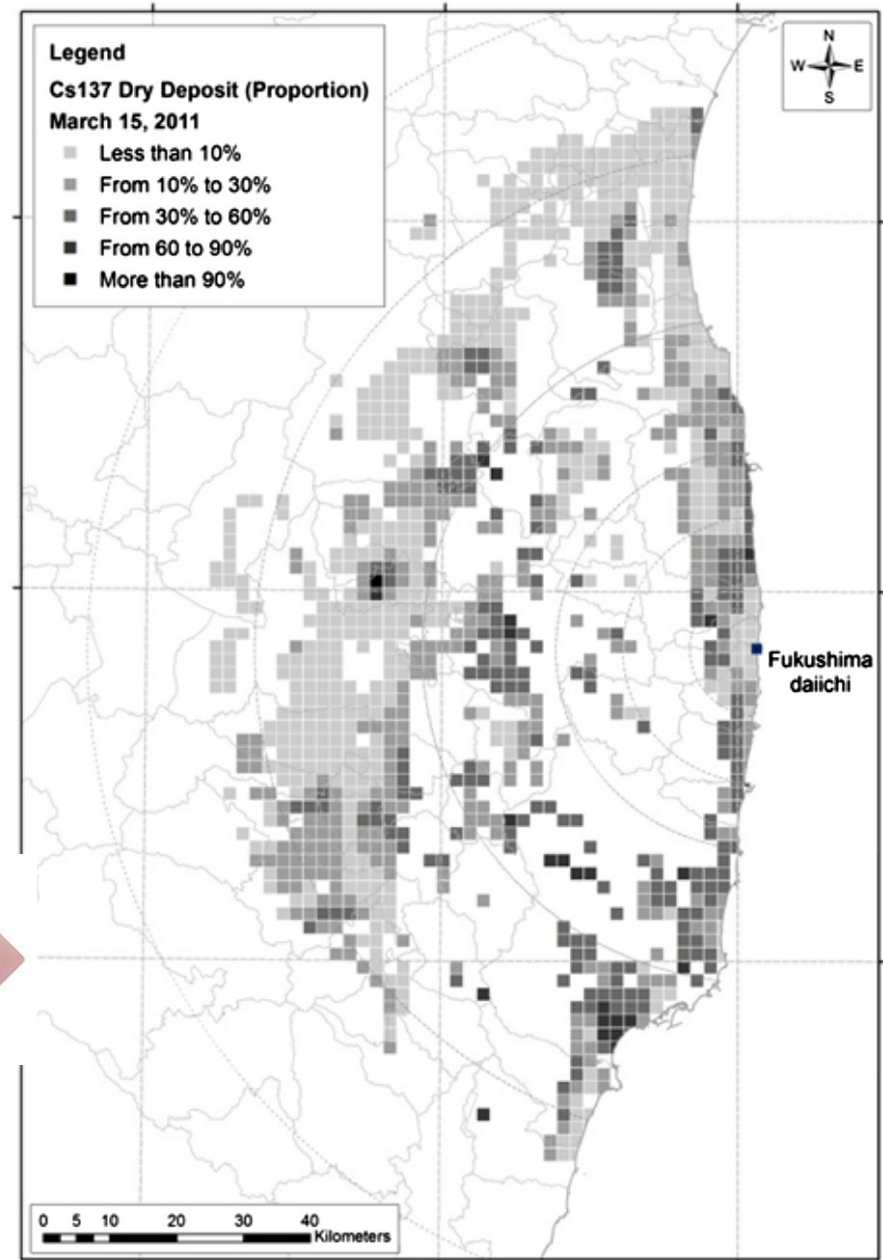
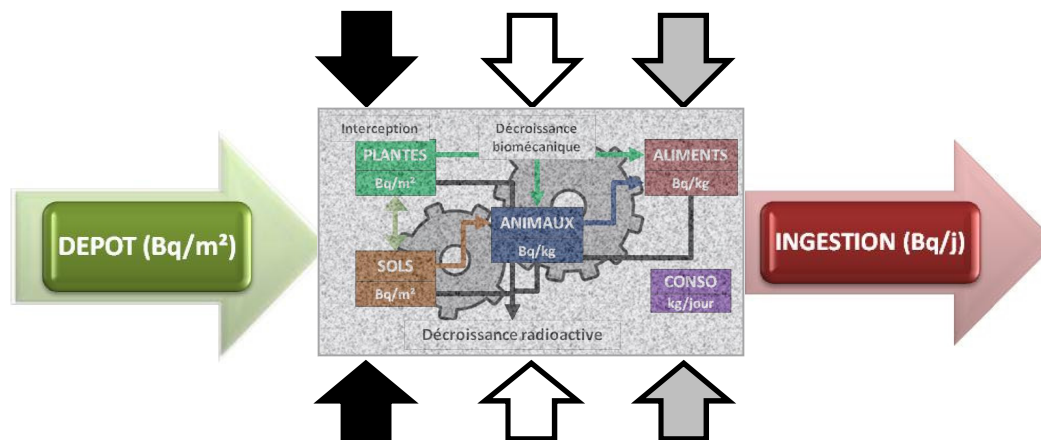
Approche développée par **Gonze *et al.*, (2014)** et basée sur des mesures Japonaises **80km** autour de la centrale de Fukushima (mesures ramenées au 15 Mars 2011).



