



Modélisation de la contamination des produits agricoles et de l'exposition des populations humaines

Cas de l'accident de Fukushima daïichi (Japon)

J.M. Métivier



Plan

Évolution de la modélisation, des documents d'aide à la décision (Puissance calcul)

La radioécologie

Fukushima-daiichi

L'accident de Fukushima

Modélisation SYMBIOSE (paysage, code, interfaçage)

Modélisation du dénombrement de la population

Exemple de «couplage» code de calcul / SIG

Modélisation des activités volumiques dans l'air (France)

Conclusion



IRSN Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

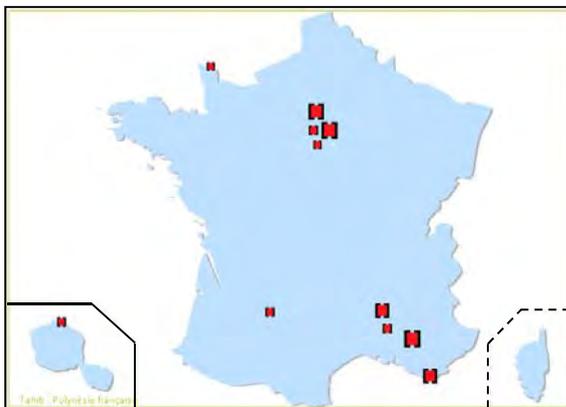
Établissement Public à caractère Industriel et Commercial (~1.700 personnes)

Fusion de deux organismes: IPSN et OPRI (Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire – Office de Protection contre le Rayonnements ionisants)

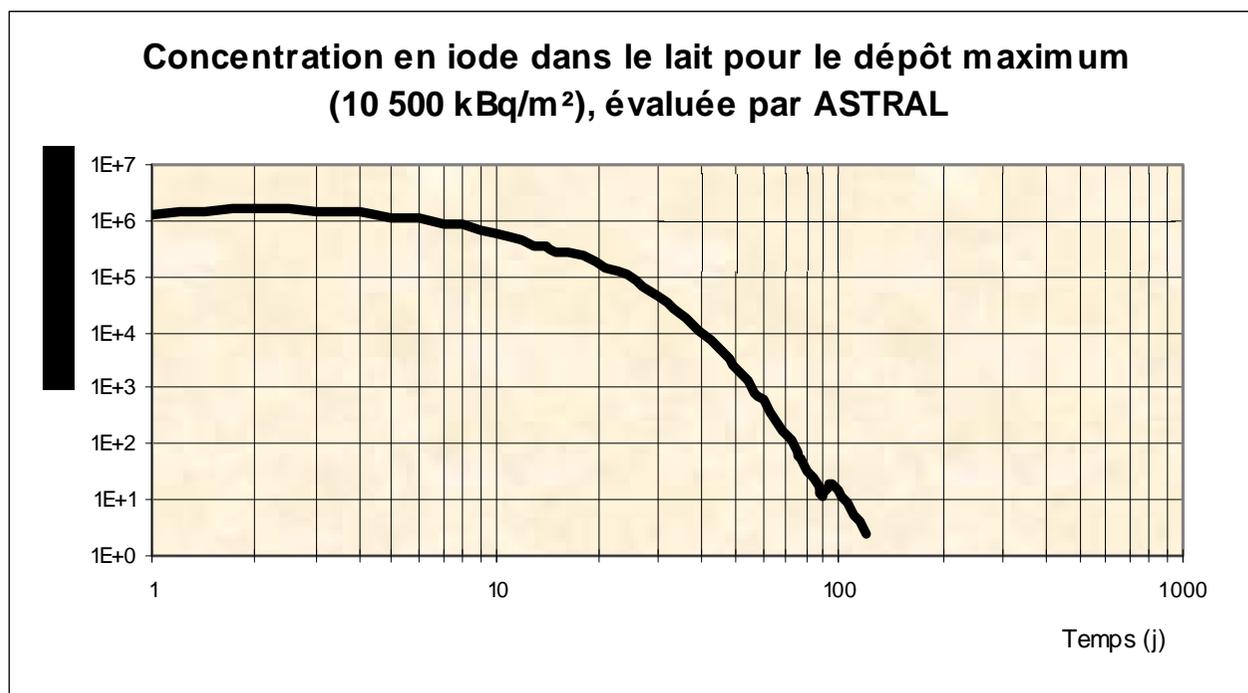
5 tutelles ministérielles: Environnement, Industrie, Santé, Défense, Recherche

