

Faire avancer la sûreté nucléaire

Simuler les transferts de radionucléides dans l'environnement : quels codes de calcul et pourquoi faire ?

Marie Simon-Cornu

Christophe Mourlon

IRSN/PRP-ENV/SERIS/LM2E

Communication invitée aux 5èmes journées scientifiques francophones « CODES DE CALCUL EN RADIOPROTECTION, RADIOPHYSIQUE ET DOSIMÉTRIE »



CONTEXTE

L'environnement : un ensemble

- de composantes, physiques et biologiques,

- d'interactions, naturelles ou induites par l'homme, entre et au sein de ces

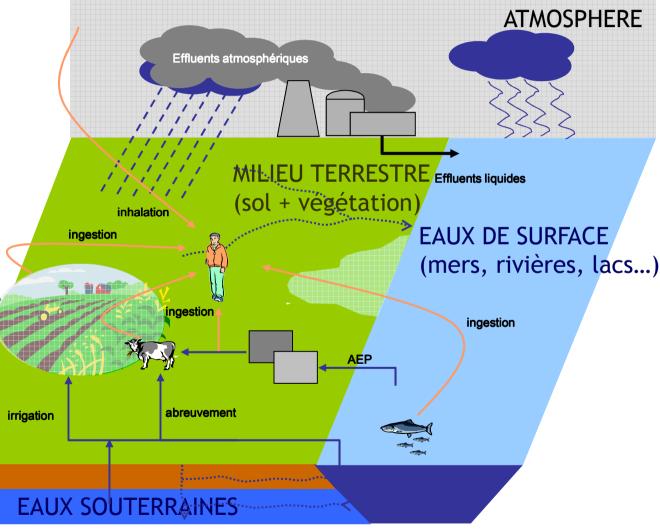
composantes

 \Rightarrow dispersion des polluants

⇒ à localiser & quantifier pour évaluer :

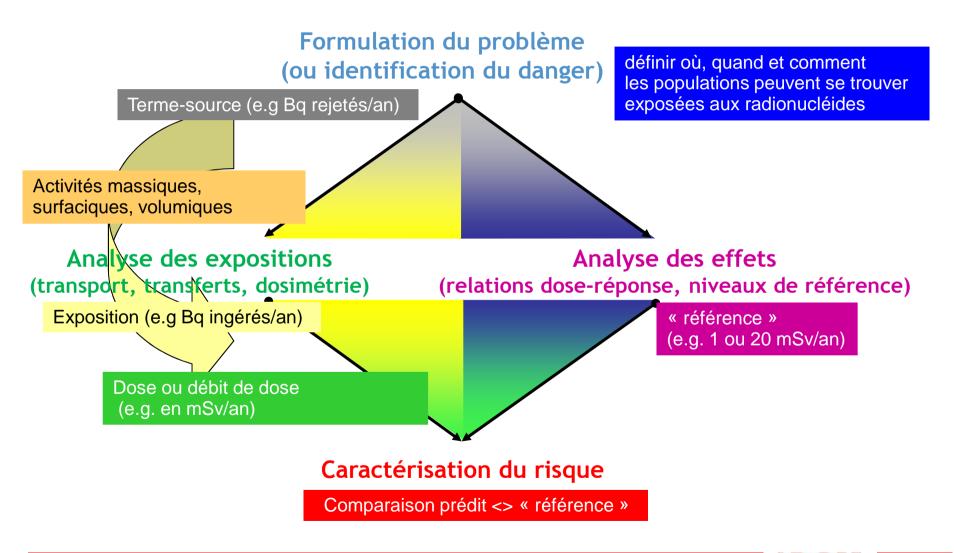
① Impact aux populations humaines

② Impact aux écosystèmes



SFRP - 25 mars 2014 2/30

7 Rappel méthodologique sur évaluation des risques



SFRP - 25 mars 2014 3/30

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 et/ou aux écosystèmes
 - Débits de dose (Gy/h, Sv/an...)
 - Doses (Gy ou Sv)

Scenarios

- Fonctionnement **normal**, incidentel ou **accidentel** d'installations nucléaires
- Multi-rejets : atmosphérique, aquatique fluvial et marin
- Multi-milieux : 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)

Quels codes de calcul et pour quoi faire?