Variabilité spatiale sur les parcelles agricoles

- **Activité totale ^{137}Cs déposée ($\text{kBq}\cdot\text{m}^{-2}$)**
- **Proportion de dépôt sec (et humide donc)**

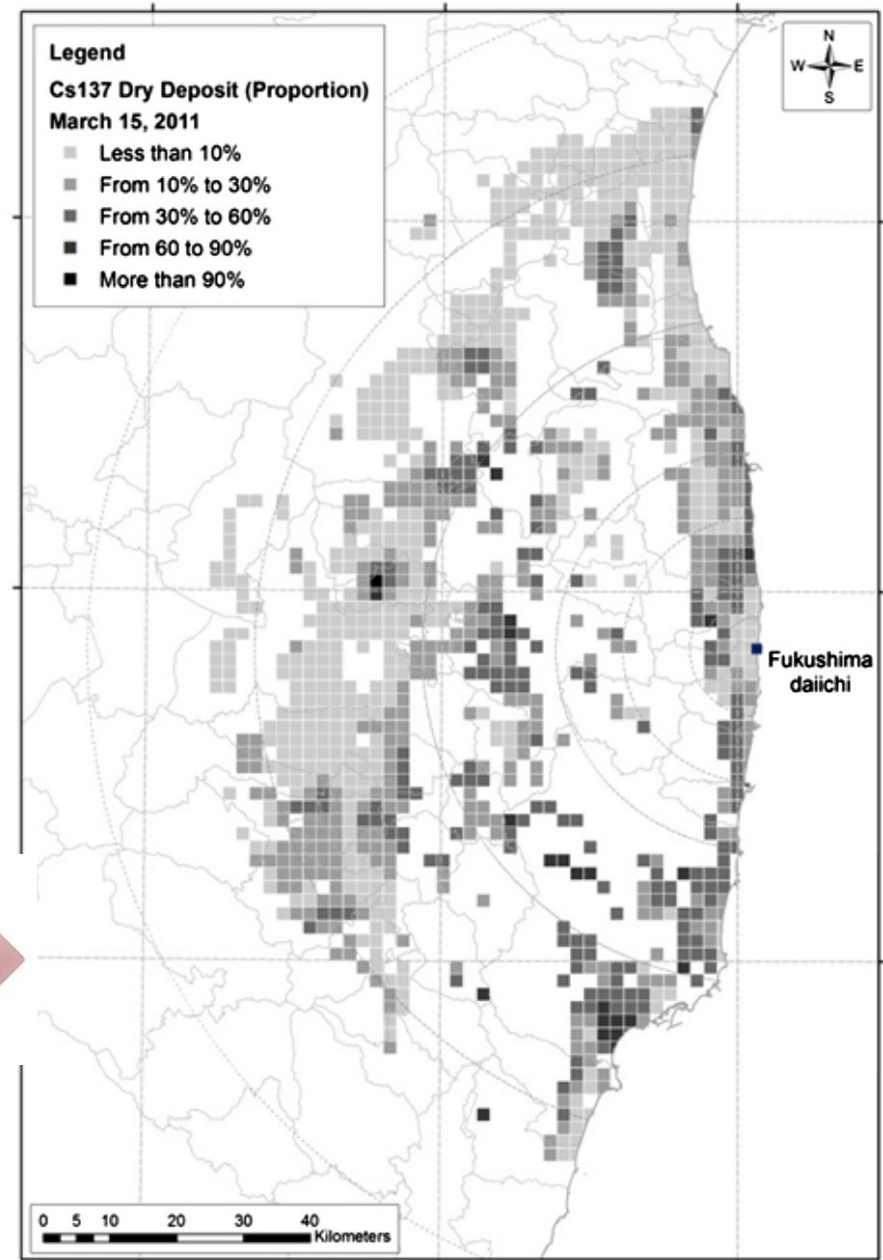
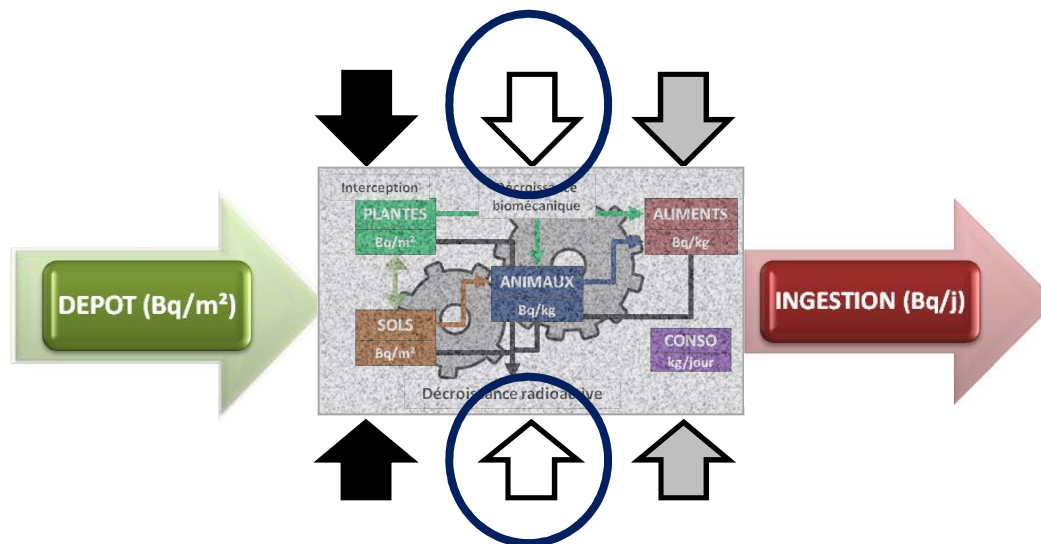
Approche développée par **Gonze *et al.*, (2014)** et basée sur des mesures Japonaises **80km** autour de la centrale de Fukushima (mesures ramenées au 15 Mars 2011).