Missions de recherche, d'expertise et de service public

Domaines de compétences : sûreté nucléaire, protection, gestion de la crise

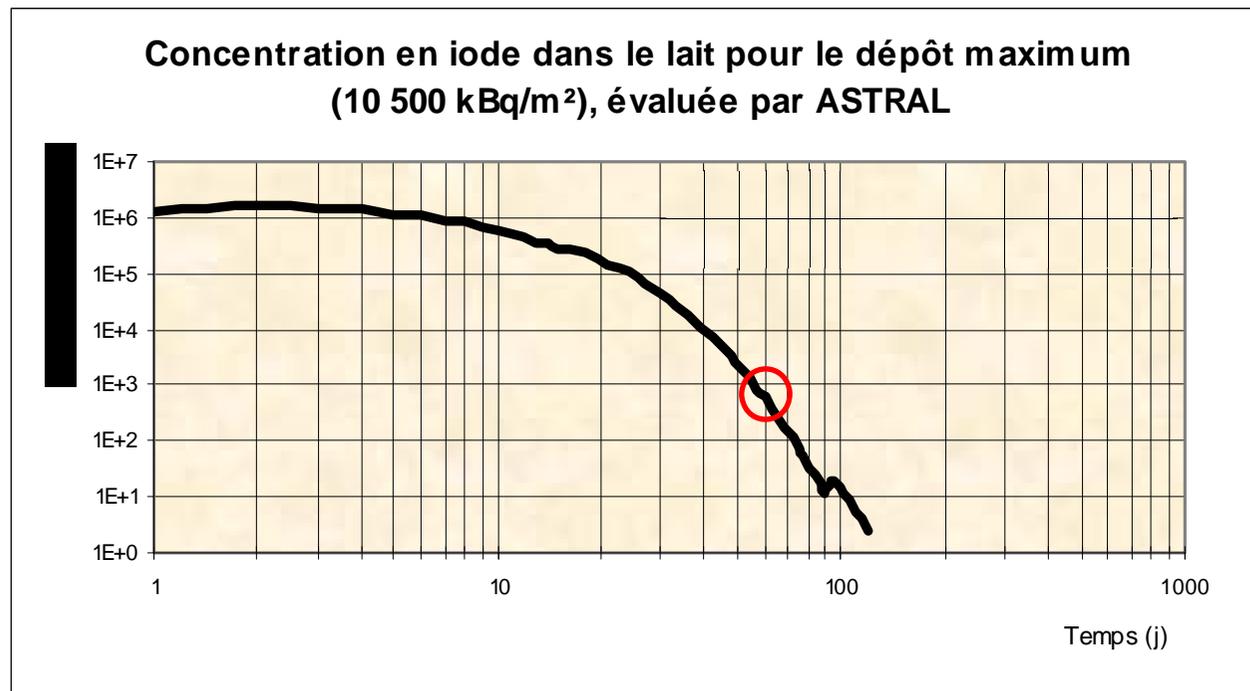


Évolution de la modélisation



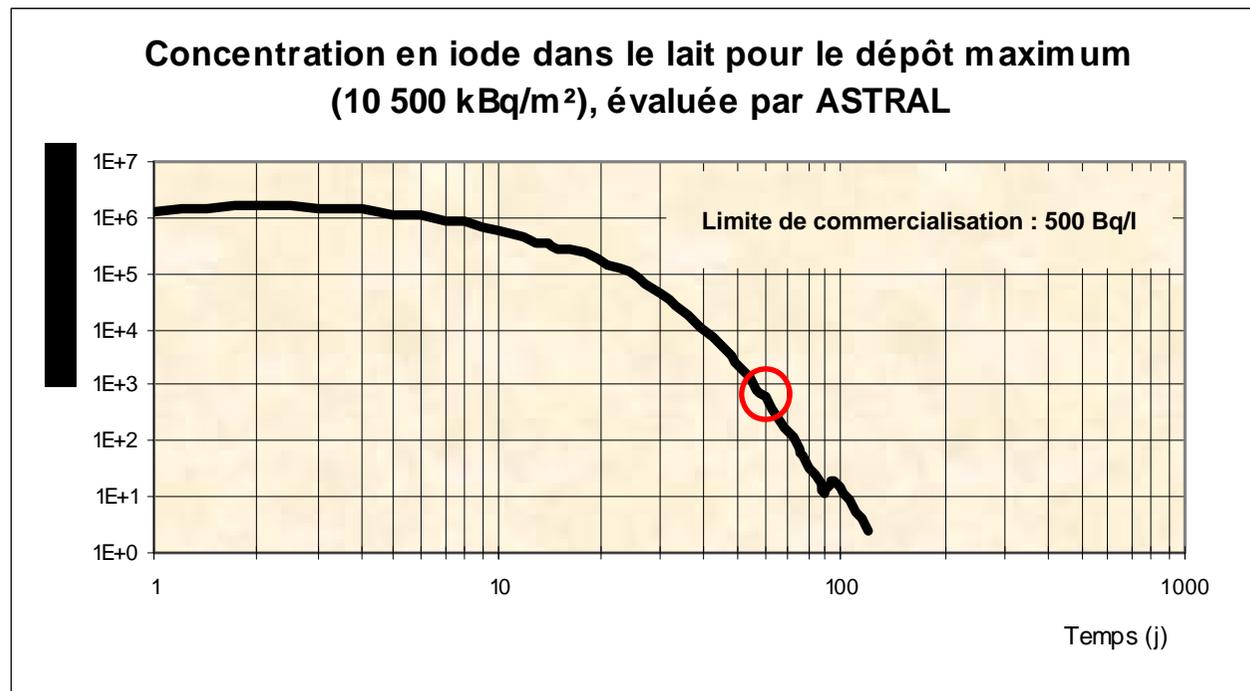
~1990

Évolution de la modélisation



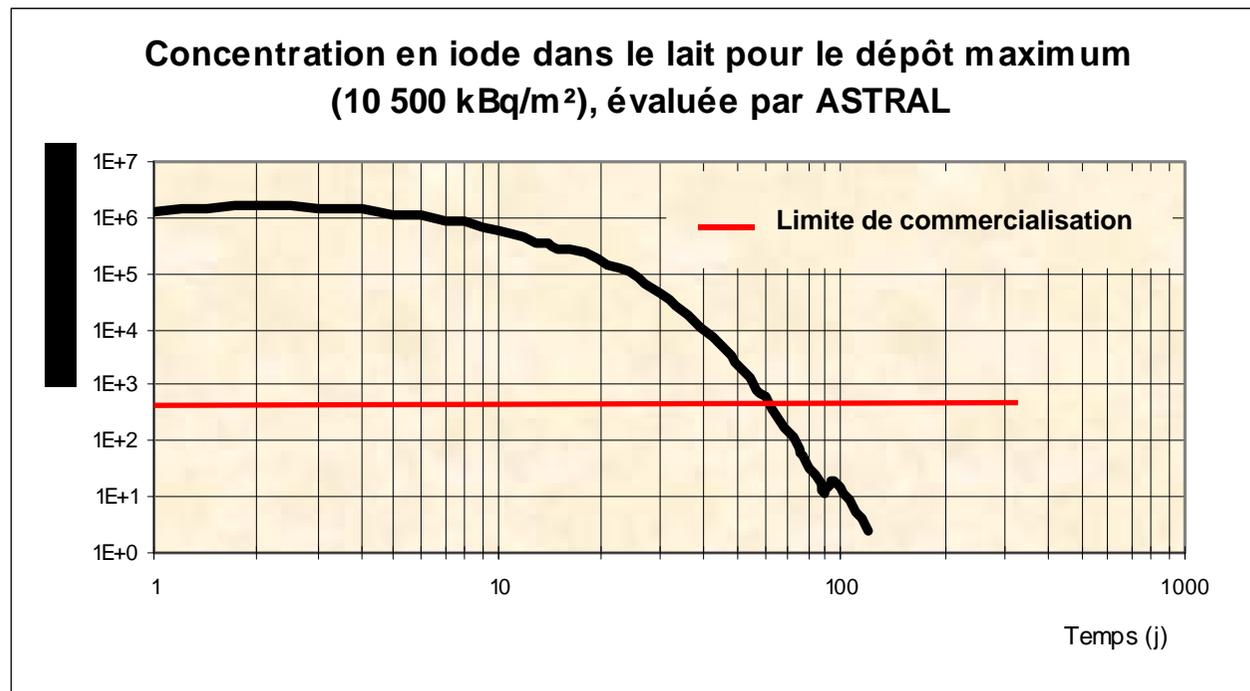
~1991

Évolution de la modélisation



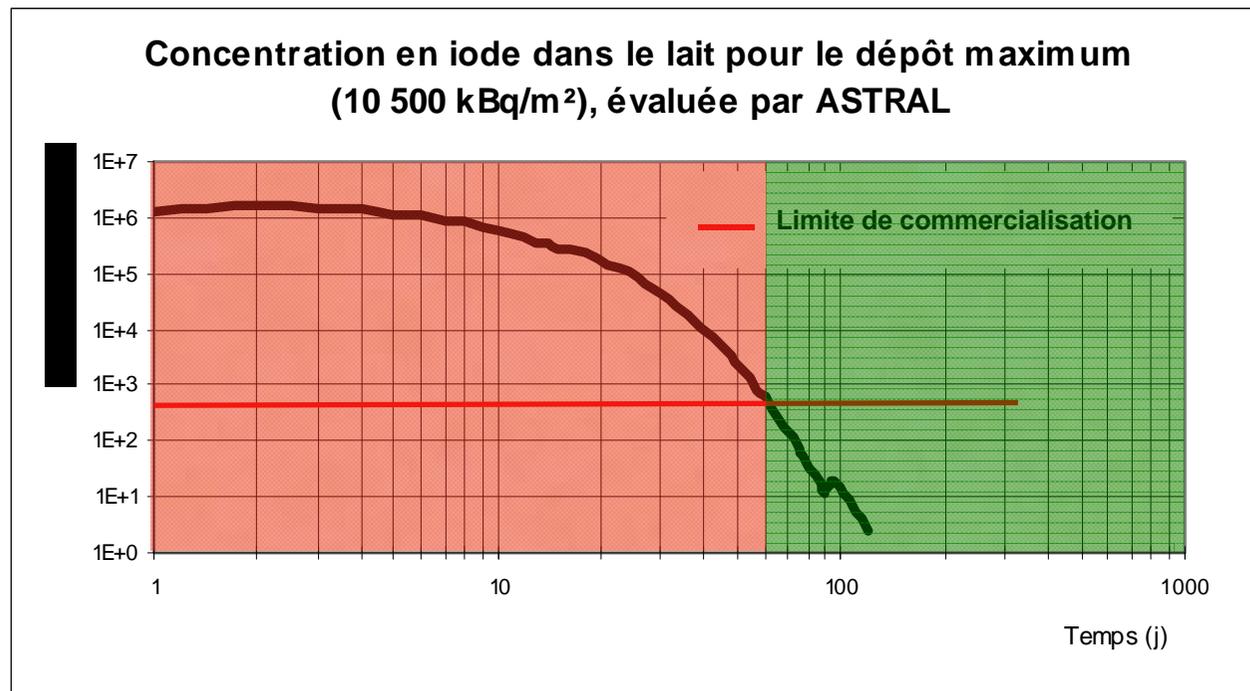
~1992

Évolution de la modélisation



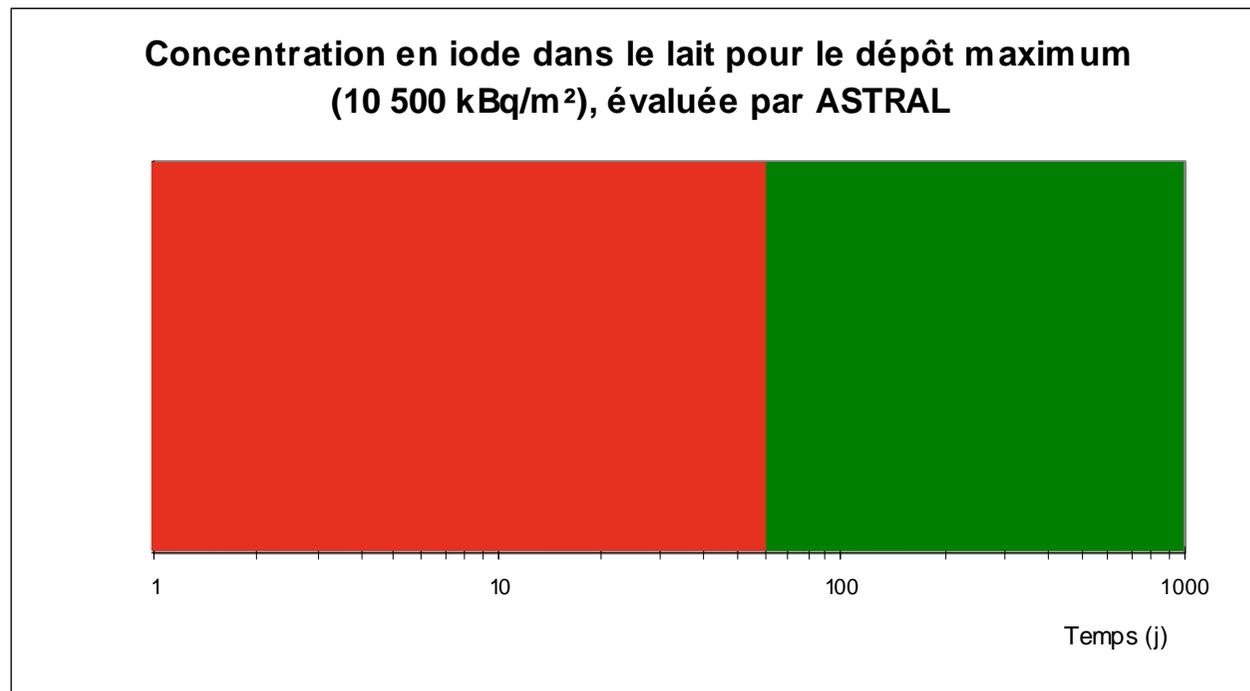
~1993

Évolution de la modélisation



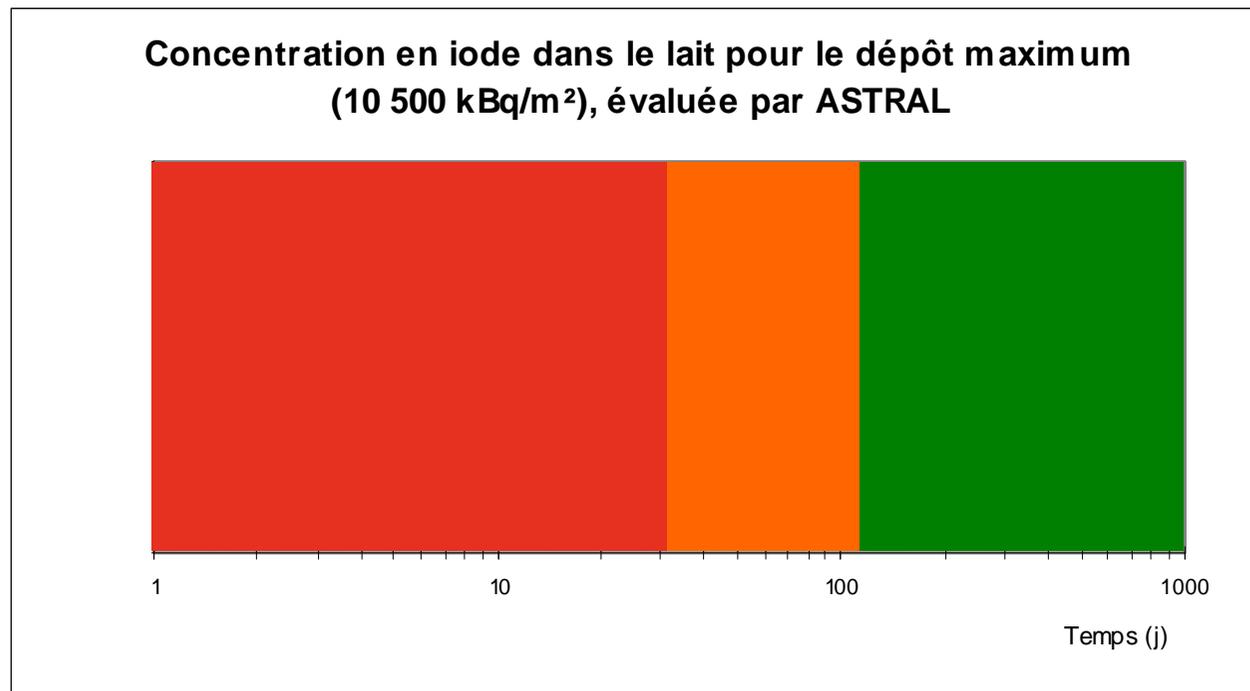
1995

Évolution de la modélisation



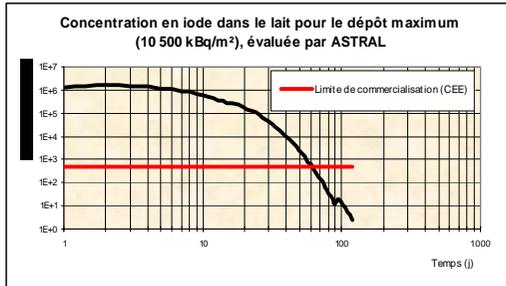
1998

Évolution de la modélisation



2000

Évolution de la modélisation



ASTRAL V2

Type de graphe : | par mois ▾

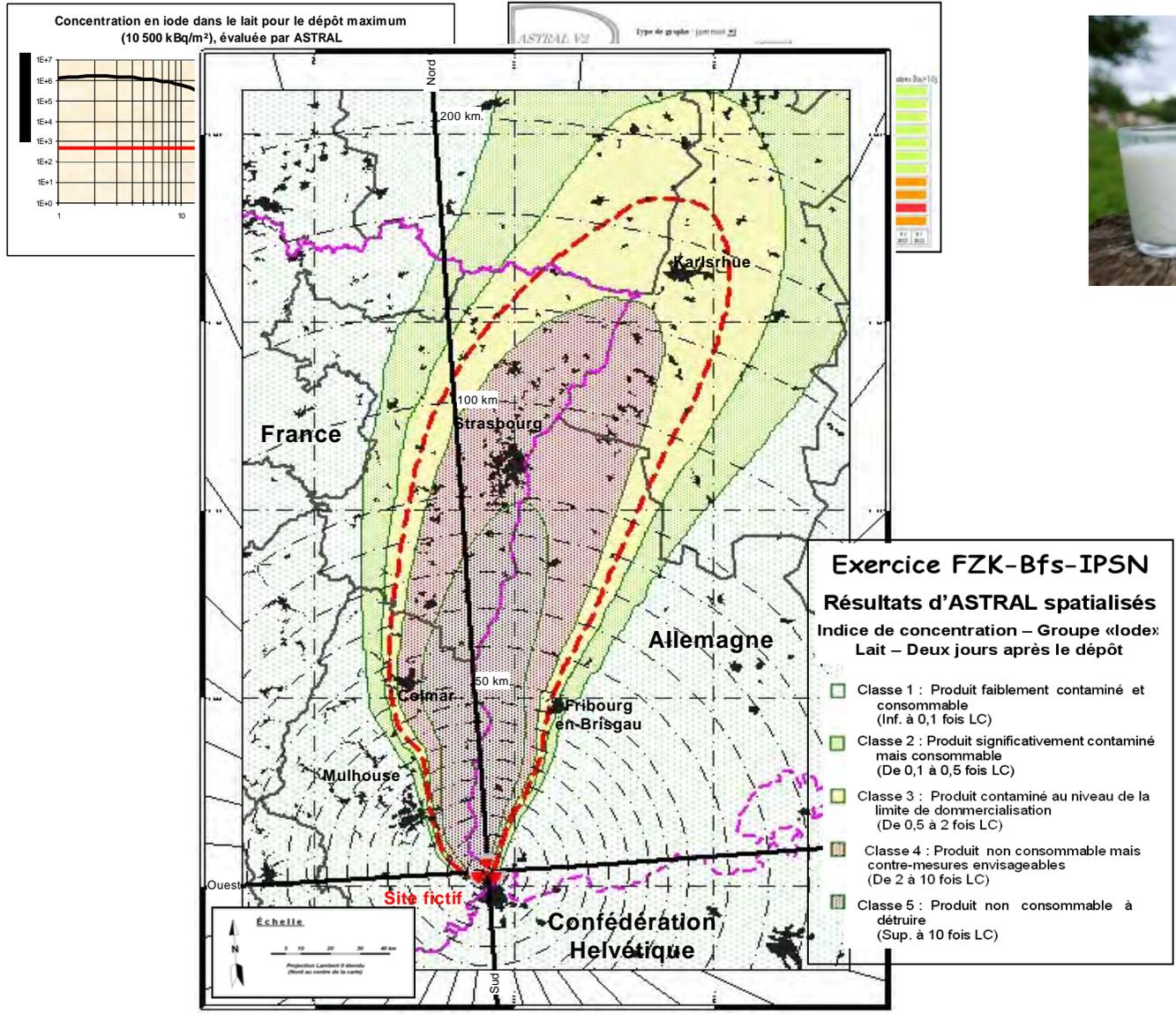
Calculer

Résultat du calcul n°26
 Indice de concentration Groupe ALIMENT ANIMAL, Groupe de radionucléides Autres Rn>10j

conserves lait	[Bar chart showing high concentration in 2012]											
beurre	[Bar chart showing low concentration]											
fromage fermenté	[Bar chart showing high concentration in 2012]											
lait brebis alim	[Bar chart showing low concentration]											
lait chevre alim	[Bar chart showing low concentration]											
lait vache alim	[Bar chart showing high concentration in 2012]											
oeufs alim	[Bar chart showing low concentration]											
viande de boeuf alim	[Bar chart showing high concentration in 2012]											
viande de poulet alim	[Bar chart showing high concentration in 2012]											
viande de porc alim	[Bar chart showing high concentration in 2012]											
viande de mouton alim	[Bar chart showing high concentration in 2012]											
Mois	10 / 2012	11 / 2012	12 / 2012	1 / 2013	2 / 2013	3 / 2013	4 / 2013	5 / 2013	6 / 2013	7 / 2013	8 / 2013	9 / 2013