- Fonction de l'évaluateur et de la disponibilité du code :
 - Codes développés/utilisés par CEA, AREVA, ANDRA, IRSN/EDF...
 - Codes libres (e.g. développés sous l'égide de l'AIEA ou de l'Europe)
 - Codes commerciaux
- Fonction du besoin de l'évaluateur :
 - Screening
 - Expertise
 - Recherche
- Fonction du contexte :
 - Quelle situation : chronique ou accidentelle ?
 - Quel délai de réponse attendu : crise ou hors crise ?
- Fonction du scenario :
 - Quel(s) rejet(s): réels ou théoriques ? liquides et/ou atmo ?
 - Quel(s) milieu(x)?
 - Quelle(s) voie(s) d'exposition ?

Adapter la complexité à l'enjeu

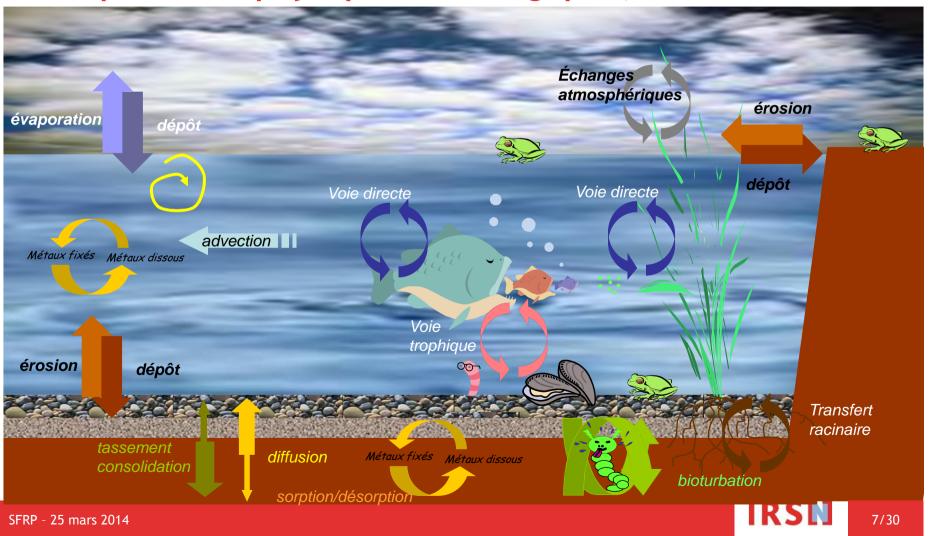
Matrice de transfert (impact homme)

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

SFRP - 25 mars 2014 6/30

Milieux aquatiques

7 Des processus physiques et biologiques, et des interfaces



Modèles les plus simples

CR ou CF (L.kg⁻¹ poids frais) =
$$\frac{\text{concentration organisme (Bq.kg}^{-1} \text{ poids frais)}}{\text{concentration eau (Bq.L}^{-1})}$$

$$Kd = \frac{\text{concentration dans les sédiments (Bq.kg}^{-1} \text{ poids sec)}}{\text{concentration dans la phase dissoute (Bq.L}^{-1})}$$

Dose aux poissons

• F(i,o) débit de dose reçu par un organisme donné o exposé à une concentration unitaire d'un radionucléide donné i

$$F(i,o) = DCC_{int}(i,o) \cdot \underbrace{CR(i,o) + 0.5 \cdot DCC_{ext}(i,o) \cdot \left(1 + a \cdot K_d(i)\right)}_{a : 0/1 \ pour \ les \ organismes \ p\'elagiques/benthiques}$$

DCC: « coefficients de conversion de dose » en Gy/h par Bq/kg frais

Calculs mis en œuvre dans ERICA (logiciel libre, développé sur financements européens - calculs à l'équilibre, impact dosimétrique aux écosystèmes)

Dose ingestion poissons (homme)

 F(i,o) débit de dose reçu par un consommateur de poissons o exposé à une concentration unitaire d'un radionucléide donné i (consommation exprimée en kg/jour)

$$F(i,o)=DC_{int}(i)$$
 . $CR(i,o)$. Consommation (o)