Variabilité spatiale sur les parcelles agricoles

- **Activité totale ^{137}Cs déposée ($\text{kBq}\cdot\text{m}^{-2}$)**
- **Proportion de dépôt sec (et humide donc)**

Approche développée par **Gonze *et al.*, (2014)** et basée sur des mesures Japonaises **80km** autour de la centrale de Fukushima (mesures ramenées au 15 Mars 2011).



Paramètres radioécologiques

▪ Facteur d'interception sèche

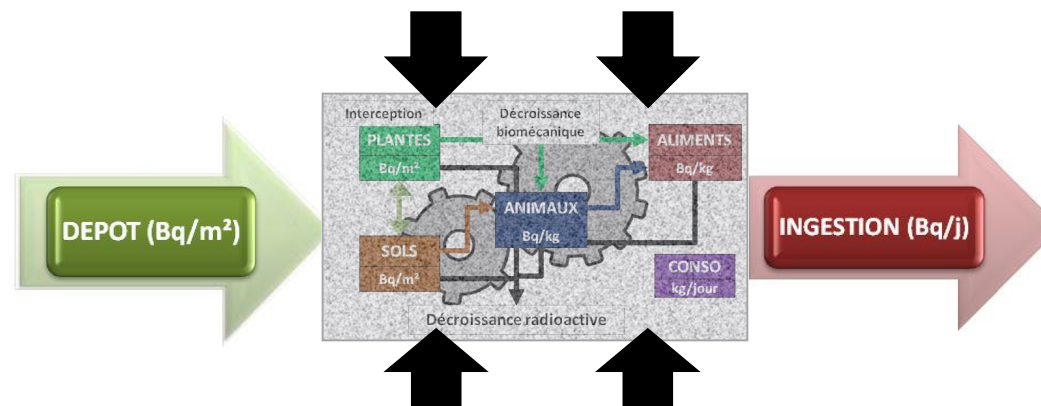
Distribution **Log-Normale** dérivée par méta-analyse de données de la littérature.