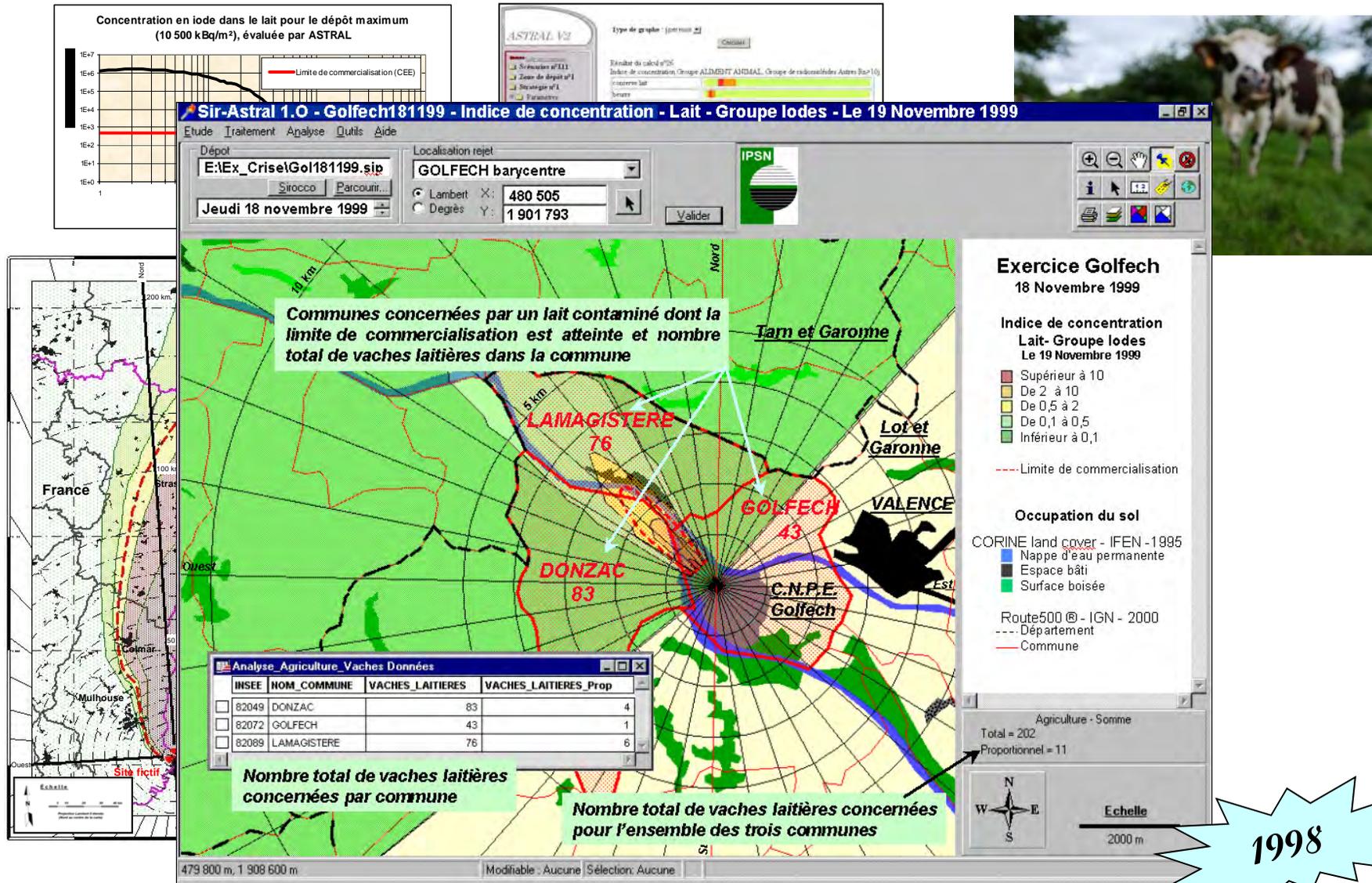


Évolution de la modélisation



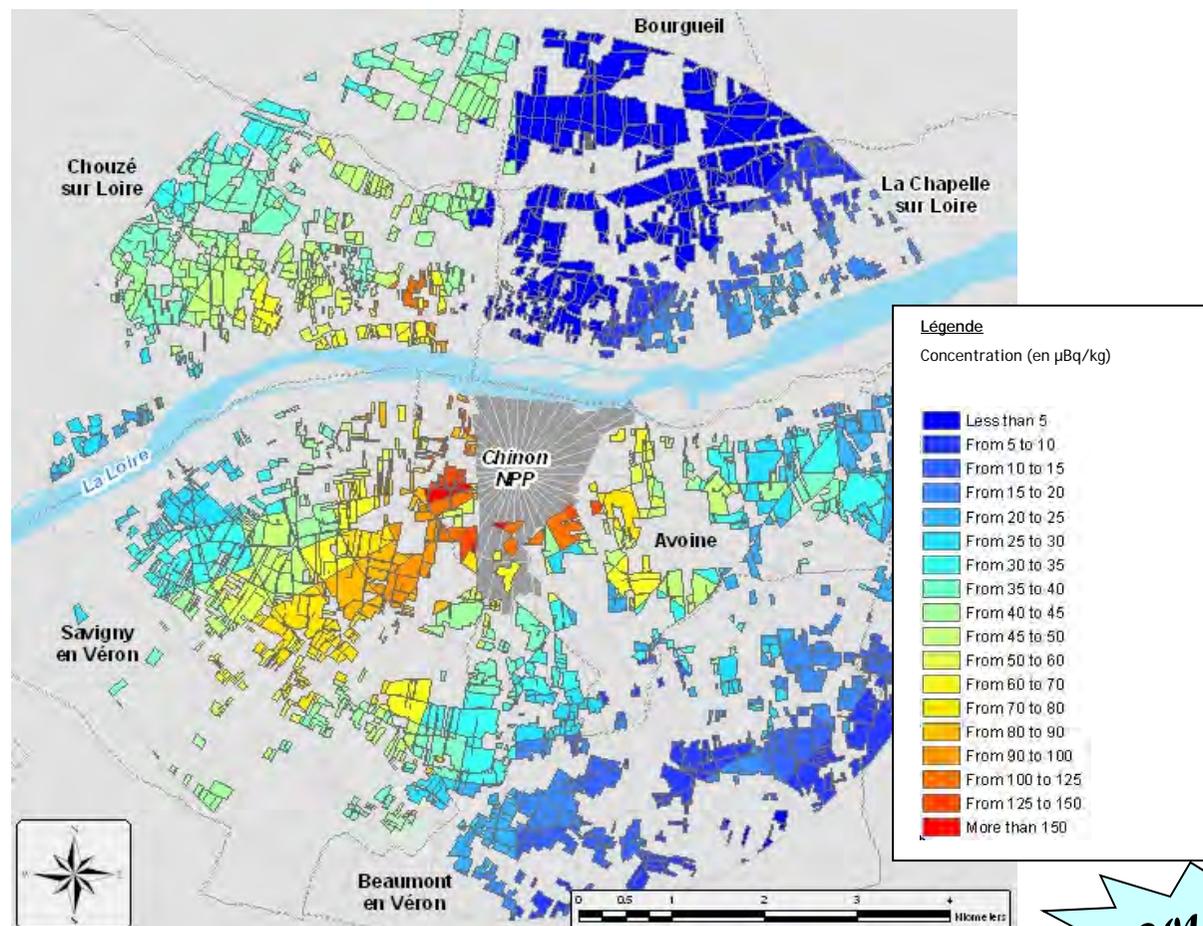
1994

Évolution de la modélisation



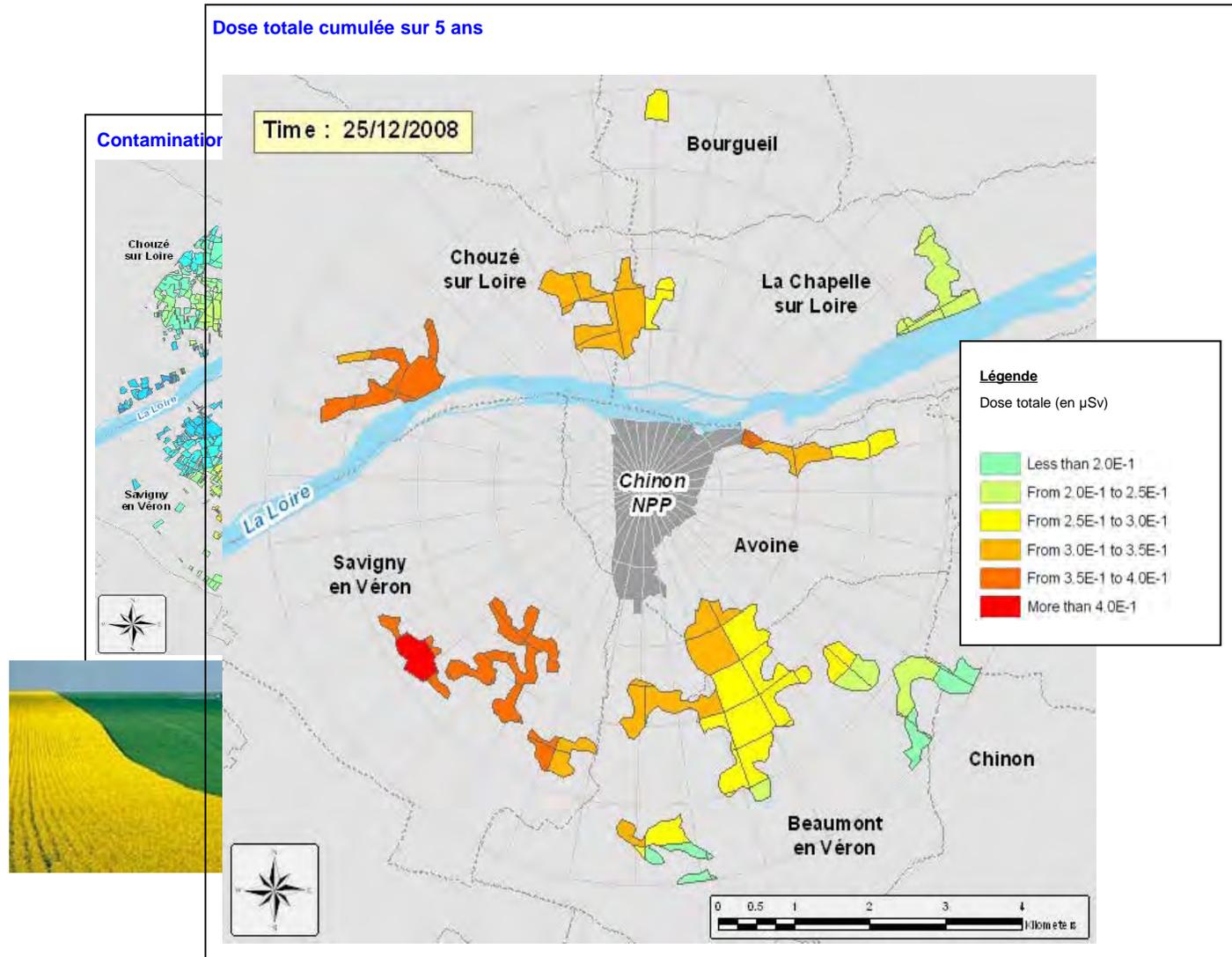
Évolution de la modélisation

Contamination en ^{131}I dans le sol d'une grande culture



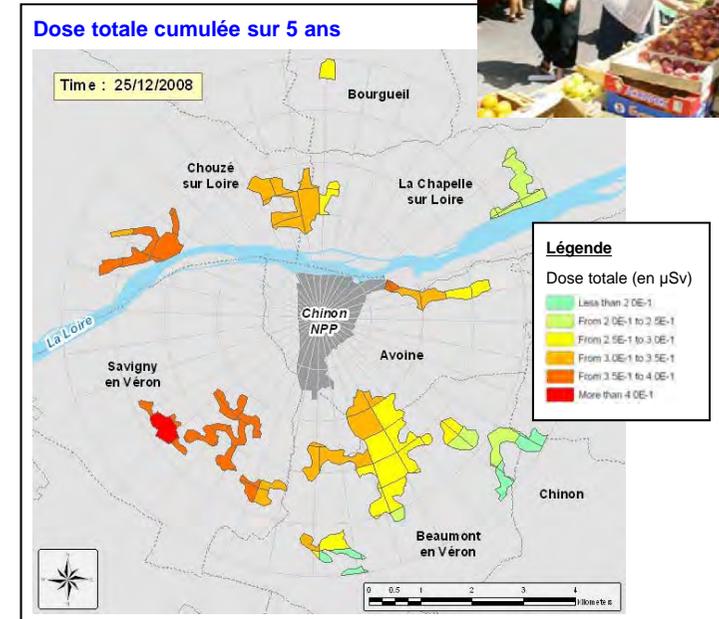
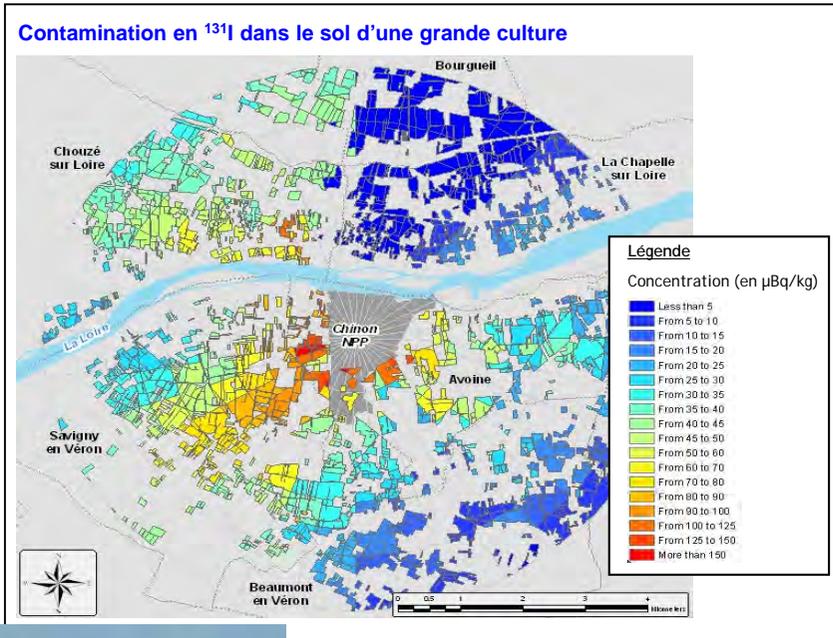
2010 ...

Évolution de la modélisation



2010 ...

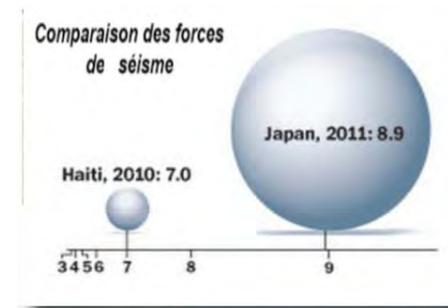
Évolution de la modélisation



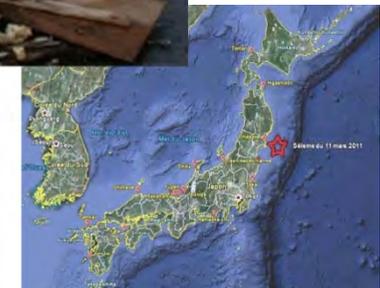
L'accident de Fukushima, une catastrophe sans précédent

Vendredi 11 mars 2011

- 05h46 TU (14h46 heure locale)
Séisme de magnitude 9,0 (80 km à l'Est, profondeur 24,4 km)
- 06h36 TU (15h36 heure locale)
Tsunami (vagues de 15 m à Fukushima Daiichi)
Remontée de la mer, 20 m localement

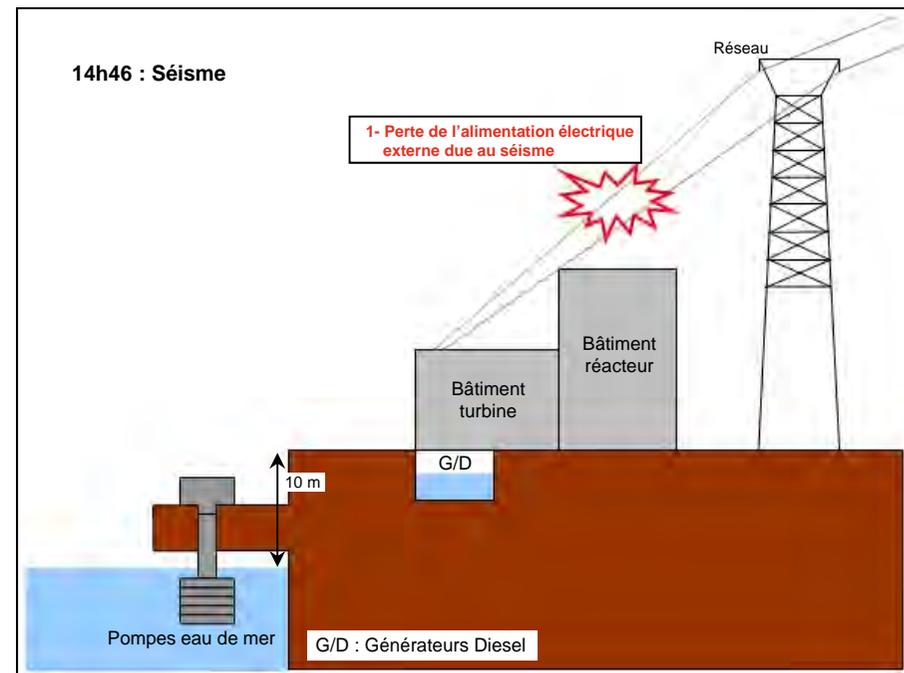


Source: Fire and Disaster Management Agency



L'accident de Fukushima, une catastrophe sans précédent

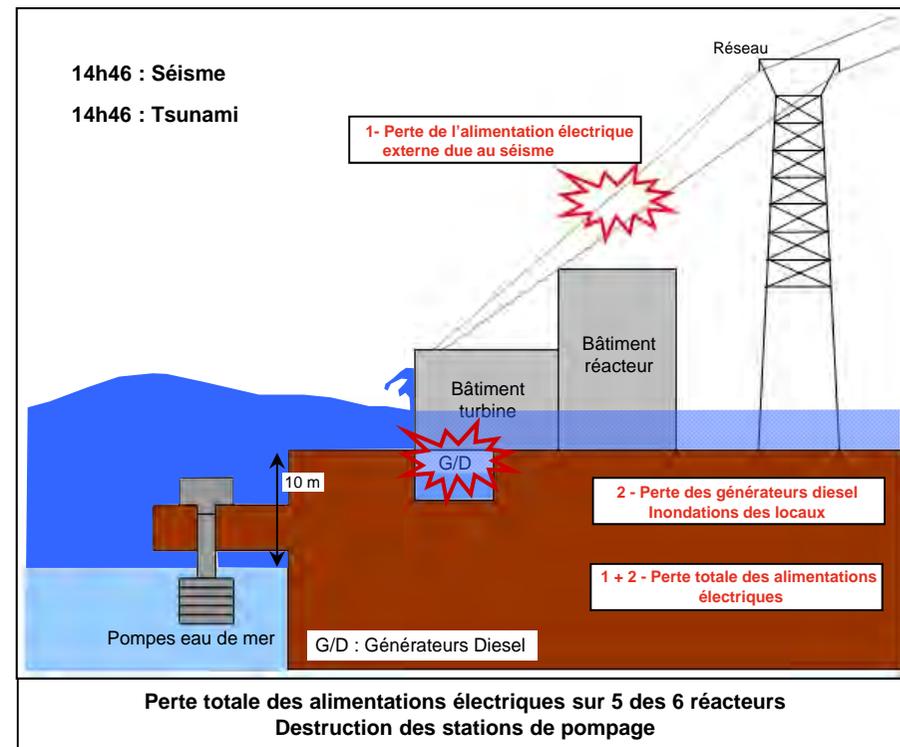
Une des plus grandes centrales nucléaires au monde, 225 km au NE de Tokyo (13 M. d'hab.)
Un site entier : 6 unités, 3 en fonctionnement, 1 en arrêt pour rechargement et 2 en arrêt à froid



L'accident de Fukushima, une catastrophe sans précédent

Une des plus grandes centrales nucléaires au monde, 225 km au NE de Tokyo (13 M. d'hab.)

Un site entier : 6 unités, 3 en fonctionnement, 1 en arrêt pour rechargement et 2 en arrêt à froid



L'accident de Fukushima, une catastrophe sans précédent

Une des plus grandes centrales nucléaires au monde, 225 km au NE de Tokyo (13 M. d'hab.)
Un site entier : 6 unités, 3 en fonctionnement, 1 en arrêt pour rechargement et 2 en arrêt à froid

Le 18 mars 2011, les accidents survenus sur les réacteurs 1, 2 et 3 de la centrale ont été classés au niveau 5 de l'échelle INES (échelle internationale des événements nucléaires - Three Mile Island 1979).

Le 2 avril 2011, découverte d'une fissure sur une structure en béton du réacteur 2. Cette fissure serait à l'origine de fuites d'eau fortement radioactive dans l'océan.

Le 11 avril 2011, l'incident a été classé au niveau 7 au même titre que celui de Tchernobyl 1986.

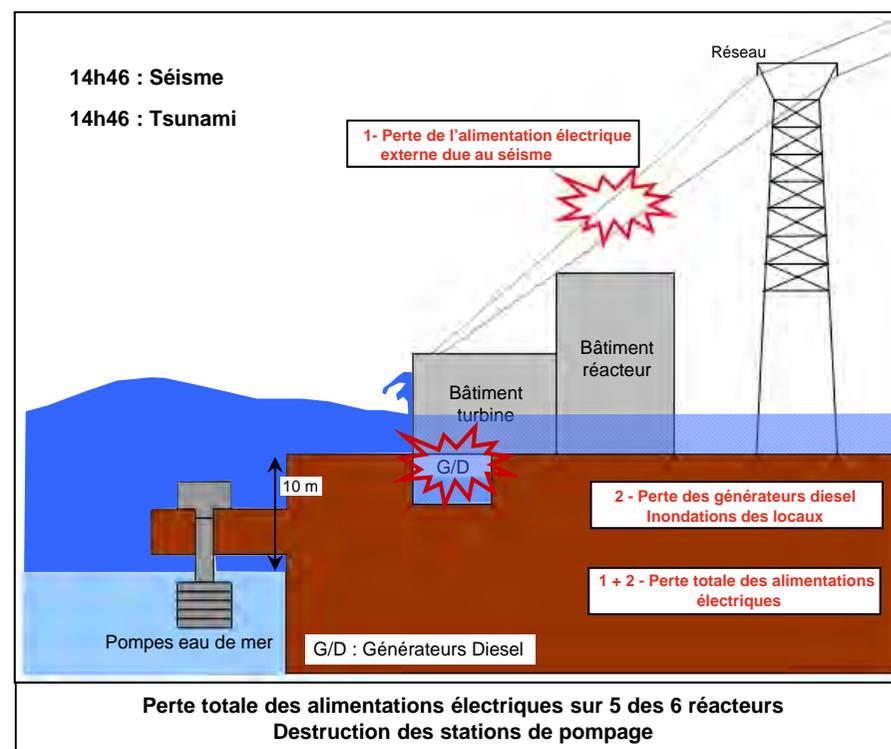
12 mars (15h36) : réacteur 1

14 mars (11h01) : réacteur 3

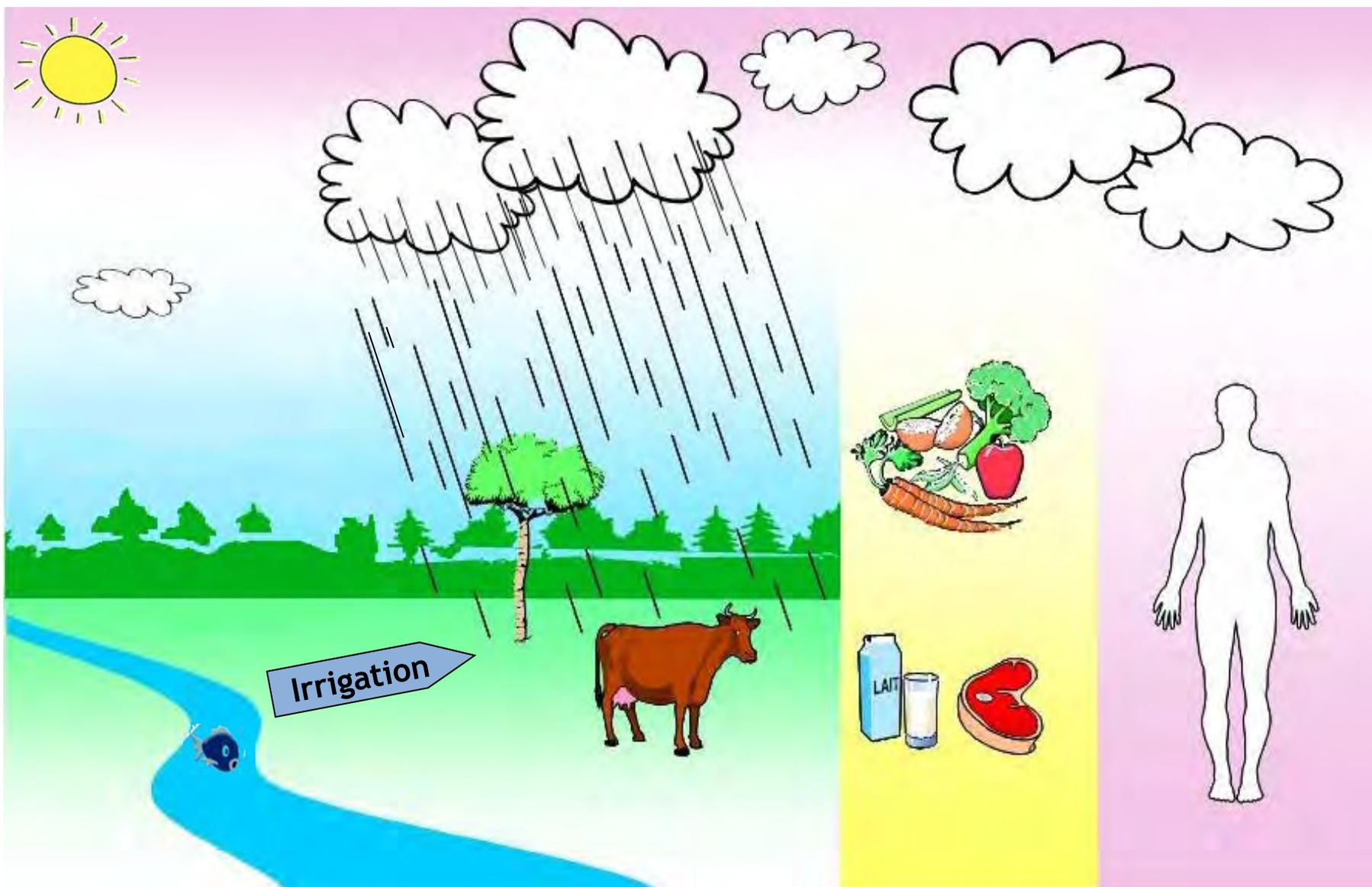
15 mars (06h10) : réacteur 2

15 mars (06h14) : réacteur 4 (piscine)