DC: « coefficient de dose » en Sv/Bq

Calculs similaires mis en œuvre (a minima) dans de très nombreux codes de calcul d'impact dosimétrique aux populations humaines

Incertitudes paramétriques

```
CR ouCF(L.kg<sup>-1</sup> poids frais) = \frac{\text{concentration organisme (Bq.kg}^{-1} \text{ poids frais)}}{\text{concentration eau (Bq.L}^{-1})}
```

Quelques ordres de grandeur des incertitudes paramétriques :

Cs: Lognormal (GM=3000, GSD=2.6)

I: Lognormal (GM=650,GSD=2.1)

U: Lognormal (GM=2.4,GSD=11)

$$Kd = \frac{\text{concentration dans les sédiments (Bq.kg}^{-1} \text{ poids sec)}}{\text{concentration dans la phase dissoute (Bq.L}^{-1})}$$

Quelques ordres de grandeur des incertitudes paramétriques :

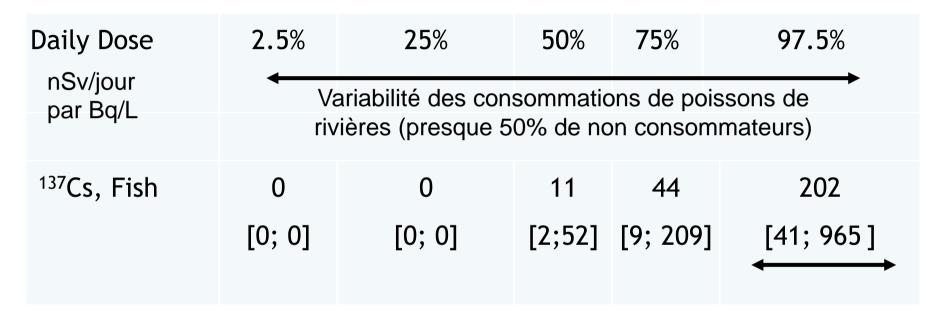
Cs: Lognormal (GM=29000, GSD=5.9)

I: Lognormal (GM=4400, GSD=14)

U: Lognormal (GM=50, GSD=1.6)

1**K** 5 N 11/30

Incertitude (paramétrique sur CR) et variabilité des consommations



Effet de l'incertitude sur CR (Monte Carlo)

SFRP - 25 mars 2014 12/30

Modèles de complexité croissance

Transfert abiotique

Prendre en compte zone de mauvais mélange Prendre en compte diamètre des matières en suspension Complexifier modèle sédimentaire

Transfert biotique

Prendre en compte ½ vie biologique Prendre en compte chaîne trophique (plancton-poissons)

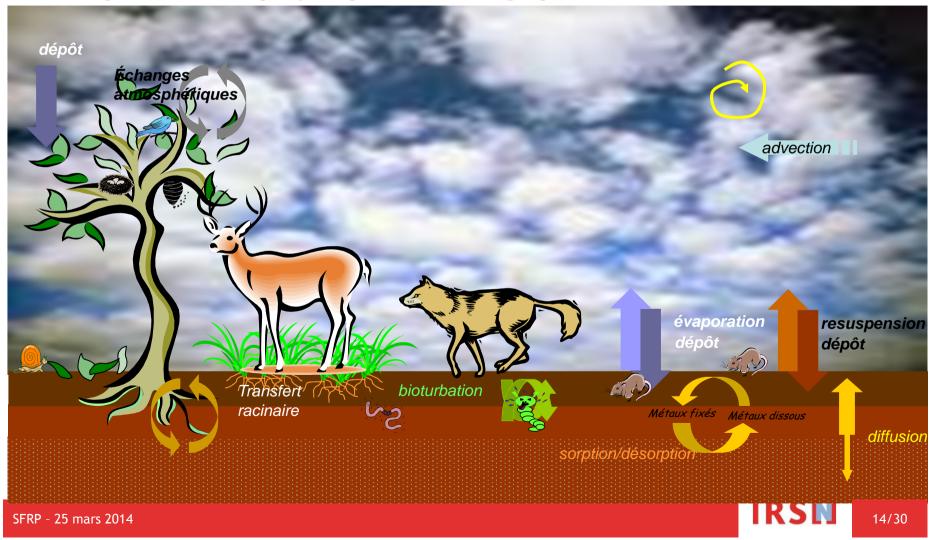
Dosimétrie

Remplacer DCC par modèle dosimétrique

SFRP - 25 mars 2014 13/30

Milieu terrestre

Des processus physiques, biologiques et des interfaces!