(Sy *et al.*, 2015)

▪ Facteur d'interception humide

Idem interception sèche.

(Gonze *et Sy*, In Revision)



▪ Paramètre « perte au champs »

Distribution **Triangulaire** définie à partir de données de la littérature.

Projet COMET

▪ Kd (coefficient de partition sols)

▪ Facteur de transfert sol-plante

Distributions Log-Normales définies sur la base du **TRS472**.

(Simon-Cornu *et al.*, 2015)

Paramètres radioécologiques

▪ Facteur d'interception sèche

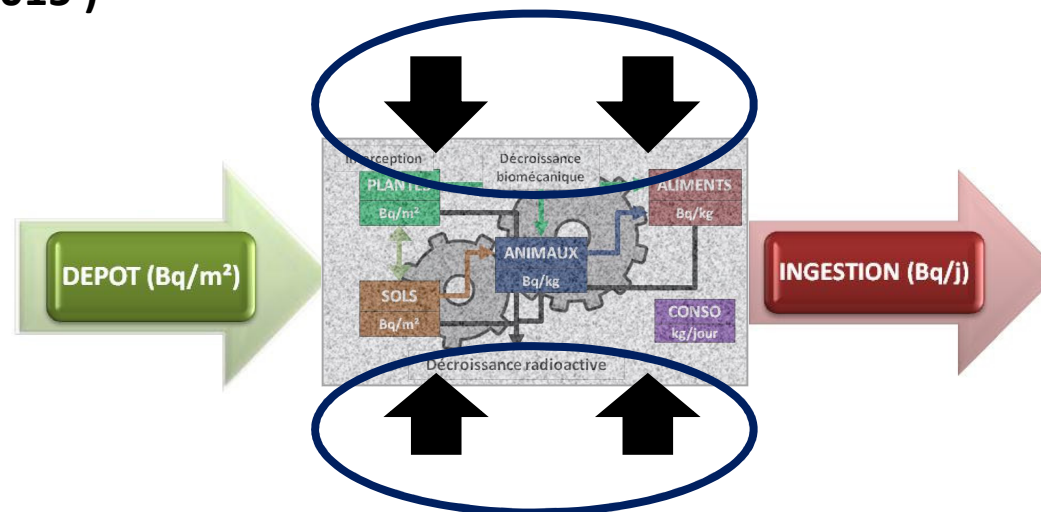
Distribution **Log-Normale** dérivée par méta-analyse de données de la littérature.

(Sy *et al.*, 2015)

▪ Facteur d'interception humide

Idem interception sèche.

(Gonze *et Sy*, In Revision)



▪ Décroissance biomécanique

Distribution **Triangulaire** définie à partir de données de la littérature.

Projet COMET

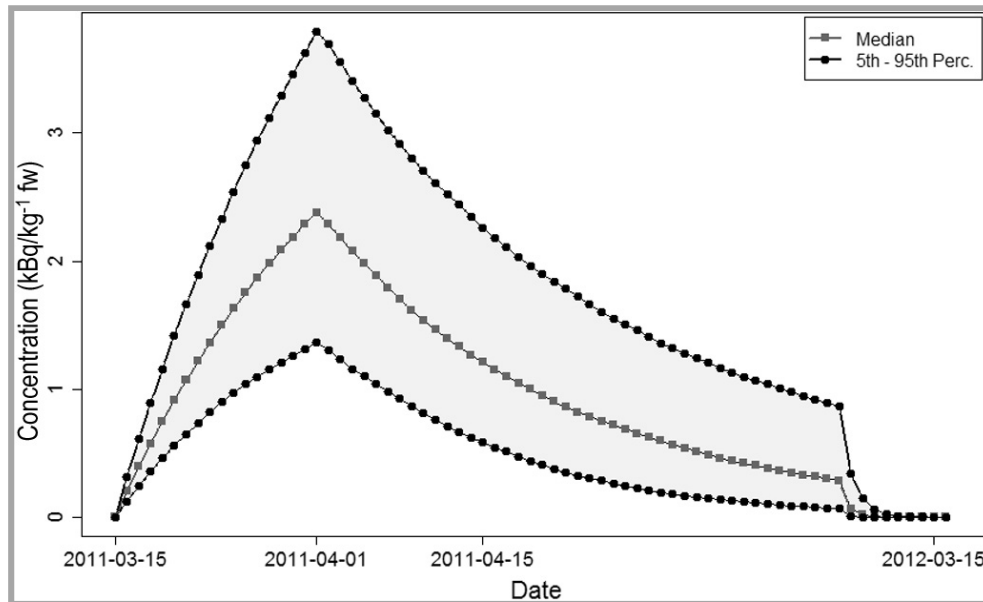
▪ Kd (coefficient de partition sols)

▪ Facteur de transfert sol-plante

Distributions Log-Normales définies sur la base du **TRS472**.