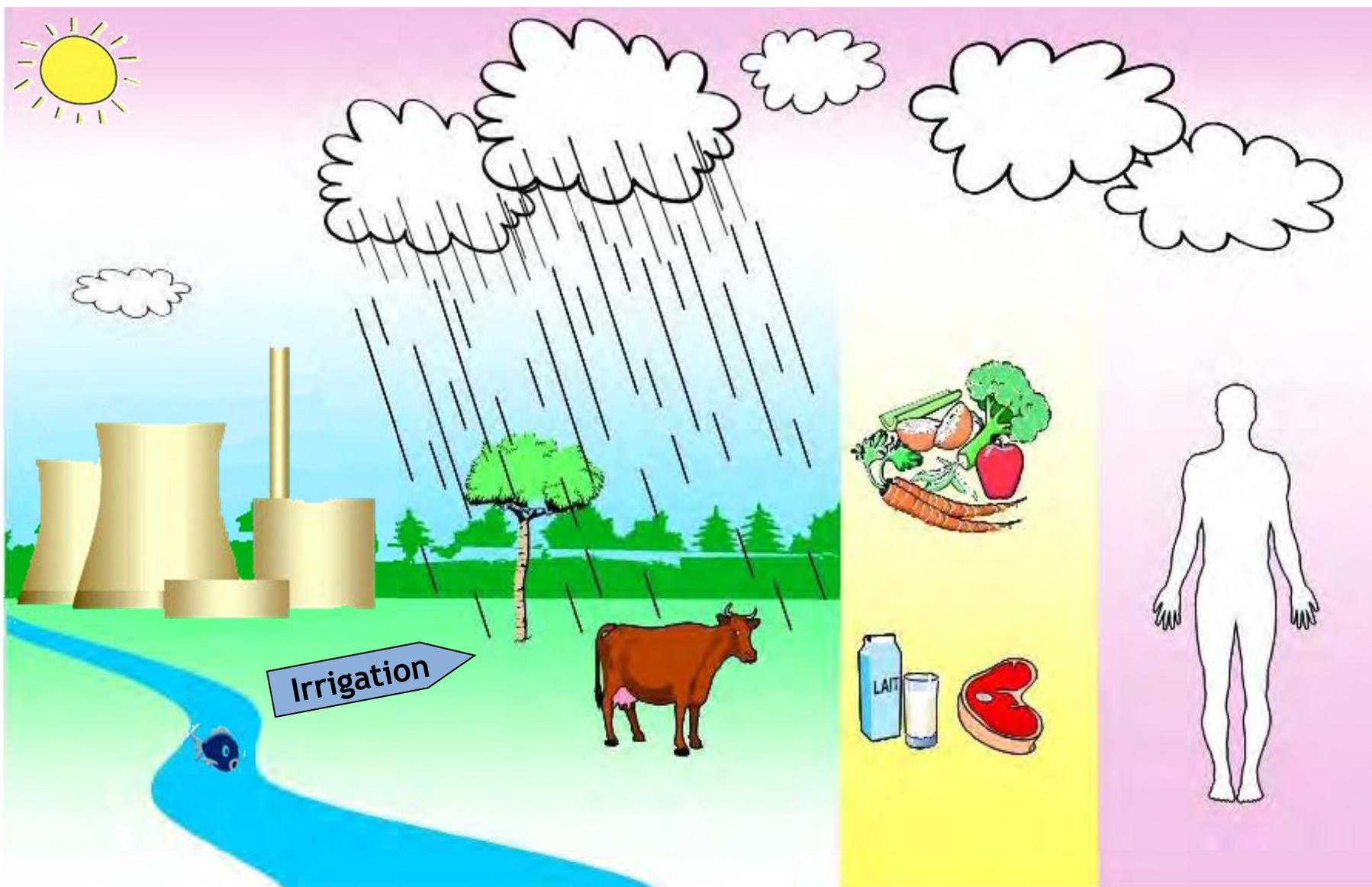
Situation très précaire



L'Écologie

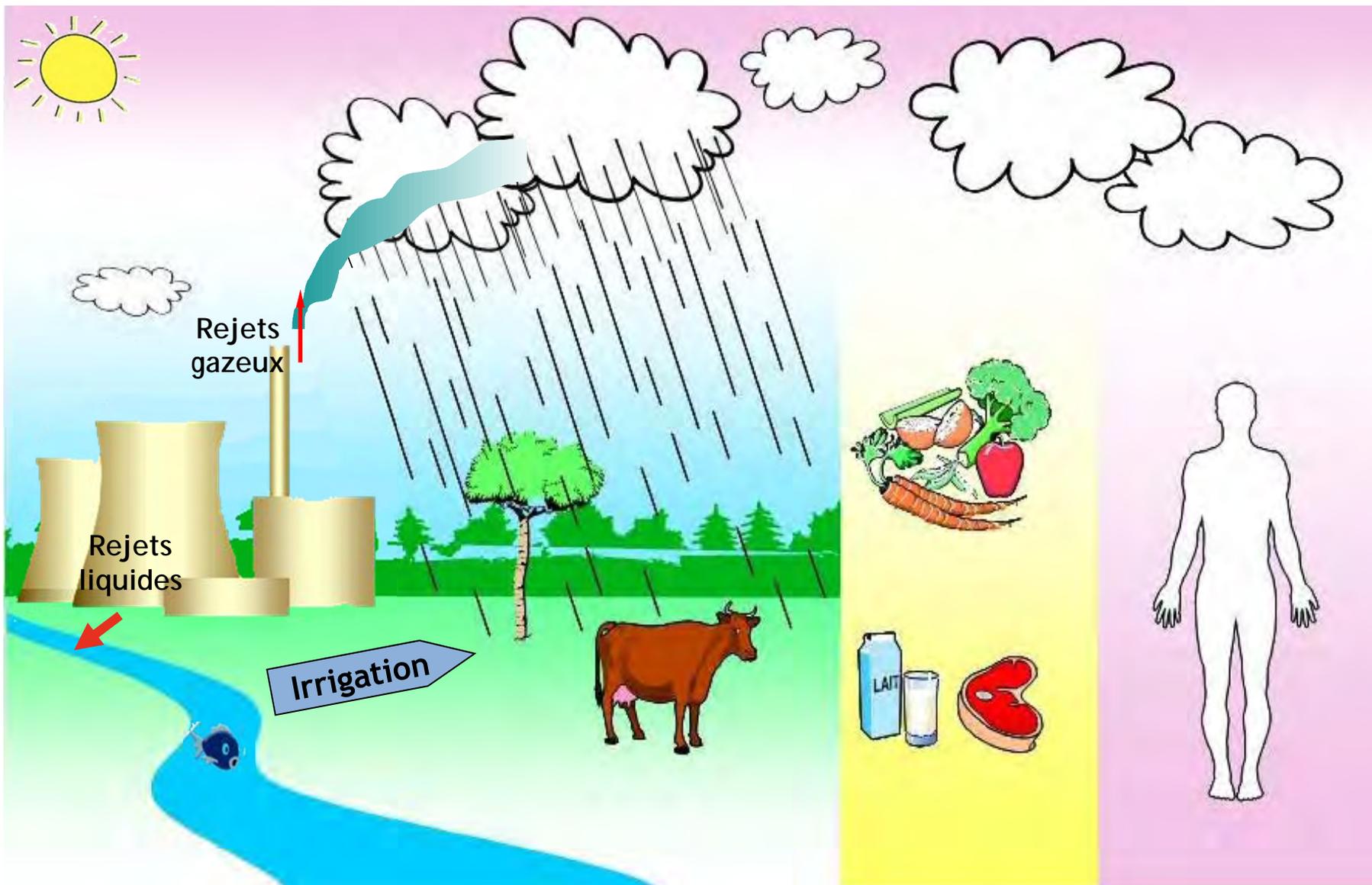


La radioécologie



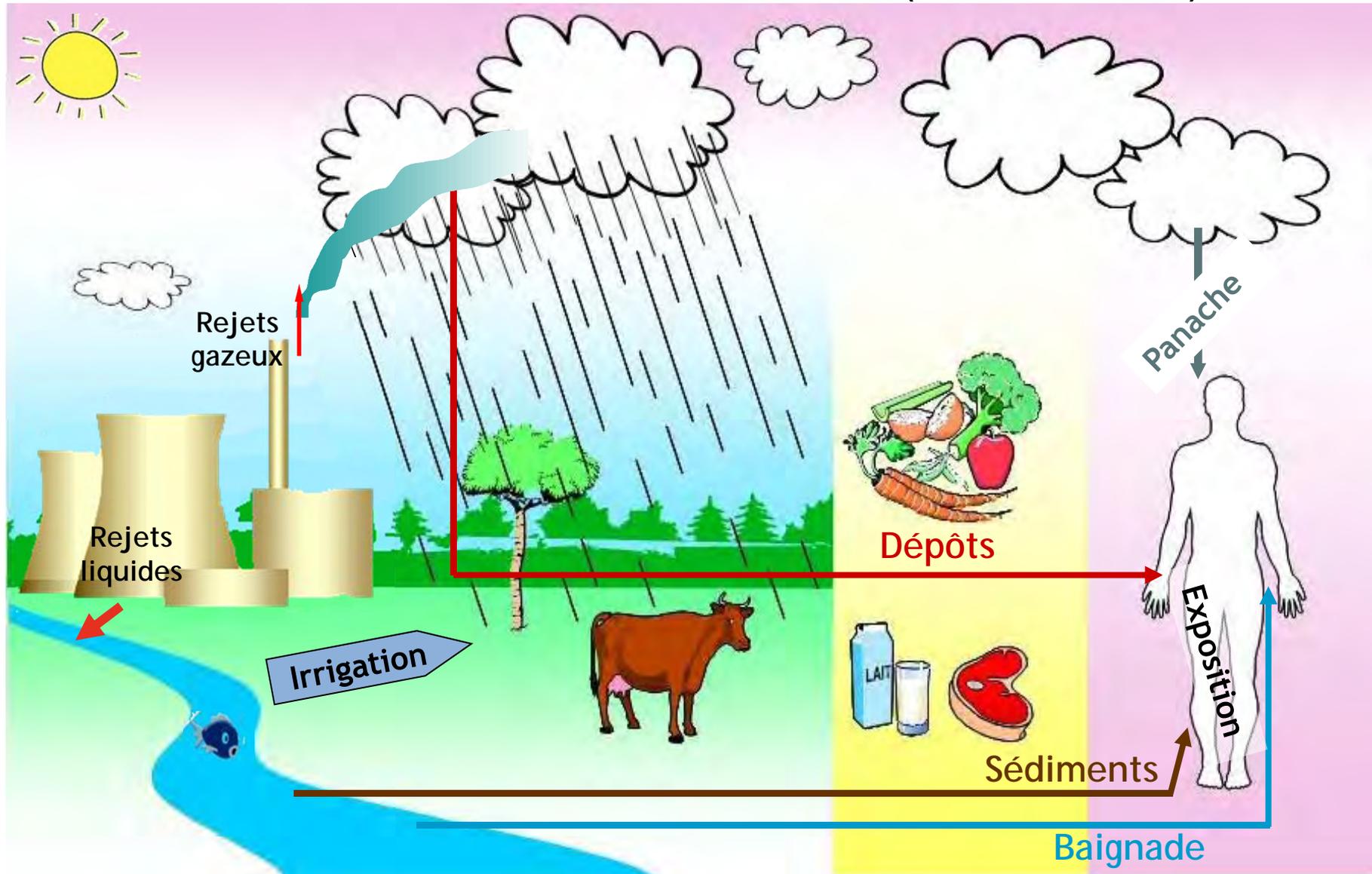
La radioécologie

Fonctionnement normal



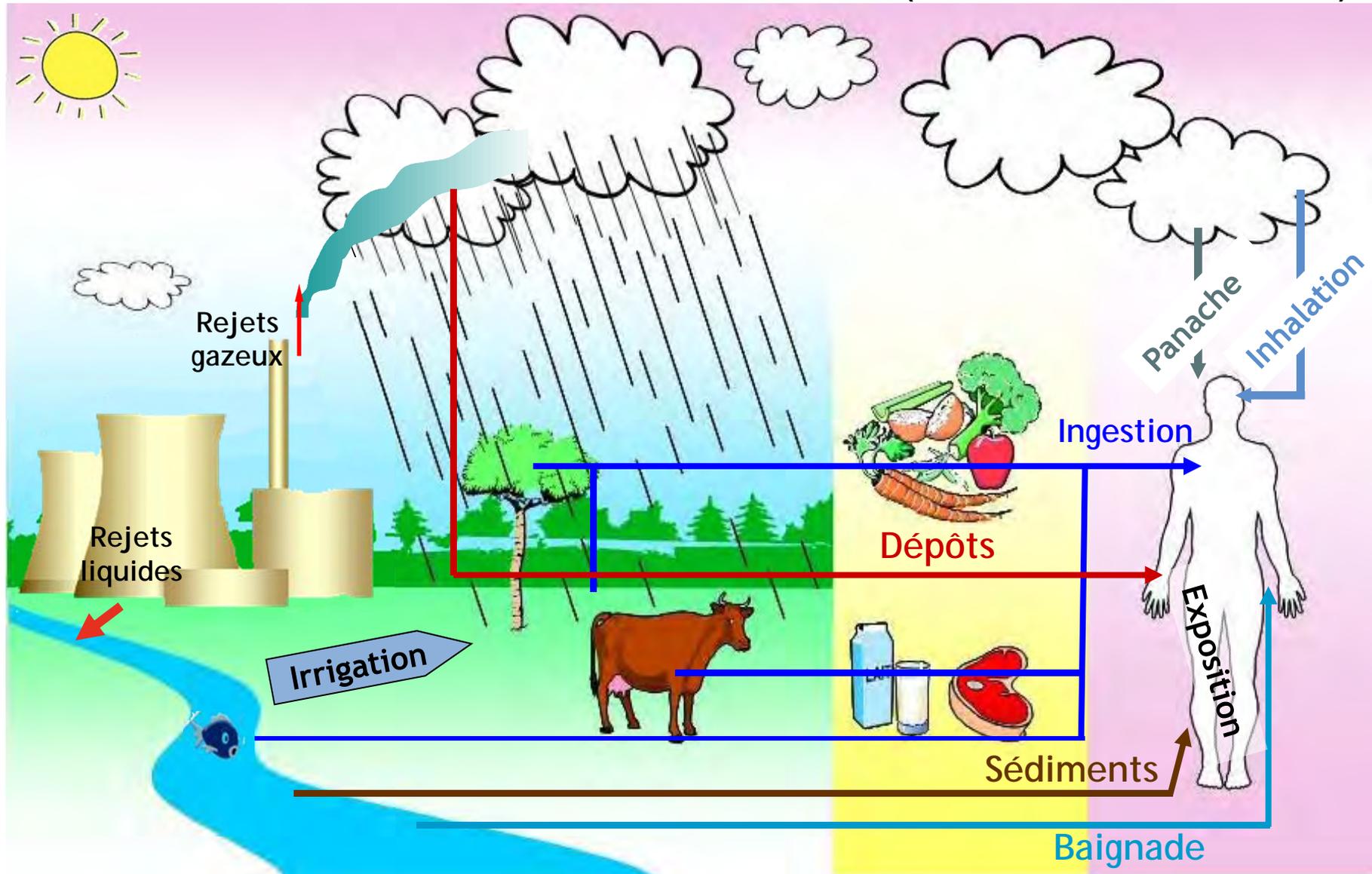
La radioécologie

Fonctionnement normal (Irradiations externes)



La radioécologie

Fonctionnement normal (Irradiations externes et internes)



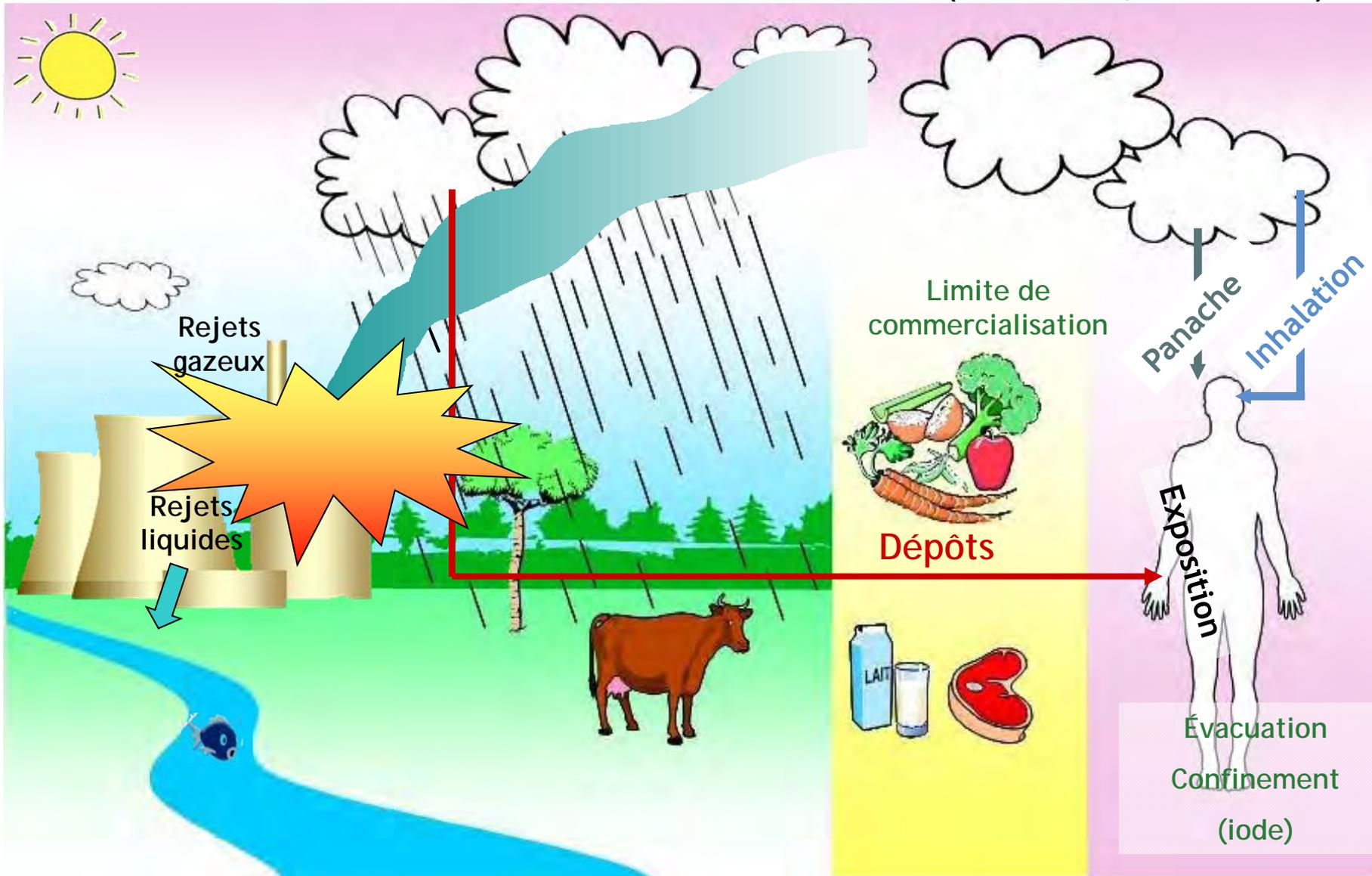
La radioécologie

Fonctionnement accidentel (interdictions, limitations ...)