Transfert à l'équilibre (cas d'ERICA)

Facteurs de concentration

- Terrestre
 - Expression générale

$$CR = \frac{concentration\ organisme\ corps\ entier\ (Bq.kg^{-1}\ poids\ frais)}{concentration\ sol\ (Bq.kg^{-1}\ poids\ sec)}$$

■ RN "gazeux": ³H, ¹⁴C, ³²P, ³⁵S

$$CR = \frac{\text{concentration organisme corps entier (Bq.kg}^{-1} \text{ poids frais)}}{\text{concentration air (Bq.m}^{-3})}$$

Les facteurs de transfert (ERICA) Am

Bilan de l'existant

- De très nombreuses combinaisons
 - 31 éléments par défaut
 - 38 organismes de référence pré-définis

- Des situations très contrastées
 - En fonction du milieu
 - En fonction de l'organisme
 - En fonction de l'élément

Ag Am	(CA)	Am
С		AIII
Cd	Cd	Cd
Се		
CI		
Cm		
Co		Co
Cs	Cs	Cs
Eu		
Н		
I		
Mn		Mn
Nb		
Ni		Ni
Np		
Р		
Pb	Pb	Pb
Ро		Ро
Pu		Pu
Ra		Ra
Ru		
S		
Sb		
Se		Se
Sr —	Sr -	Sr
Tc	Тс	
Te		Th
Th		Th
U Zr		U
4 1		

Les facteurs de trar

→ Bilan de l'existant

- De très nombreuses combinaisons
 - 31 éléments par défaut
 - 38 organismes de référence ¡

- Des situations très contrastées
 - En fonction du milieu
 - En fonction de l'organisme
 - En fonction de l'élément

↗ Encore de nombreuses l

able 4 in overview of the marine CR database

	Malg	Biv	Fish	Phy	Crus	Zoo	Worm	Mam	Anem	VasP	Bird	Rept
Cs												1
Pu										1		1
Co										- 1	2	2
Sr										1	2	2
Mn									1		2	2
Po								-	2	1	2	2
Cd									1	1	2	2
Ag									1	1	2	2
Zr							1	2			2	2
Se						3				1	2	2
С								1	1	1	2	2
Ni								2	1	1	2	2
Р								1	1	1	2	2
Pb							1		2	1	2	2
-1							1	1	1	1	2	2
Ce						3	1	2			2	2
S						3			1	1	2	2
Am						3	1	5		1	5	6
Ra							1	8	5	1	2	2
Ru						3	1	2	3.0	1	2	2
U					3	3	1	8			8	11
Sb				3			1	2		1	2	2
Tc						3	1	8	2	1	2	2
Th					3		1	8	5	1	8	11
CI				3		3	1	1	1	1	2	2
Np			3		3		1	8	5	1	11	11
Eu				5	3	3	1	2	5	1	2	2
Cm			3		5	5	5	5	5	1	5	6
Nb			5	3		5	1	7	5	1	7	7
Te	3	3	3		3	3	1	2	2	1	2	2
Н	3	3	3	3	3	3	1	2	2	1	2	2

The numbers given in the blank cells refer to the codes presented in Table 3 which indicates the approach used to provide data for the given radionuclide—biota intersect. The tinted cells represent cases for which data are available and the colour codes are used to give an impression of the amount of data found.