(Simon-Cornu *et al.*, 2015)

Résultats : Analyse d'Incertitude

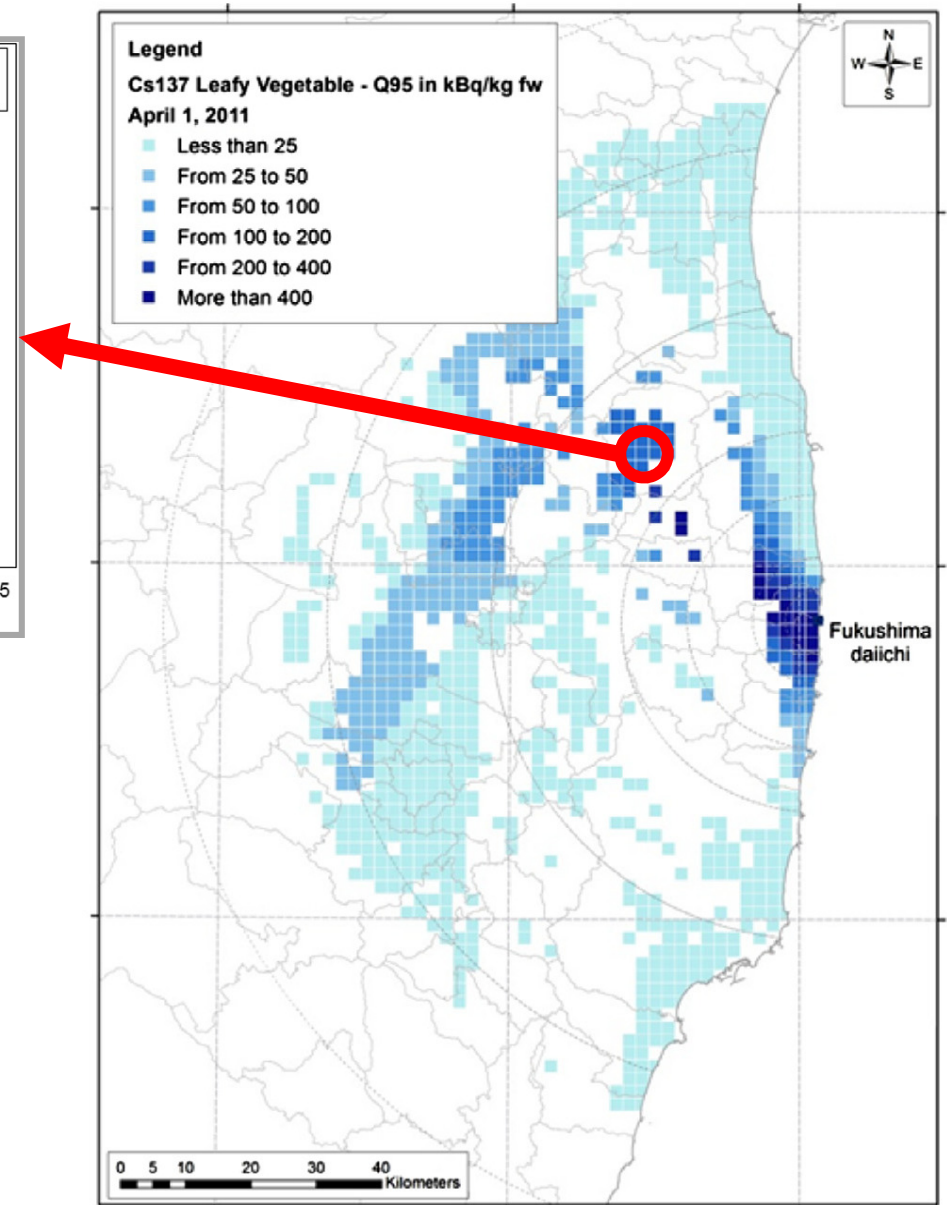


Lecture tridimensionnelle de la variation des concentrations de ^{137}Cs dans les légumes feuille.