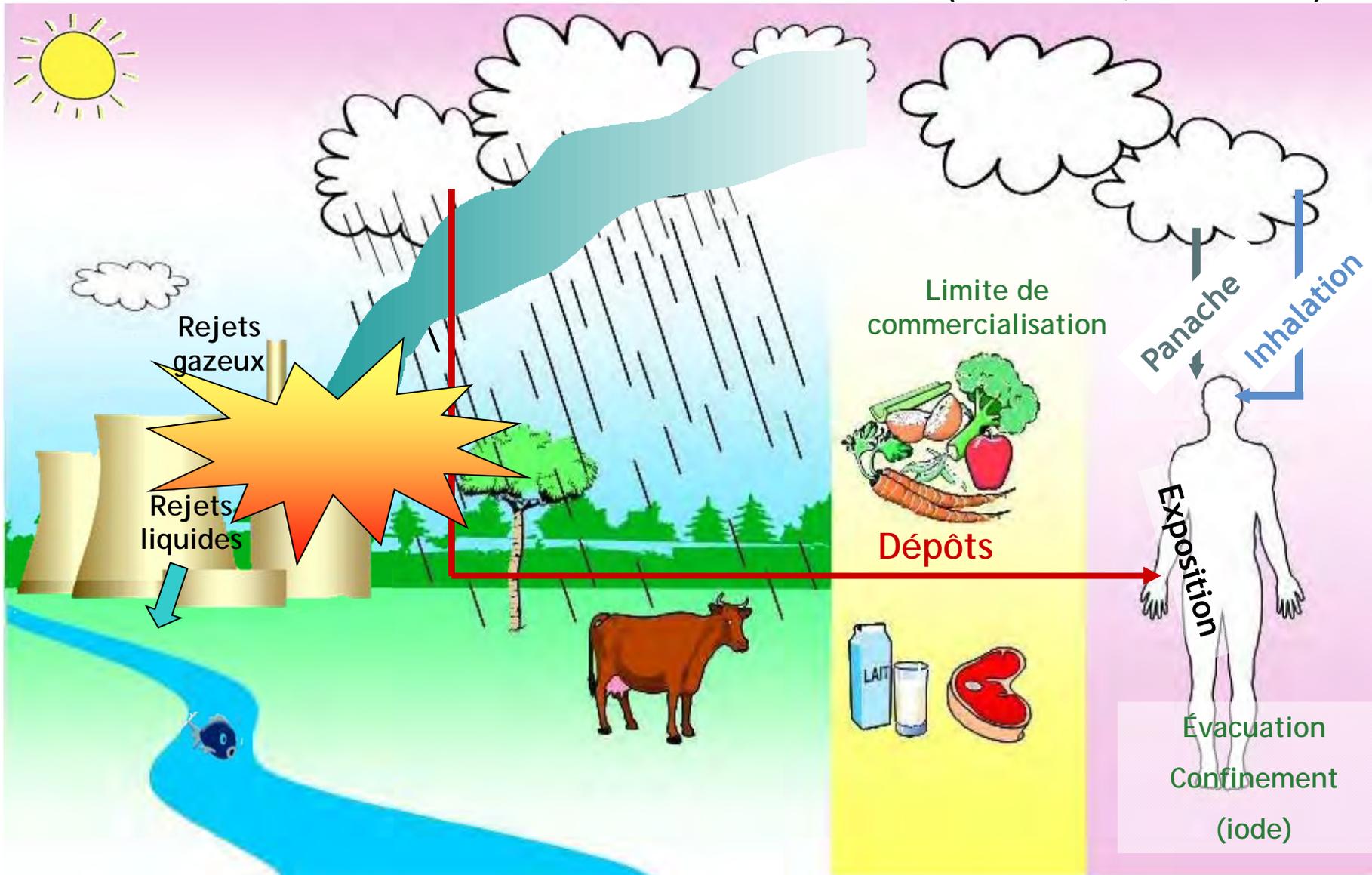
La radioécologie

Fonctionnement accidentel (interdictions, limitations ...)



La radioécologie

Fonctionnement accidentel (interdictions, limitations ...)



La radioécologie

Approche mathématique : bilan de masse

$$\frac{\partial}{\partial t} \chi_i = -\nabla \cdot F_i + \sum_{p,j} (T_{j,i}^p - T_{i,j}^p) + \left[\frac{\partial \chi_i}{\partial t} \right]^{Eco}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \chi_i [C]_i = -\nabla \cdot FM_i + \sum_{p,j} (TM_{j,i}^p - TM_{i,j}^p) + RM_i$$

Modélisation SYMBIOSE

Dès le **lundi 14 mars 2011**, le LM2E projette d'utiliser sa plateforme de modélisation **SYMBIOSE** pour estimer l'évolution dans le temps et dans l'espace du comportement et des concentrations des radionucléides au sein des principaux systèmes constitutifs de l'environnement.



- ☒ Tester la faisabilité d'un calcul d'impact **en situation de crise réelle**
- ☒ Consolider notre savoir-faire & notre expertise

Modélisation SYMBIOSE

Dès le **lundi 14 mars 2011**, le LM2E projette d'utiliser sa plateforme de modélisation **SYMBIOSE** pour estimer l'évolution dans le temps et dans l'espace du comportement et des concentrations des radionucléides au sein des principaux systèmes constitutifs de l'environnement.



- ☒ Tester la faisabilité d'un calcul d'impact **en situation de crise réelle**
- ☒ Consolider notre savoir-faire & notre expertise

L'outil SYMBIOSE

Outil de simulation du transfert des radionucléides dans l'environnement, et de l'impact dosimétrique à l'homme

Outil d'archivage des données environnementales génériques et site-spécifiques
Plate-forme de développement de modules & simulateurs

Domaine d'application

Fonctionnement **normal**, incidentel ou **accidentel** d'installations nucléaires

Multi-rejets : atmosphérique, aquatique fluvial et marin

Multi-milieus : atmosphérique, fluvial, marin, agricole et anthropique, et interfaces

Multi-expositions : externe, inhalation et ingestion

Simulations

Spécifiques (^3H , ^{14}C et ^{36}Cl), **dynamiques** (variabilité temporelle), **spatialisées** (variabilité spatiale)

Déterministes ou **probabilistes**

Modélisation SYMBIOSE

La matrice d'interaction utilisée

1/ REJETS (*) 	Rejet atmosphérique (*)		
	2/ SYSTEME ATMOSPHERIQUE 	Dépôt atmosphérique	Dose externe (panache)
		5/ SYSTEME AGRICOLE - SOL NU 	Dose externe (dépôt)
			7/ HOMME DOSE 

Modélisation SYMBIOSE

La matrice d'interaction utilisée

1/ REJETS (*) 	Rejet atmosphérique (*)		
	2/ SYSTEME ATMOSPHERIQUE 	Dépôt atmosphérique	Dose externe (panache)
		5/ SYSTEME AGRICOLE - SOL NU 	Dose externe (dépôt)
			7/ HOMME DOSE 

Le scénario :

Rejets atmosphériques(TS36 du 23 avril, ~ 50 radionucléides)
 Fonctionnement accidentel
 Milieux : atmosphérique, agricole et anthropique (homme)
 Calculs sur 3 mois : du 11 mars au 11 juin 2011 (pas horaire)
 Domaine spatial : rayon 80 km (terrestre)
 Calcul des activités dans les denrées agricoles et de la dose externe panache & environnement sur un individu adulte rural

Modélisation SYMBIOSE

La matrice d'interaction utilisée

1/ REJETS (*) 	Rejet atmosphérique (*)		
	2/ SYSTEME ATMOSPHERIQUE 	Dépôt atmosphérique	Dose externe (panache)
		5/ SYSTEME AGRICOLE - SOL NU 	Dose externe (dépôt)
			7/ HOMME DOSE 

Le scénario :

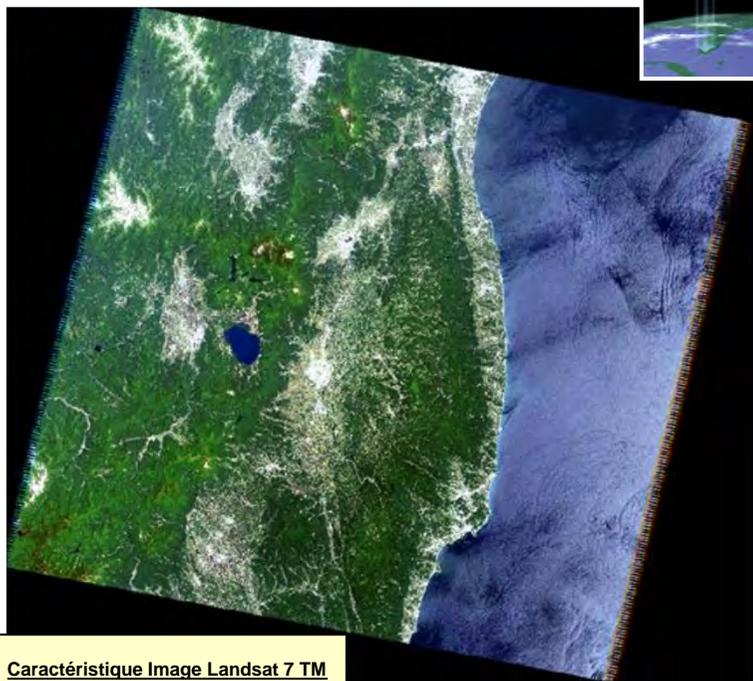
Rejets atmosphériques(TS36 du 23 avril, ~ 50 radionucléides)
 Fonctionnement accidentel
 Milieux : atmosphérique, agricole et anthropique (homme)
 Calculs sur 3 mois : du 11 mars au 11 juin 2011 (pas horaire)
 Domaine spatial : rayon 80 km (terrestre)
 Calcul des activités dans les denrées agricoles et de la dose externe panache & environnement sur un individu adulte rural

Terme source

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

Modélisation SYMBIOSE

Le modèle spatial



Caractéristique Image Landsat 7 TM

Résolution générale : 30 m

Panchromatique : 15 m

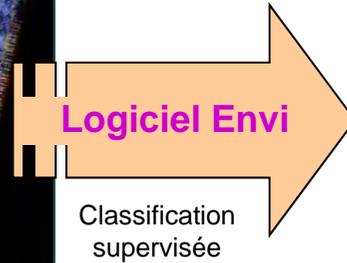
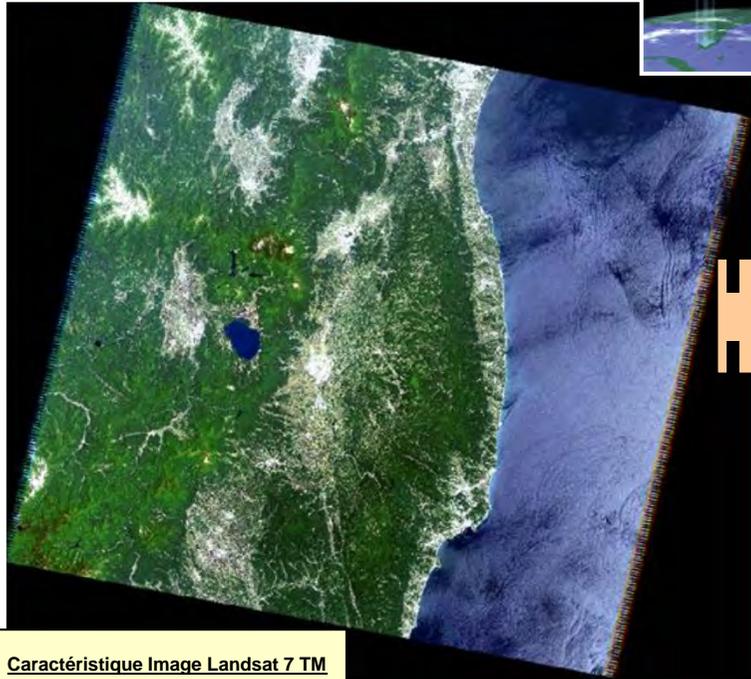
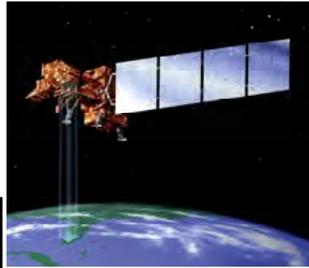
Infrarouge thermique : 100 m

Bleu	0,45-0,52 μm
Vert	0,53-0,61 μm
Rouge	0,63-0,69 μm
Proche IR	0,78-0,9 μm
IR «courte λ »	1,55-1,75 μm
IR «courte λ »	2,09-2,35 μm
IR thermique	10,4-12,5 μm
Panchromatique	0,52-0,9 μm

Scène Landsat 7 TM
04 Avril 2004

Modélisation SYMBIOSE

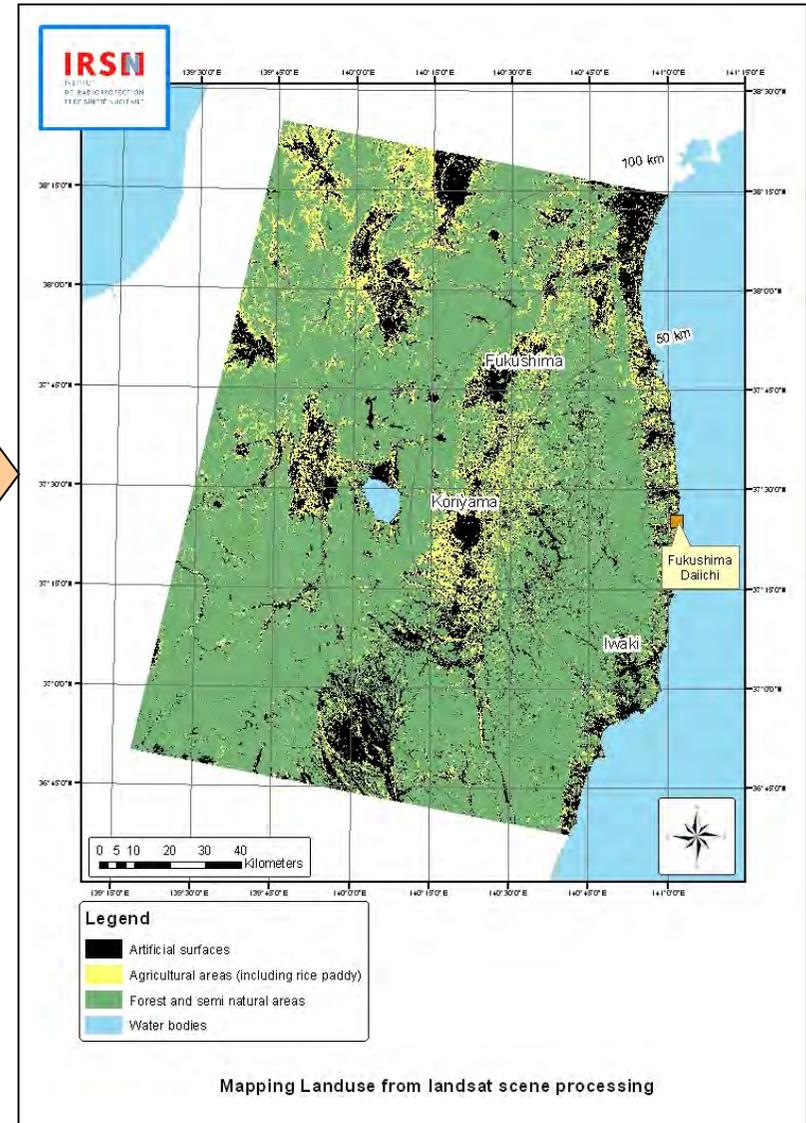
Le modèle spatial



Caractéristique Image Landsat 7 TM
 Résolution générale : 30 m
 Panchromatique : 15 m
 Infrarouge thermique : 100 m

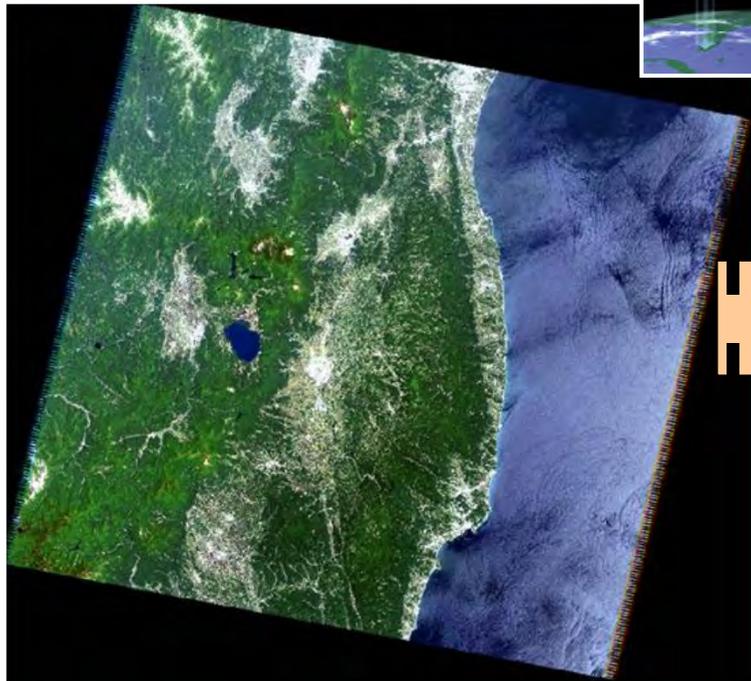
Bleu	0,45-0,52 µm
Vert	0,53-0,61 µm
Rouge	0,63-0,69 µm
Proche IR	0,78-0,9 µm
IR «courte λ»	1,55-1,75 µm
IR «courte λ»	2,09-2,35 µm
IR thermique	10,4-12,5 µm
Panchromatique	0,52-0,9 µm