Table 5

An overview of the freshwater CR database

Element	VasP	PeFi	BeFi	Crus	Biv	Phy	Gast	Larv	Zoo	Amph	Bird	Mam
Cs					-			2				2
1							1				2	2
Co						3					2	2
Am						3			3	2		2
Ra								2	2	2	2	2
Sr							1	2		2	2	2
Mn						10			11	2	2	2
U					3		3	2		2	2	2
Pu					3		3	2		11	3	3
Po			1					2	2	2	2	2
Cm			1	5	1				2		2	2
Sb	1			2	10		1	2		2	2	2
Ce			1				1	2	2	2	2	2
Zr		3	3			10	1		11	2	2	2
Ru				9	9		9	9	3	2	2	2
Cd		1				10	1	2	2	2	2	2
Р	3	1			1	3		2	3	2	2	2
S		3	3			1	1	2	11	2	2	2
CI		1			1	1	_1_	2	11	2	2	2
Ag			i i	10	10	10	11	11	10	2	2	2
Th				3	3	3	3	11	3	2	2	2
Ni		3	3	10	10		11	11	2	2	2	2
Nb		3	3	2		10	1	2	11	2	2	2
Tc	3			3	3	3	3	11	3	2	2	2
Te	11			10	10	10	11	11	10	2	2	2
Eu	5	1	3	5		5	1	11	5	2	2	2
Np	5		1	11	11	5	11	11	5	2	2	2
Se		3	3	10	10	10	11	11	10	2	2	2
Ph	HPA	A	3	10	10	10	11	11	10	2	2	2
JEC.			3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
C	3	3	3	3	3	3	1	2	3	9	9	9
	N≤10		10 <n<20< td=""><td></td><td>N≥20</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>10</td><td></td><td>•</td></n<20<>		N≥20					10		•

The numbers given in the blank cells refer to the codes presented in Table 3 which indicates the approach used to provide data for the given radionuclide—biota intersect. The tinted cells represent cases for which data are available and the colour codes are used to give an impression of the amount of data found.



Les facteurs de transfert (ERICA)

Les 11 méthodes d'extrapolation proposées

- Taxonomie similaire (plante vasculaire <- macroalgue)</p>
- Organisme de référence similaire (reptile <- vertébré (mammifère))</p>
- Dérivation à partir de modèles d'activité spécifique
- Biogéochimie similaire (Cm <- actinide (Pu))
- Allométrie ou autre modèle (Th, oiseau <- modèle biocinétique)</p>
- Valeur la plus haute disponible
- •••

7 Toujours de nombreuses hypothèses

1**K** 5 N 18/30

Trois grandes familles de codes

- Codes utilisant des modèles 'à l'équilibre'
 - Equations statiques ('règles de trois')
 - Type de scenario traité : rejet constant, liquide OU atmosphérique
 - Adapté au screening, ou à l'expertise dans des cas simples (rejet en 'plateau')
 - Quelques exemples (non exhaustif): CROM, ERICA...
- Codes supposant un pic unique de contamination
 - Equations analytiques (« décroissance» post-accidentelle)
 - Type de scenario traité : rejet ponctuel ('pic'), atmosphérique
 - Adapté au screening, ou à l'expertise dans des cas simples (rejet en 'pic')
 - Quelques exemples (non exhaustif): ASTRAL, RODOS...
- Codes (ou plate-formes) flexibles
 - Equations différentielles (solveur numérique)
 - Type de scenario traité : toutes situations
 - Adapté à l'expertise dans des cas complexes ou à la recherche
 - Quelques exemples (non exhaustif): SYMBIOSE, ECOLEGO...

SFRP - 25 mars 2014 IRSN 19/30

Trois grandes familles de codes

- Codes utilisant des modèles 'à l'équilibre'
 - Equations statiques ('règles de trois')
 - Type de scenario traité : rejet constant, liquide OU atmosphérique
 - Adapté au screening, ou à l'expertise dans des cas simples (rejet en 'plateau')
 - Quelques exemples (non exhaustif): CROM, ERICA...
- Codes supposant un pic unique de contamination
 - Equations analytiques (« décroissance» post-accidentelle)
 - Type de scenario traité : rejet ponctuel ('pic'), atmosphérique
 - Adapté au screening, ou à l'expertise dans des cas simples (rejet en 'pic')
 - Quelques exemples (non exhaustif): ASTRAL, RODOS...
- Codes (ou plate-formes) flexibles
 - Equations différentielles (solveur numérique)
 - Type de scenario traité : toutes situations
 - Adapté à l'expertise dans des cas complexes ou à la recherche
 - Quelques exemples (non exhaustif): SYMBIOSE, ECOLEGO...