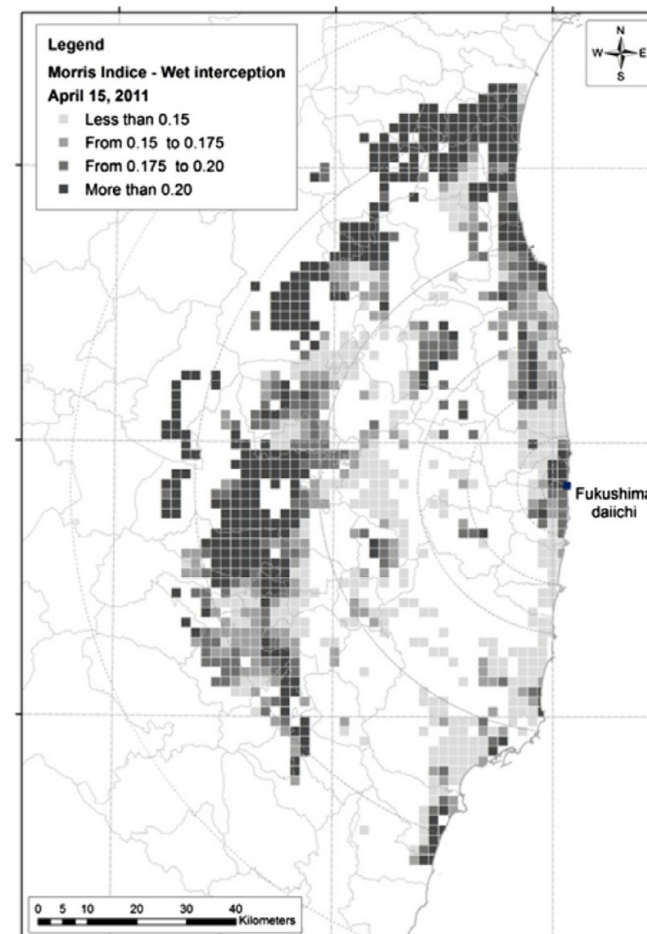
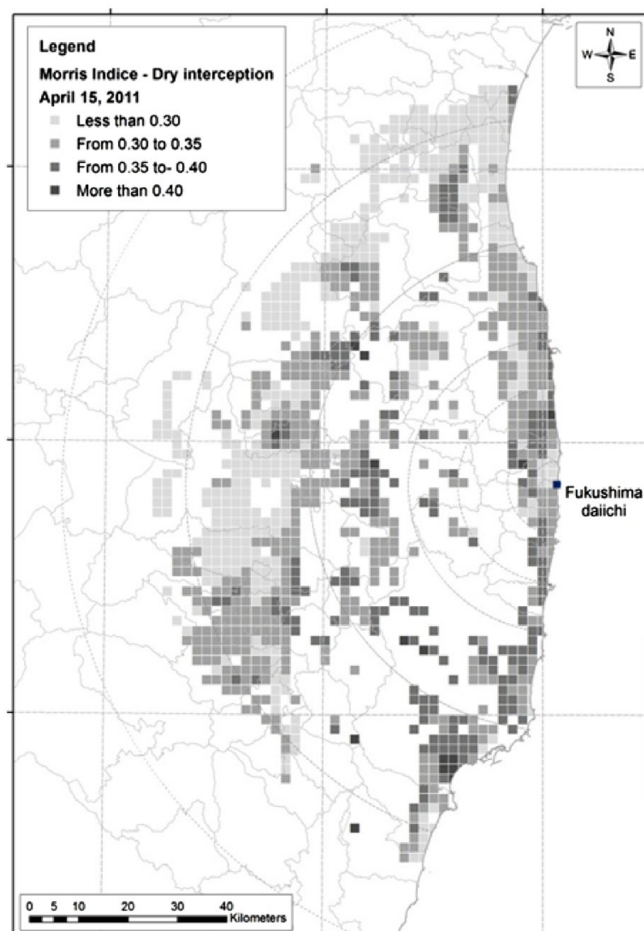
Temps

Espace

Incertitude



Résultats : Analyse de Sensibilité



Influence **localisée** de l'interception foliaire



Influence de la nature des dépôts