Scène Landsat 7 TM
 04 Avril 2004



Modélisation SYMBIOSE

Le modèle spatial

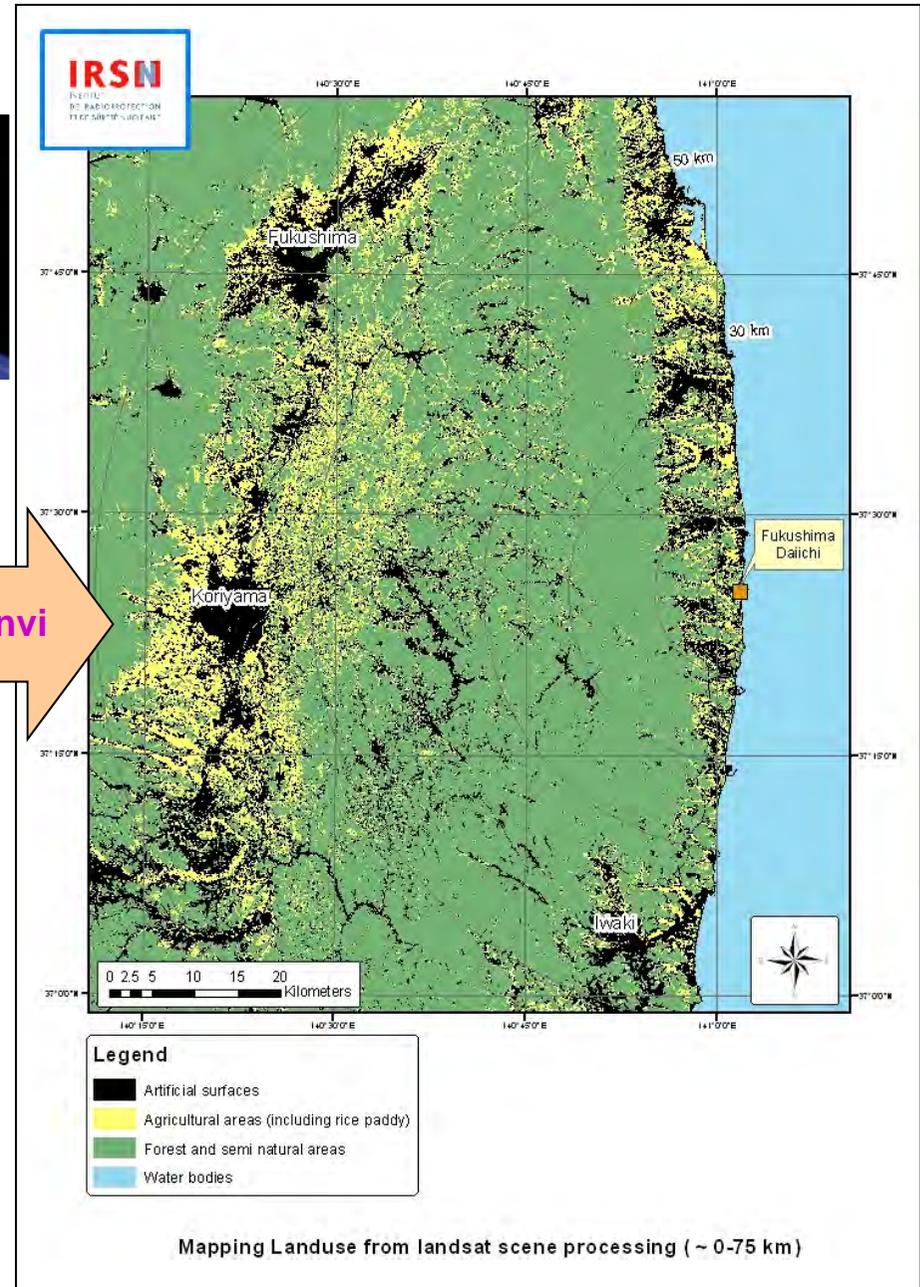


Scène Landsat 7 TM du 04 Avril 2004



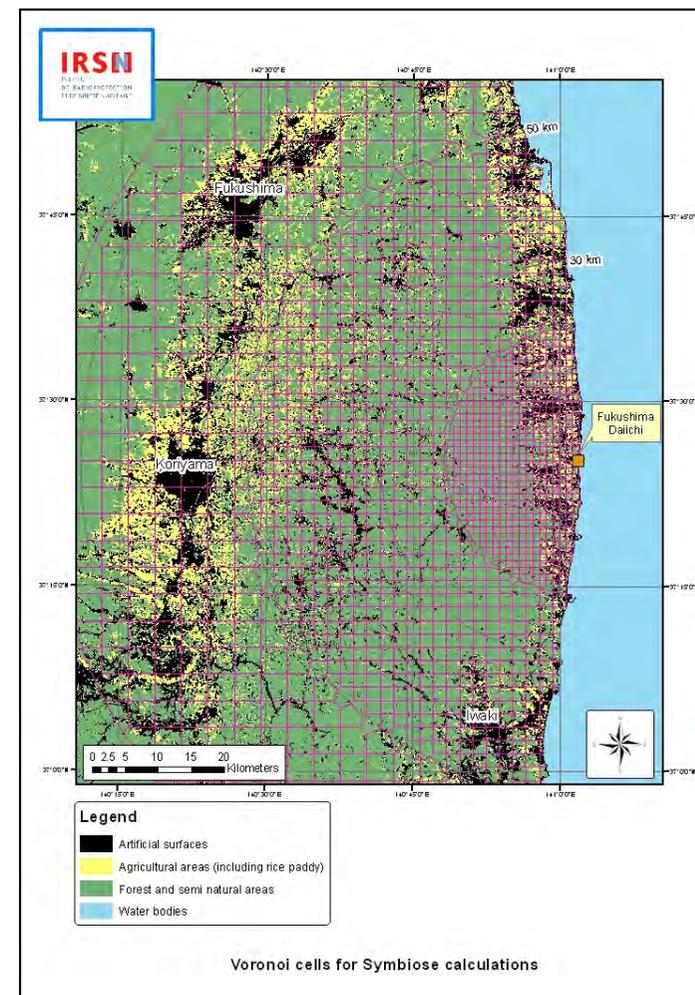
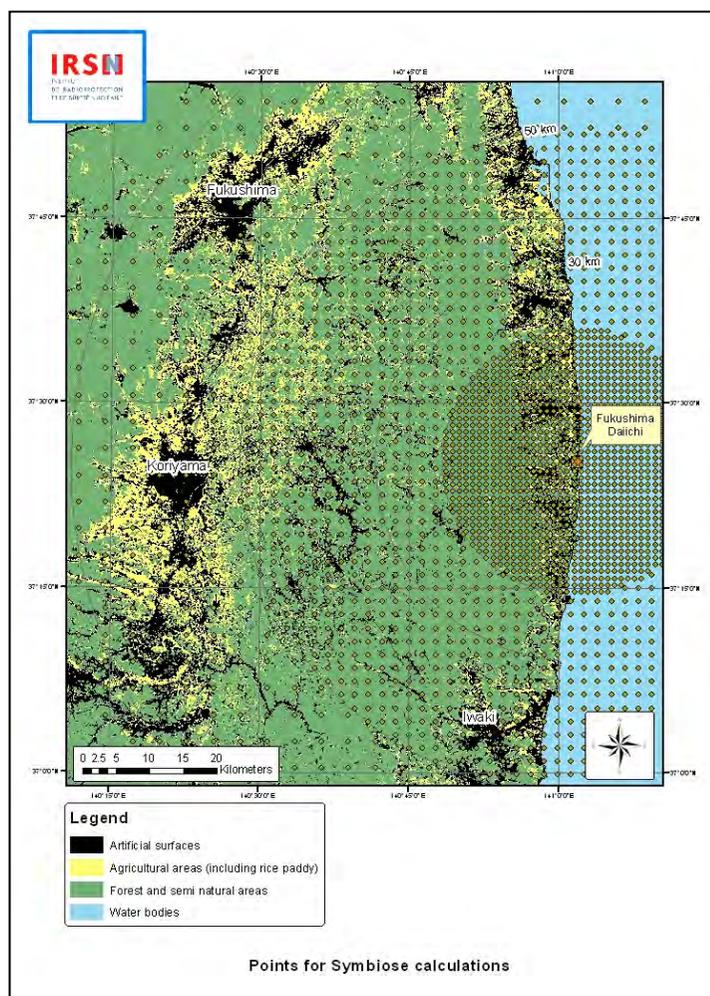
Logiciel Envi

Classification supervisée



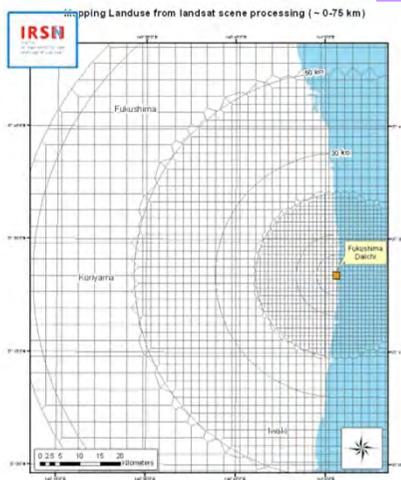
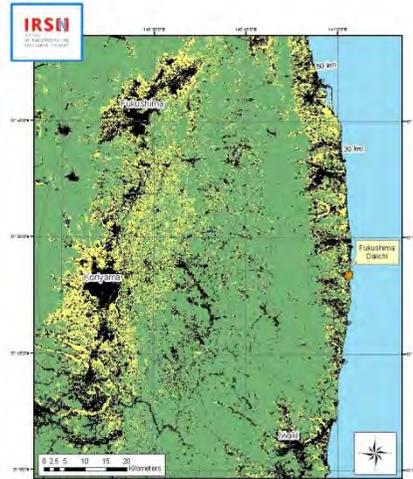
Modélisation SYMBIOSE

Le modèle spatial Semis de points structuré
Polygones d'influence



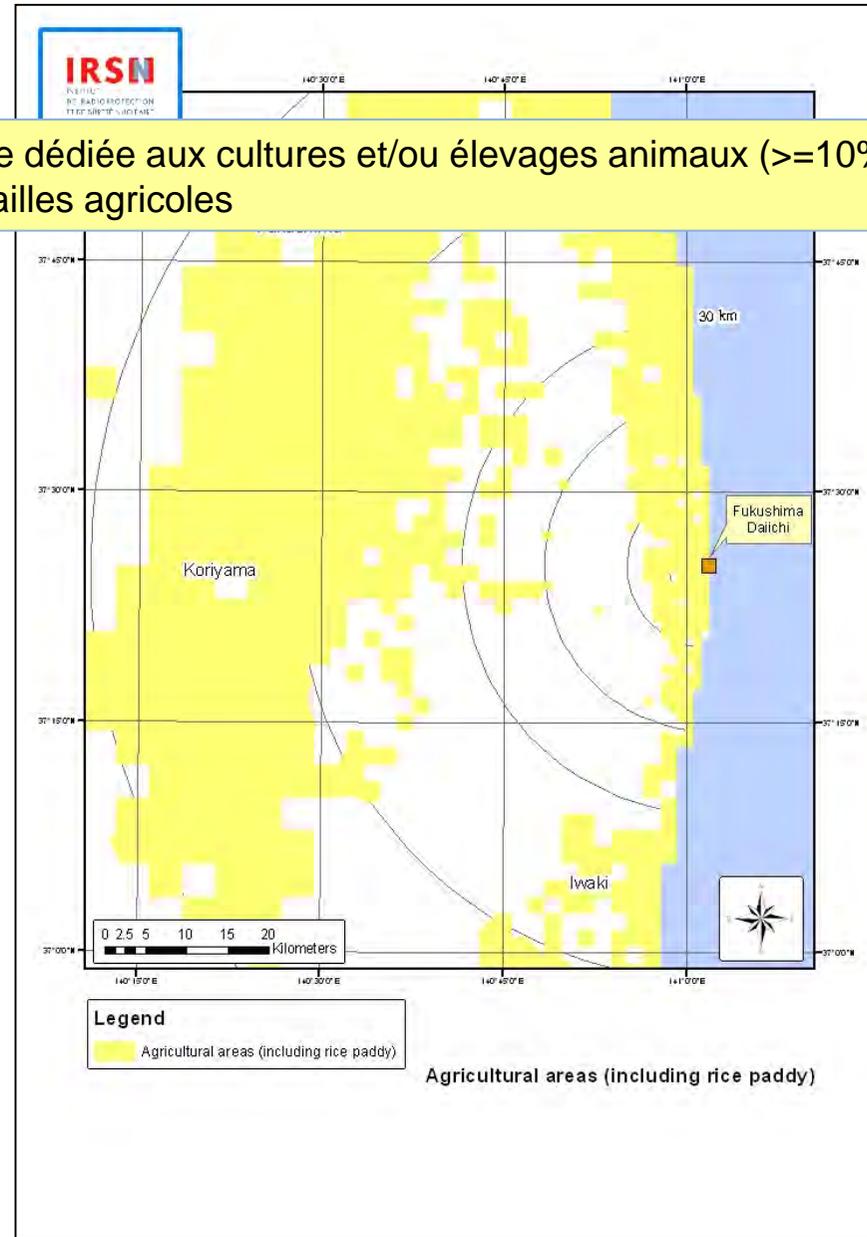
Modélisation SYMBIOSE

Le modèle spatial



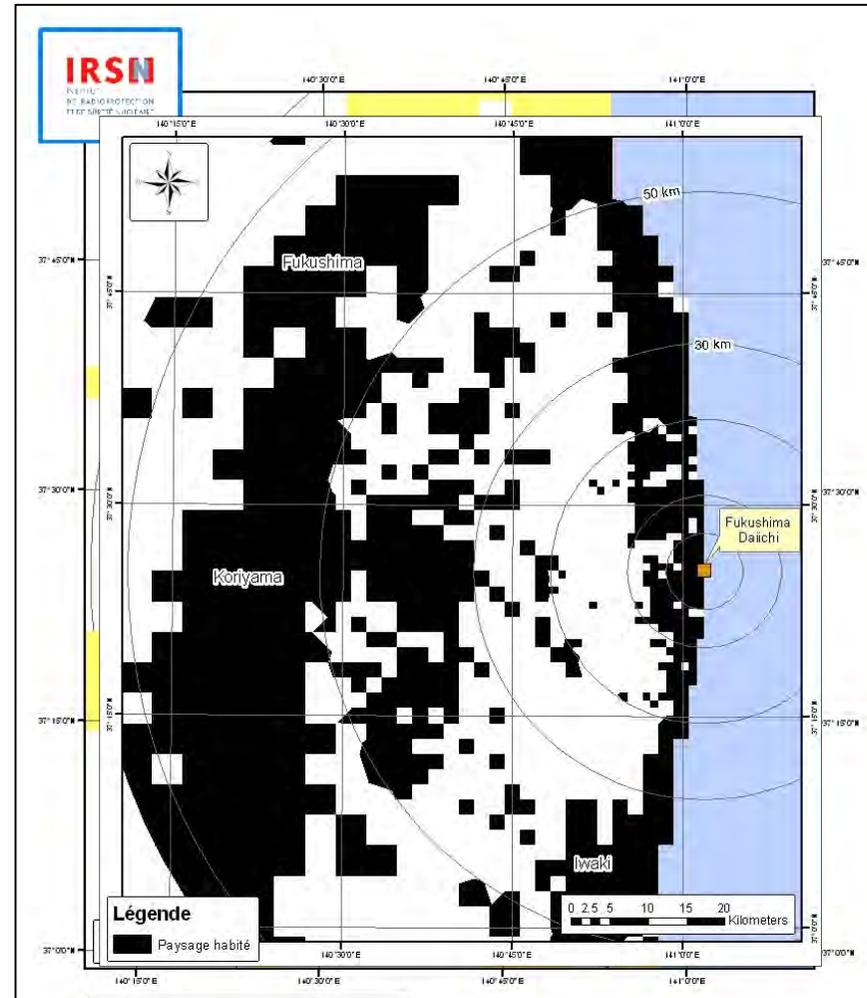
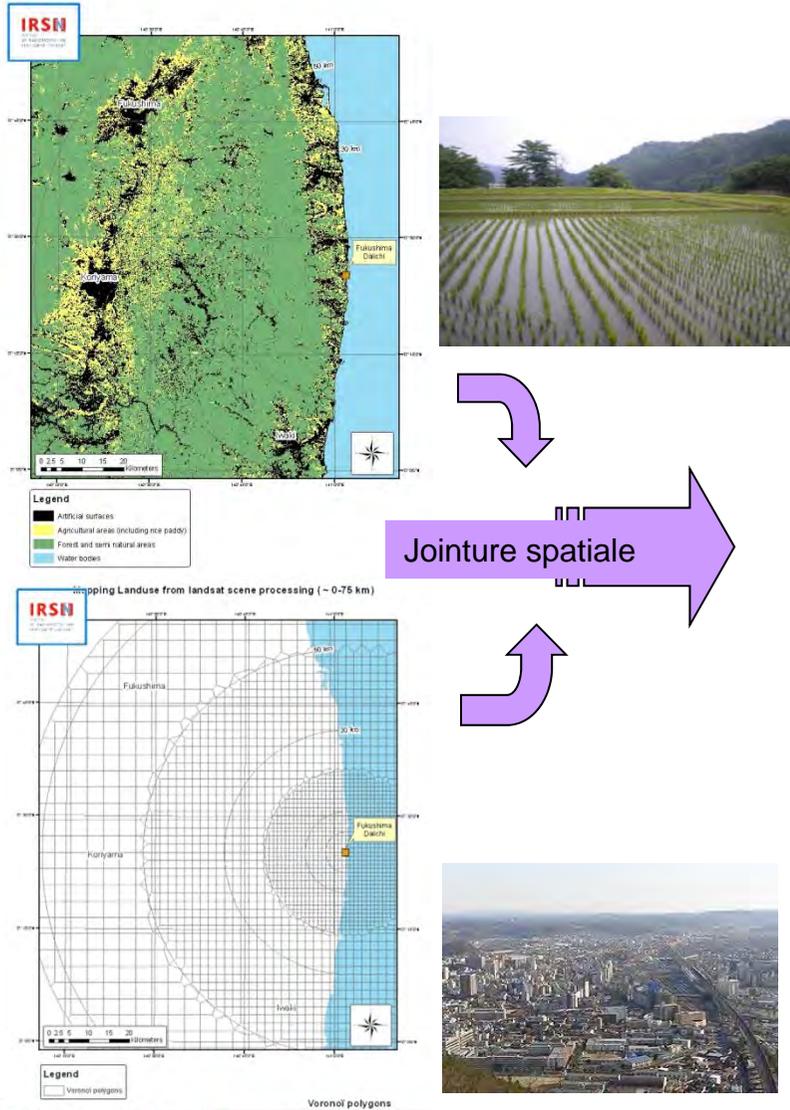
Jointure spatiale

Surface dédiée aux cultures et/ou élevages animaux ($\geq 10\%$)
 830 mailles agricoles



Modélisation SYMBIOSE

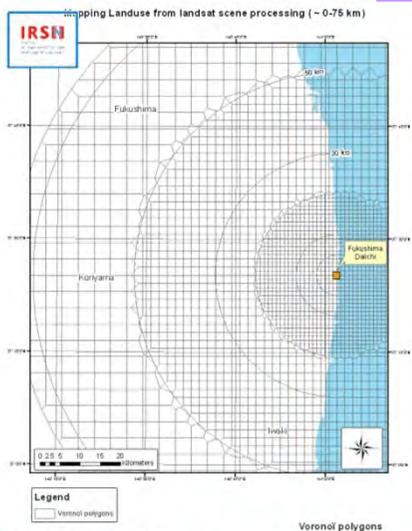
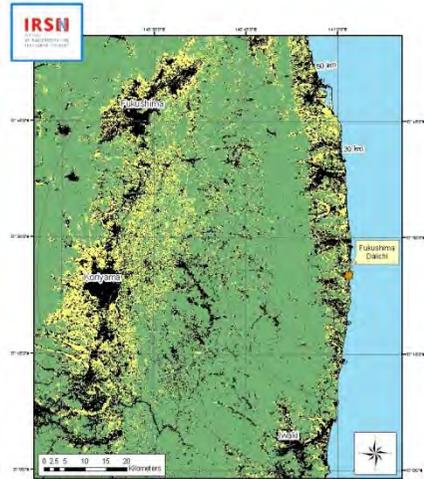
Le modèle spatial