IRSN 20/30

Trois grandes familles de codes

- Codes utilisant des modèles 'à l'équilibre'
 - Equations statiques ('règles de trois')
 - Type de scenario traité : rejet constant, liquide OU atmosphérique
 - Adapté au screening, ou à l'expertise dans des cas simples (rejet en 'plateau')
 - Quelques exemples (non exhaustif): CROM, ERICA...
- Codes supposant un pic unique de contamination
 - Equations analytiques (« décroissance» post-accidentelle)
 - Type de scenario traité : rejet ponctuel ('pic'), atmosphérique
 - Adapté au screening, ou à l'expertise dans des cas simples (rejet en 'pic')
 - Quelques exemples (non exhaustif): ASTRAL, RODOS...
- Codes (ou plate-formes) flexibles
 - Equations différentielles (solveur numérique)
 - Type de scenario traité : toutes situations
 - Adapté à l'expertise dans des cas complexes ou à la recherche
 - Quelques exemples (non exhaustif): SYMBIOSE, ECOLEGO...

Cas des situations post-accidentelles

- Dès la phase d'urgence :
 - Anticiper la phase post-accidentelle à venir avec une 1ère évaluation pronostique pour le 1er mois (voire la 1ère année) pour une prise de décision précoce sur le zonage post-accidentel (application doctrine CODIRPA)
 - Outil réflexe (e.g. PAZ au Centre Technique de Crise IRSN)
- Au début de la phase post-accidentelle :
 - ➤ Recaler si besoin le zonage post-accidentel en fonction des 1ères mesures
 - ➤ Batterie d'outils :
 - Organisation / analyse des données
 - > Simulation
- Quelques mois après le début de la phase post-accidentelle :
 - Evaluation diagnostique : expertise (et REX)
 - Evaluation pronostique : reconquête des territoires contaminés
 - ➤ Même batterie d'outils

Fit for purpose: Adapter l'outil et son utilisation à la question posée, à l'enjeu, au délai de réponse attendu

IRS 1 22/30

Cas de l'accident de Fukushima

Contexte & objectifs

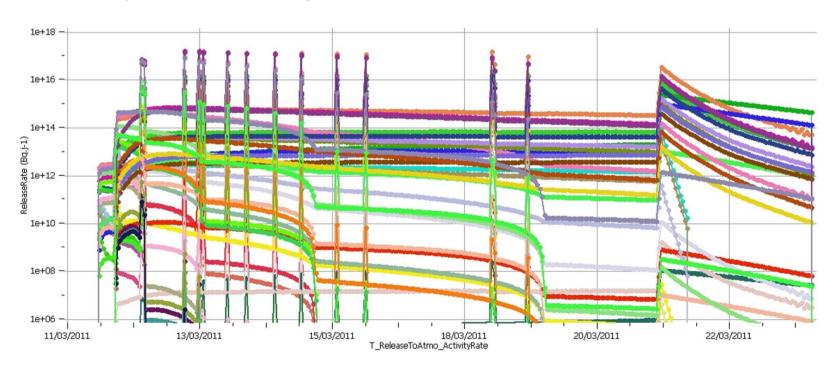
- 1ères simulations (2ème quinzaine mars 2011) réalisées par l'IRSN avec SYMBIOSE
- Tester la faisabilité d'un calcul d'impact en situation de crise réelle
- Consolider notre savoir-faire & expertise
- A précédé des analyses a posteriori :
 - tester les prévisions SYMBIOSE (incertaines) vis à vis des mesures in situ
 - réinterpréter les mesures à la lumière de la modélisation

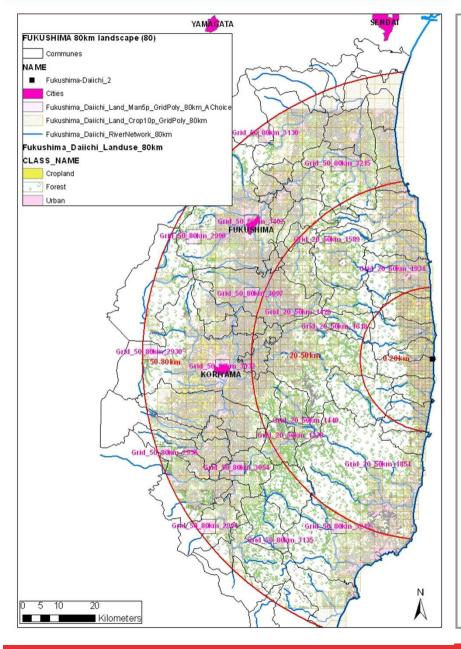
Scénario

- Rejets atmosphériques, en situation accidentelle
- Milieux : atmosphérique, agricole et anthropique (homme)
- Calculs sur 3 mois : du 2011-03-11 au 2011-06-11
- Domaine spatial : rayon 80km (terrestre)
- Calcul de :
 - Activités dans les denrées agricoles
 - Dose externe panache & environnement sur un individu adulte rural

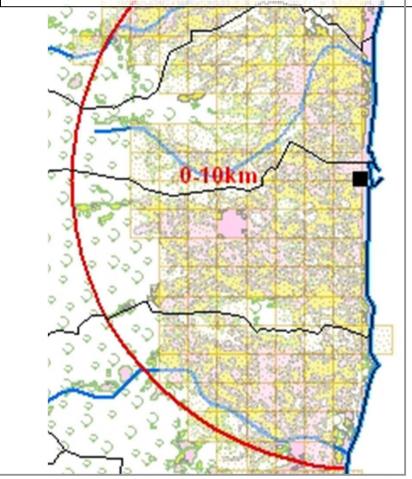
Terme source

- Atmosphérique : TS36 (CTC 23/03/2011)
 - 1 émissaire (barycentre des réacteurs 1 à 4)
 - Spectre avec formes physico-chimiques : 47 RN + 9 RN descendants par filiation (non prise en compte de RN <u>très faiblement</u> émis).
 - Chronique : échantillonnage horaire





Zone agricole: plus de 10% de sa surface est dédiée aux cultures/élévages animaux Zone habitation: plus de 5% de sa surface est consacrée à l'habitat.