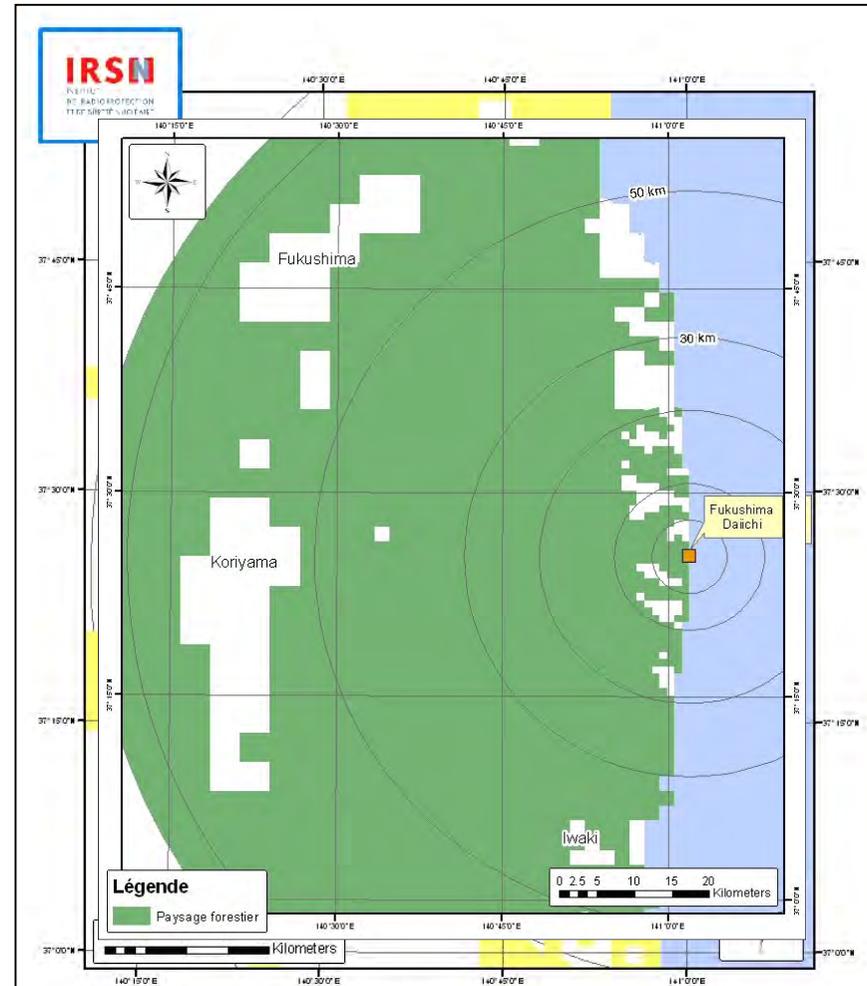
Surface d'habitat si plus de 5% de sa surface est consacrée à l'habitat (1091 mailles anthropiques)

Modélisation SYMBIOSE

Le modèle spatial



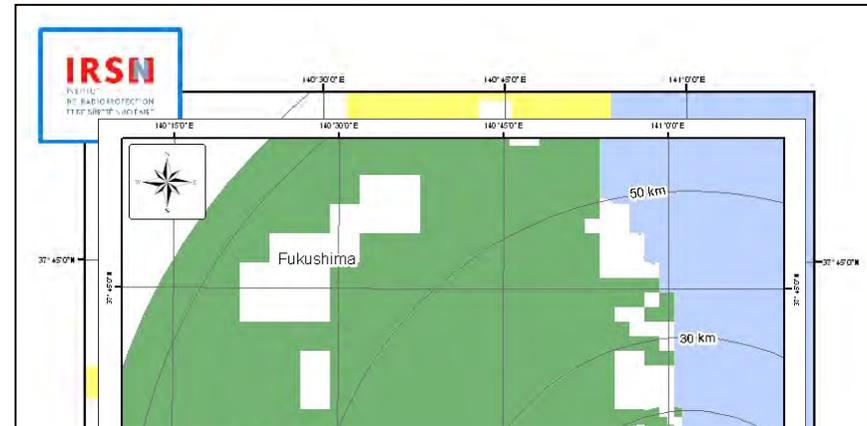
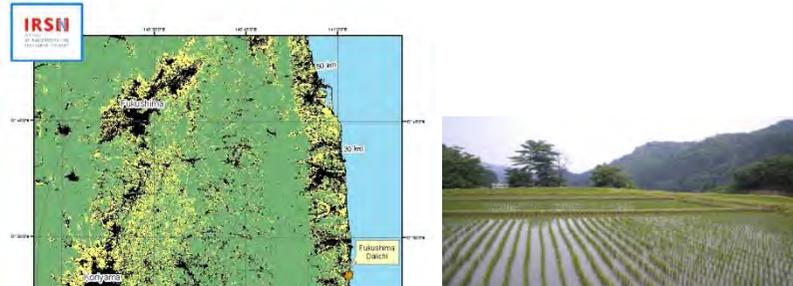
Jointure spatiale



Forêt si plus de 10% de sa surface est consacrée à l'habitat
(1231 mailles forestières)

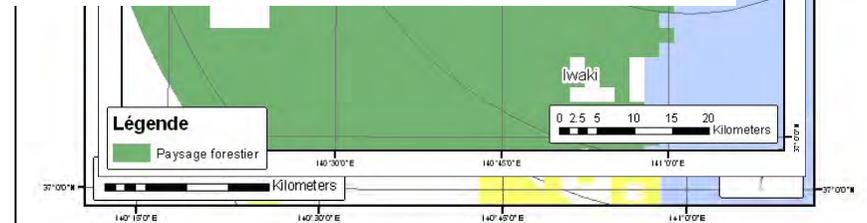
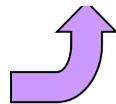
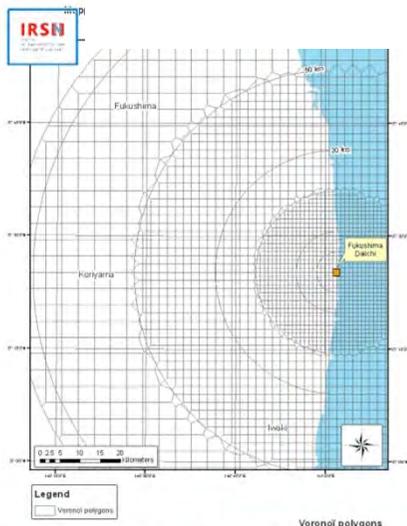
Modélisation SYMBIOSE

Le modèle spatial



Les calculs sont réalisés sur ces entités
vecteur polygone topologique

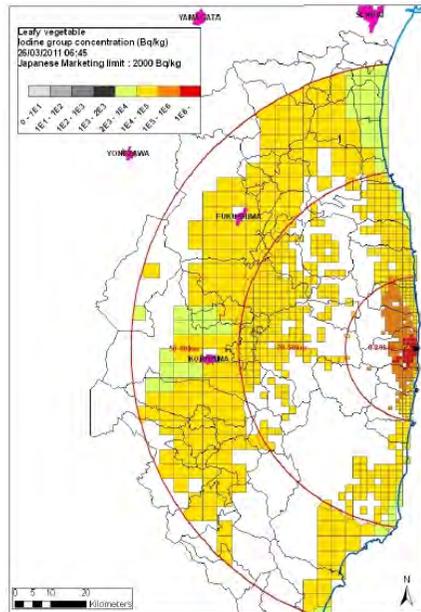
Les résultats sont représentés sur ces mêmes entités
au moyen d'une géodatabase (Esri)



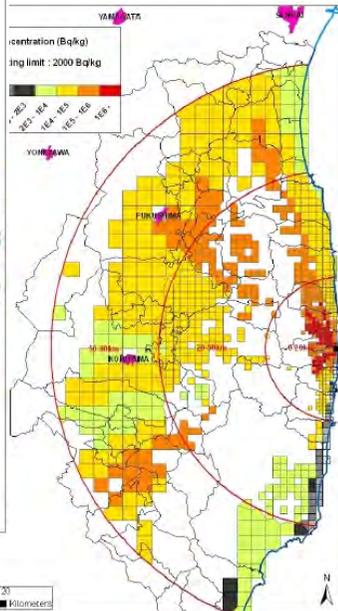
Forêt si plus de 10% de sa surface est consacrée à l'habitat
(1231 mailles forestières)

Modélisation SYMBIOSE

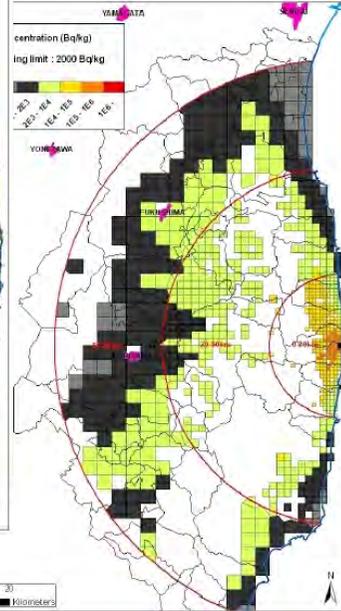
Résultat : Légumes Feuilles – Groupe Iodes



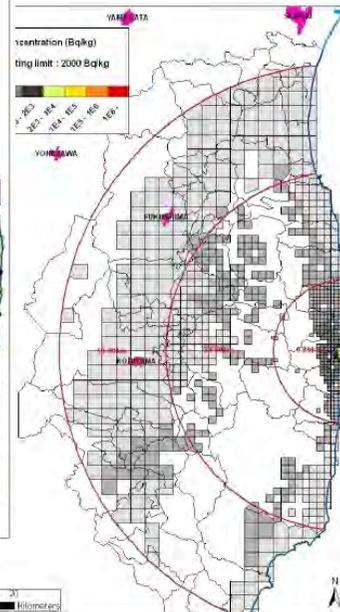
16 mars



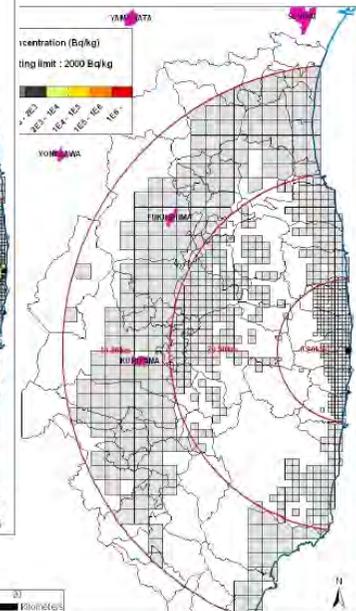
26 mars



06 avril

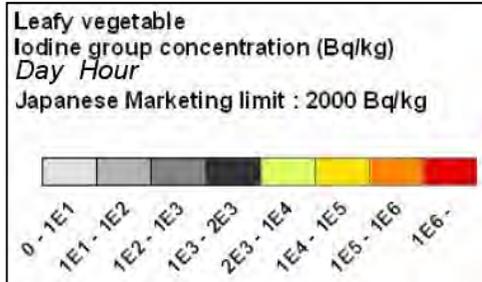


06 mai



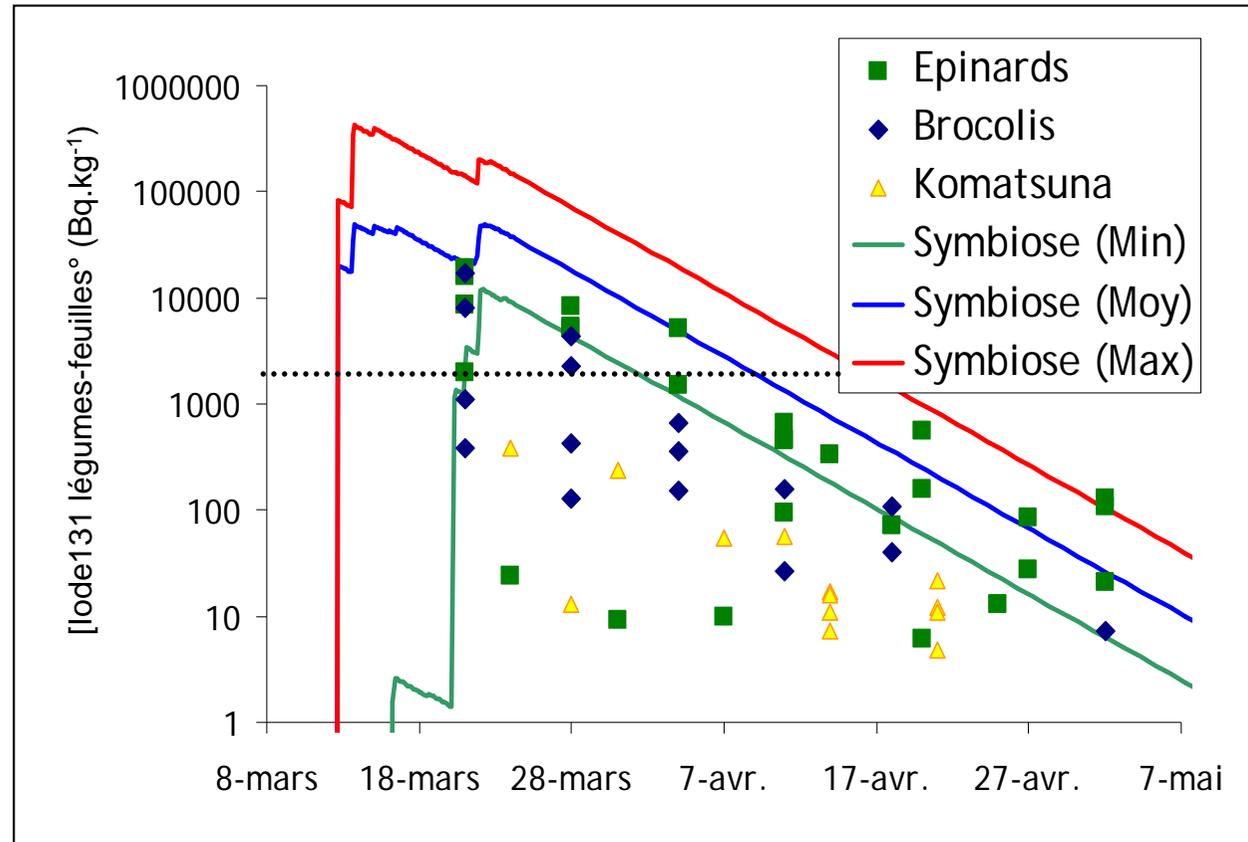
06 juin

Animation



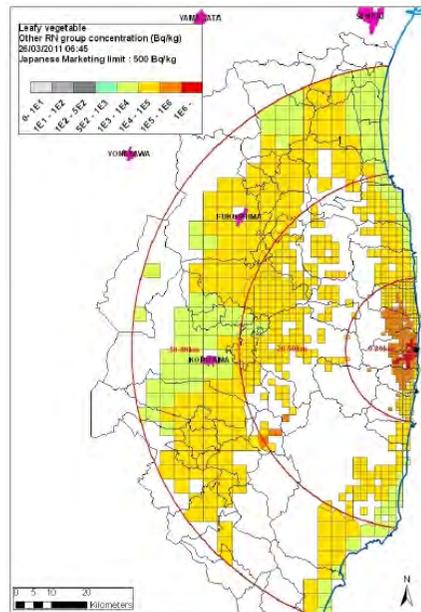
Modélisation SYMBIOSE

Résultat vs mesure (Légumes Feuilles – Iode131)

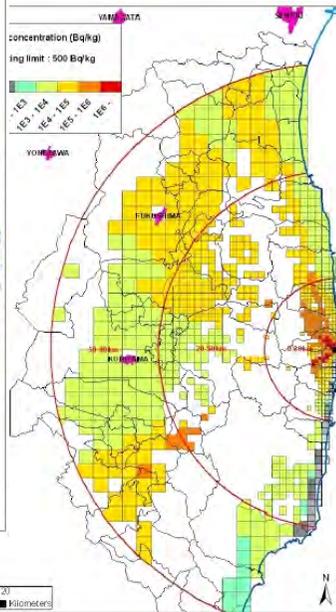


Modélisation SYMBIOSE

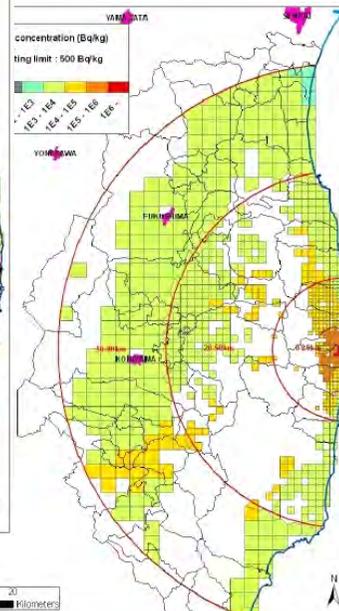
Autre résultat : Végétal Feuille – Groupe Autres Radionucléides (Césiums)