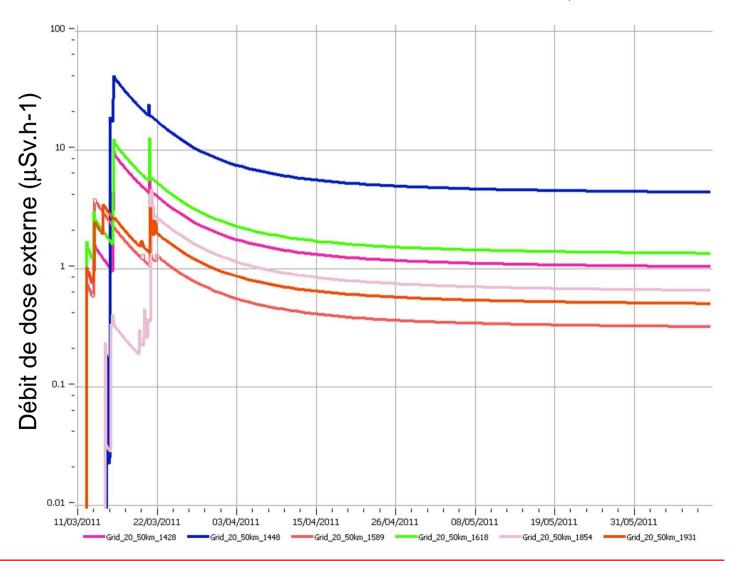


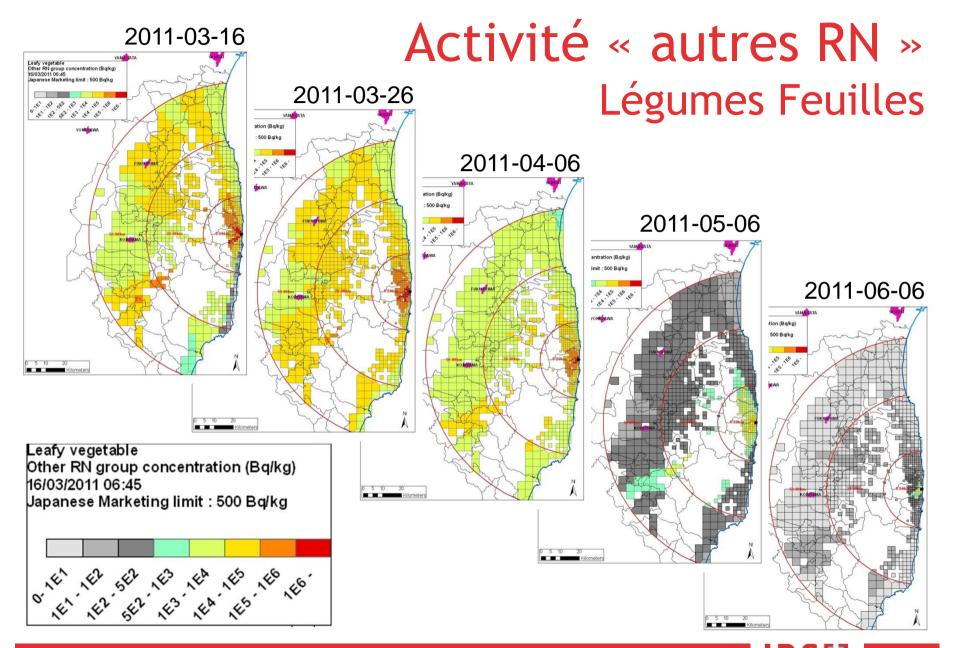
SFRP - 25 mars 2014 25/30

Données site-spécifiques

- Occupation du sol (traitement image satellitaire Landsat)
- Météorologie-Pluviométrie (CTC)
- Données agricoles : aucune information site-spécifique
- Rations alimentaires humaines (enquête nationale japonaise)
- Budget temps humain : aucune information site-spécifique
- Hypothèse a priori sur les interactions spatiales

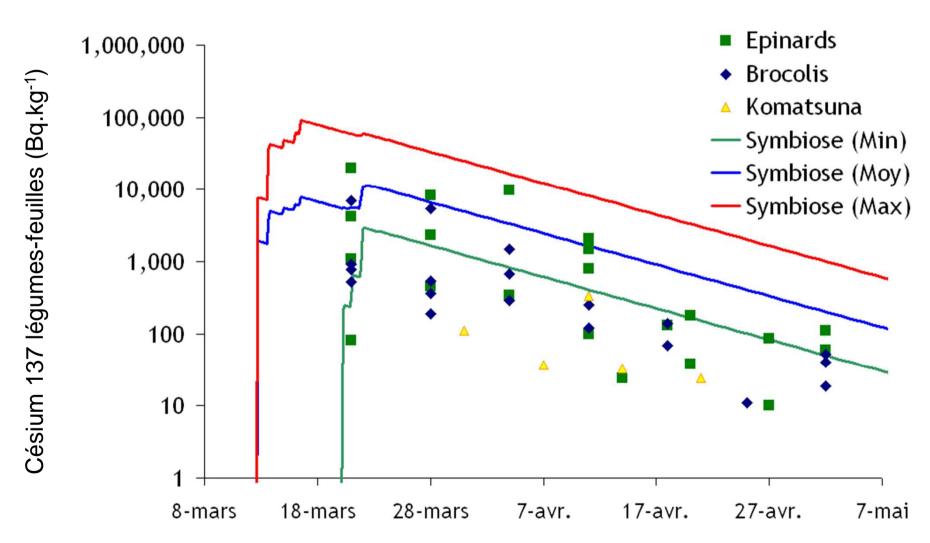
Débits de dose externe (20 à 50 km)





SFRP - 25 mars 2014 28/30

¹³⁷Cs: Légumes Feuilles, 20-50 km



Conclusion

Le « meilleur modèle » n'existe pas sans connaître les contraintes :

- question posée, délai et niveau de réponse attendus
- disponibilité/qualité des données d'entrée en amont
- disponibilité éventuelle de données de validation en aval