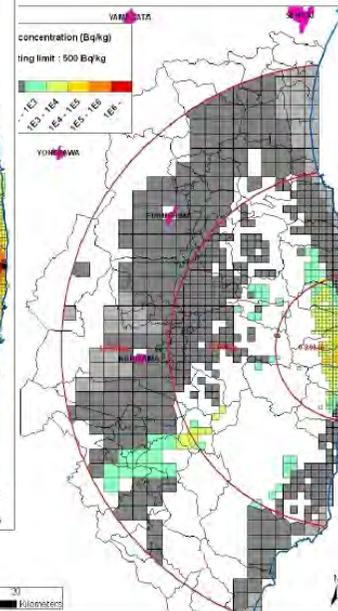
16 mars



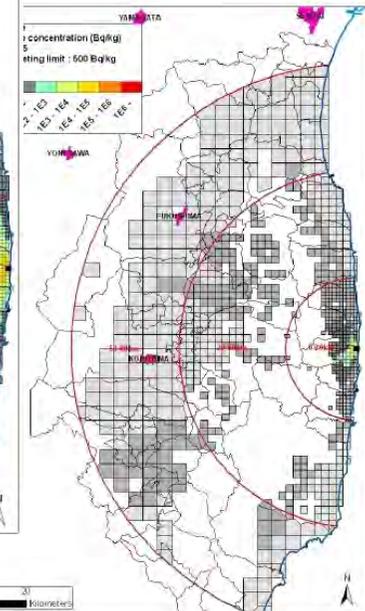
26 mars



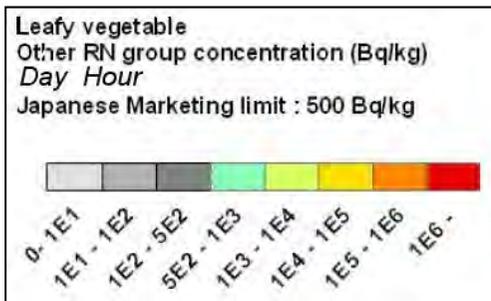
06 avril



05 mai

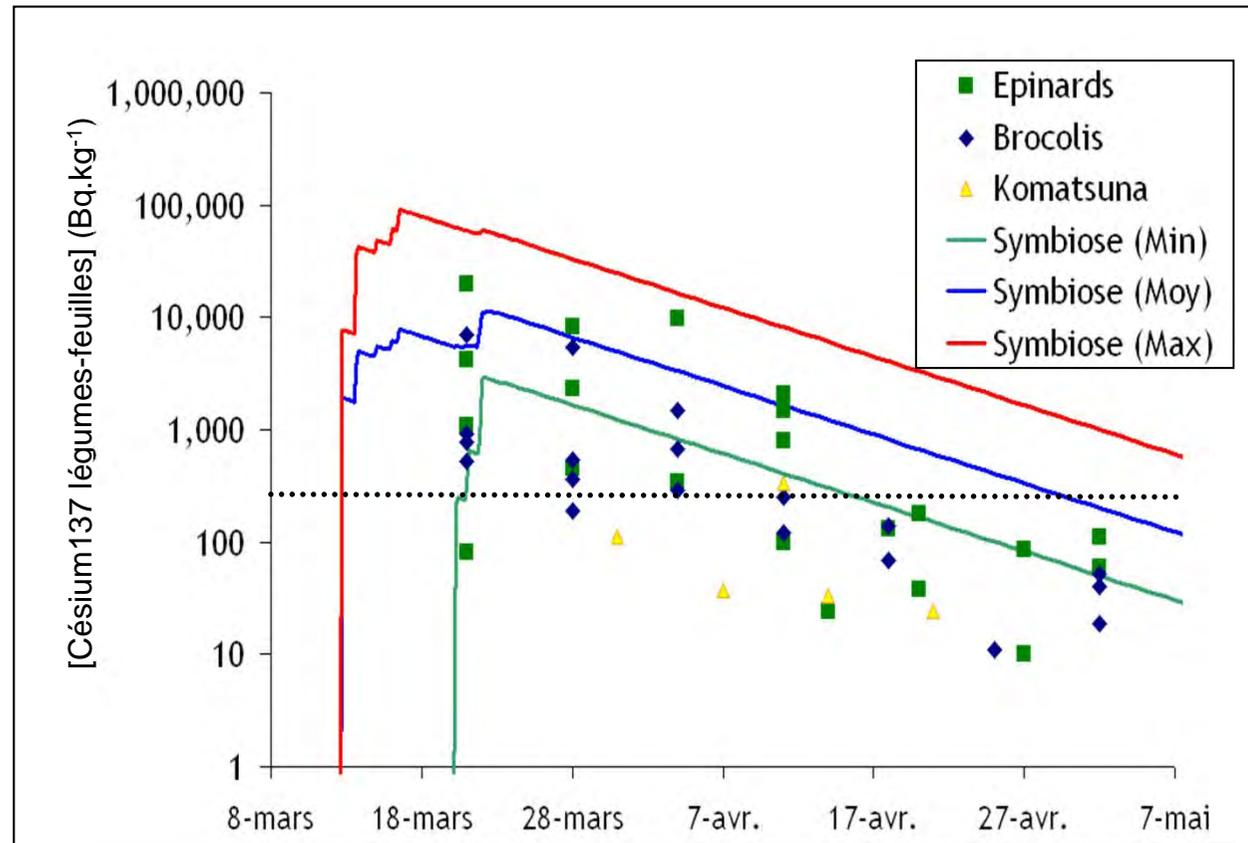


06 juin



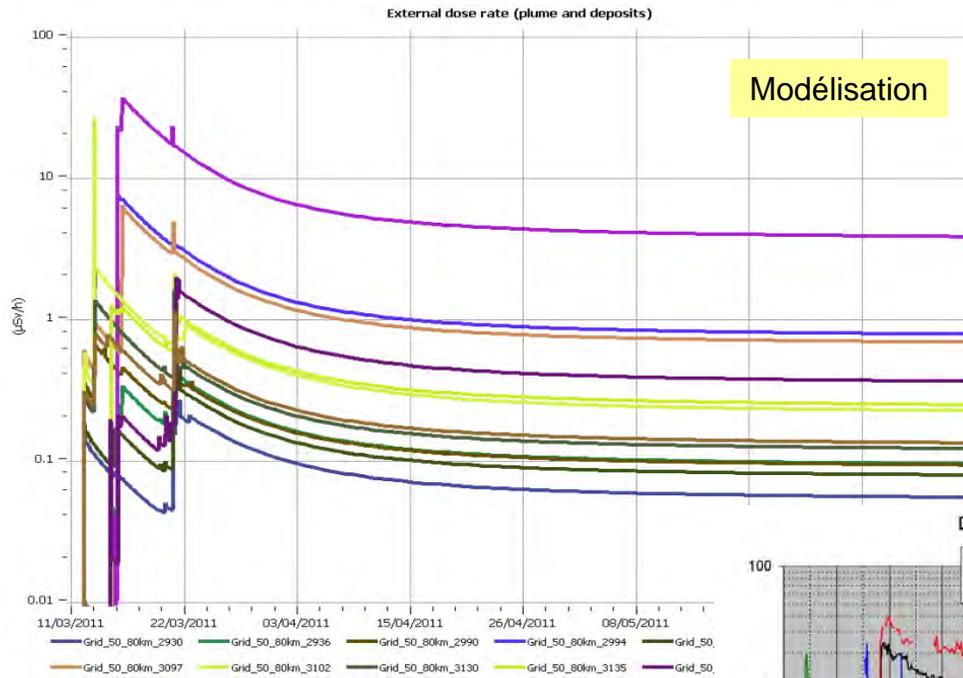
Modélisation SYMBIOSE

Résultat vs mesure (Légumes Feuilles – Césium137)

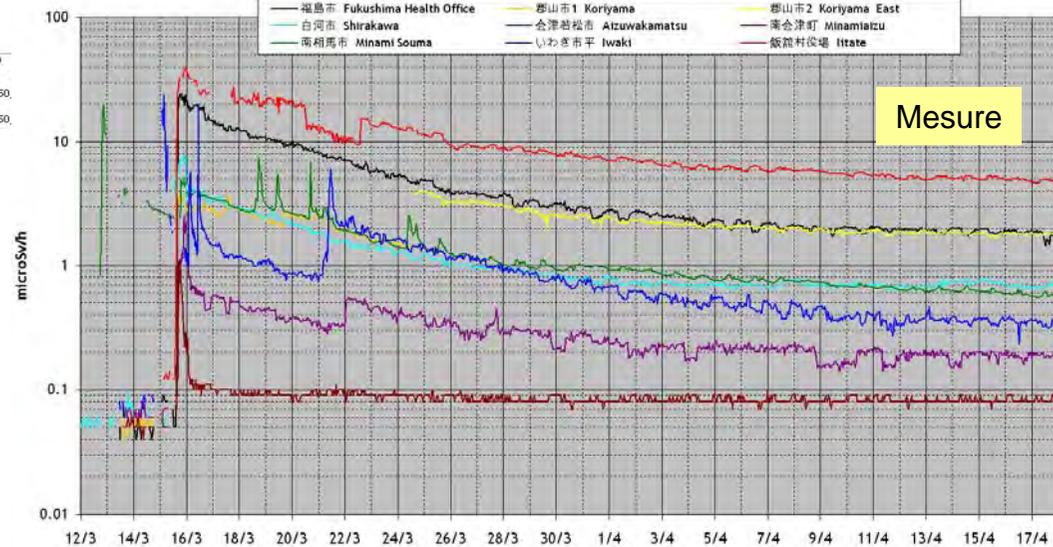


Modélisation SYMBIOSE

Autre résultat : Débit de Dose



Débits de dose mesurés sur la préfecture de Fukushima - ref <http://oku.edu.mie-u.ac.jp/~rikumura/stat/data/>

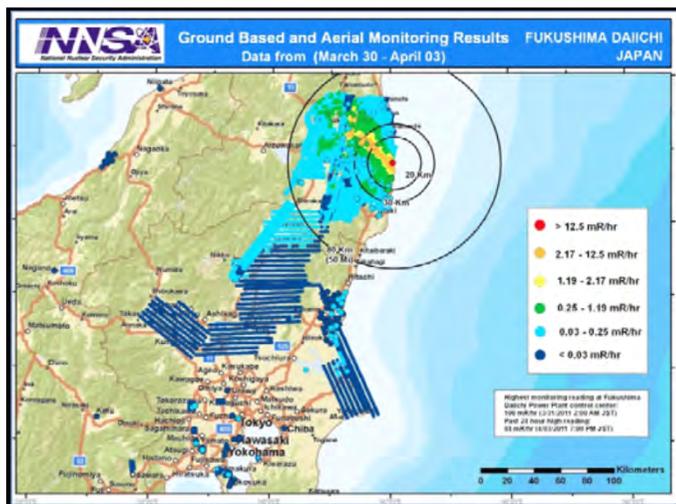


Modélisation du dénombrement de la population

Demande interne, un mois après, dans le but d'estimer l'impact sanitaire de l'accident de Fukushima
Durant le premier mois, aucune communication de donnée sanitaire fiable, les seules informations d'ordre sanitaire disponibles se limitaient à :

- **L'évacuation des populations dans un rayon de 20 km autour de la centrale (décidée le 12 mars)**
- Le confinement des populations dans un rayon compris entre 20 et 30 km autour de la centrale
- La consigne donnée par les autorités américaines de rapatrier leurs ressortissants situés dans un rayon de 80 km autour de la centrale

Première cartographie : données du DoE/NNSA publiées sur leur site Internet le 7 avril 2011 révèlent des *débits de dose particulièrement élevés dans une bande orientée vers le nord-ouest, d'une vingtaine de kilomètres de large et de 50 à 70 km de profondeur (dépôts du 15-16 mars)*

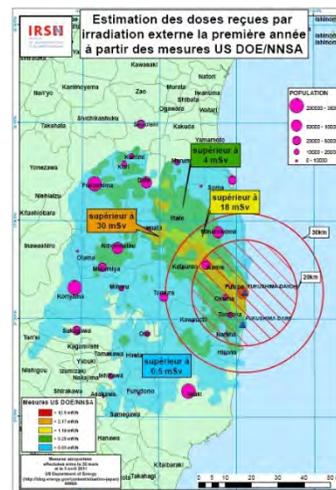
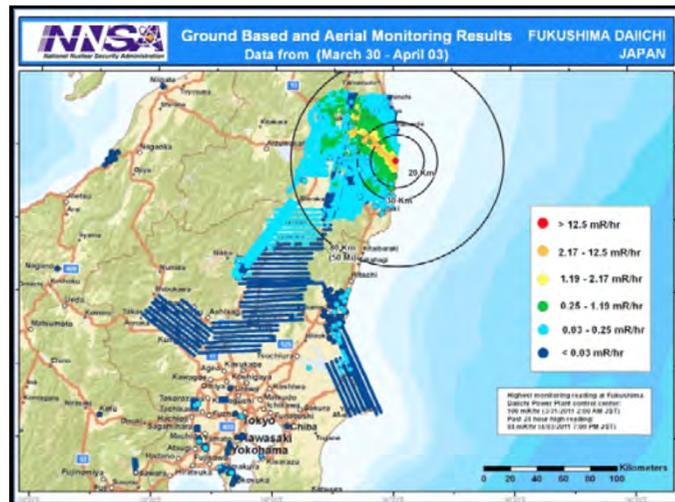


Modélisation du dénombrement de la population

Demande interne, un mois après, dans le but d'estimer l'impact sanitaire de l'accident de Fukushima
Durant le premier mois, aucune communication de donnée sanitaire fiable, les seules informations d'ordre sanitaire disponibles se limitaient à :

- L'évacuation des populations dans un rayon de 20 km autour de la centrale (décidée le 12 mars)
- Le confinement des populations dans un rayon compris entre 20 et 30 km autour de la centrale
- La consigne donnée par les autorités américaines de rapatrier leurs ressortissants situés dans un rayon de 80 km autour de la centrale

Première cartographie : données du DoE/NNSA publiées sur leur site Internet le 7 avril 2011 révèlent des *débits de dose particulièrement élevés dans une bande orientée vers le nord-ouest, d'une vingtaine de kilomètres de large et de 50 à 70 km de profondeur (dépôts du 15-16 mars)*



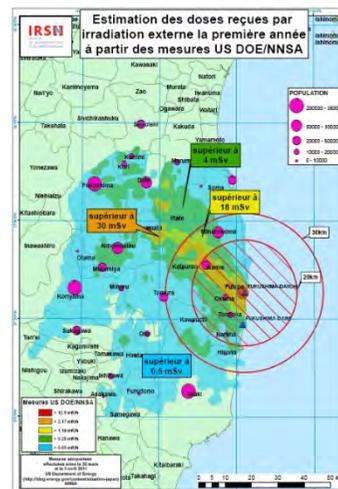
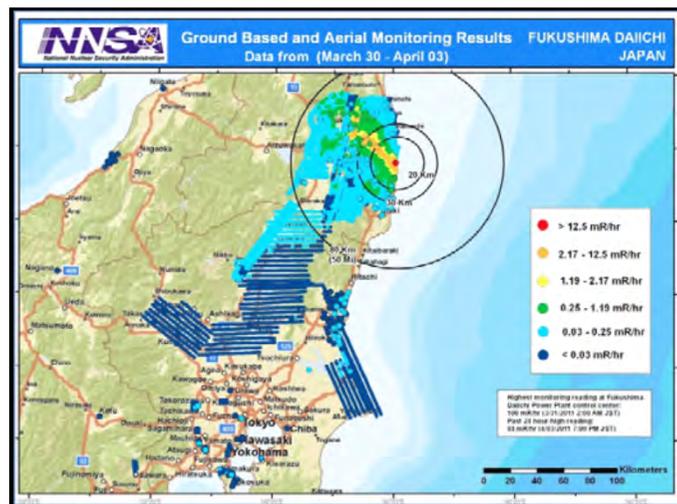
Conversion en mSv
par l'IRSN (8 avril)

Modélisation du dénombrement de la population

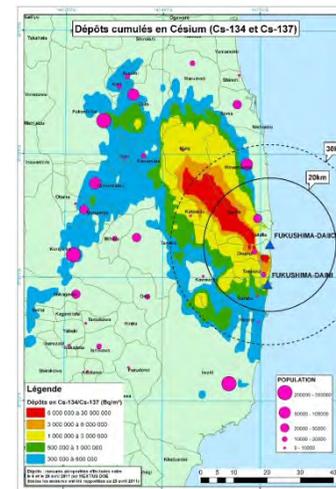
Demande interne, un mois après, dans le but d'estimer l'impact sanitaire de l'accident de Fukushima
Durant le premier mois, aucune communication de donnée sanitaire fiable, les seules informations d'ordre sanitaire disponibles se limitaient à :

- L'évacuation des populations dans un rayon de 20 km autour de la centrale (décidée le 12 mars)
- Le confinement des populations dans un rayon compris entre 20 et 30 km autour de la centrale
- La consigne donnée par les autorités américaines de rapatrier leurs ressortissants situés dans un rayon de 80 km autour de la centrale

Première cartographie : données du DoE/NNSA publiées sur leur site Internet le 7 avril 2011 révèlent des *débits de dose particulièrement élevés dans une bande orientée vers le nord-ouest, d'une vingtaine de kilomètres de large et de 50 à 70 km de profondeur (dépôts du 15-16 mars)*



Conversion en mSv par l'IRSN (8 avril)



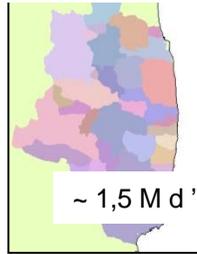
Dépôts fournis par le MEXT (23 avril)

Le croisement donne accès à un **facteur de conversion**

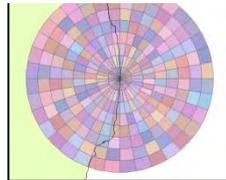
Modélisation du dénombrement de la population

Croisement avec les populations

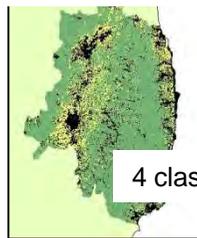
Commune – Population (nb d'hab.)



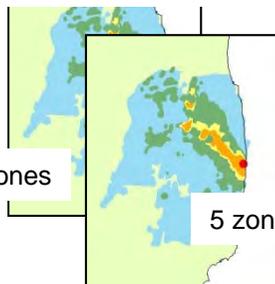
Secteur-Couronne



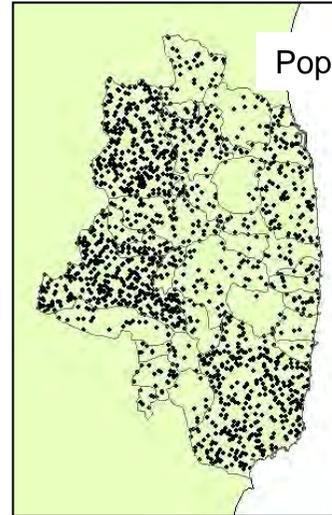
Occupation des sols



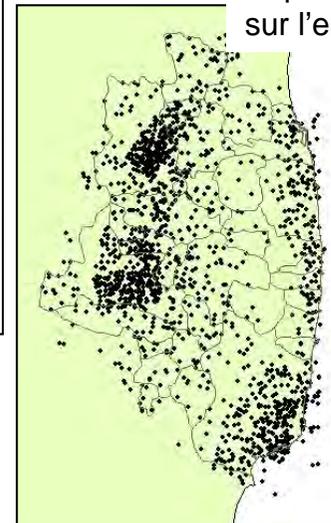
Contamination des territoires



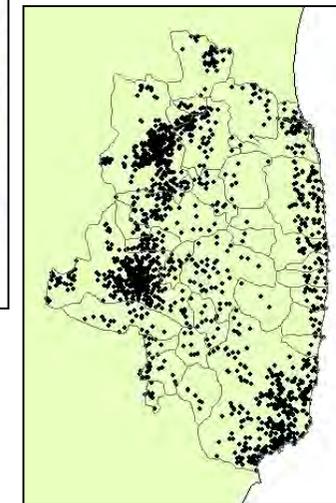
Population dense



Population répartie de façon homogène



Population répartie de façon homogène sur l'entité géographique couronne/secteur



Population répartie de façon homogène dans les zones artificielles (image Landsat)



Modélisation du dénombrement de la population

On projette alors les doses externes qui seront reçues par les populations vivant en territoire contaminé toute leur vie (ce qui donnent des valeurs particulièrement significatives supérieures à 10 - 200 mSv).

L'effectif des populations impliquées pourrait être de l'ordre de 70.000 personnes dont 9.500 enfants.

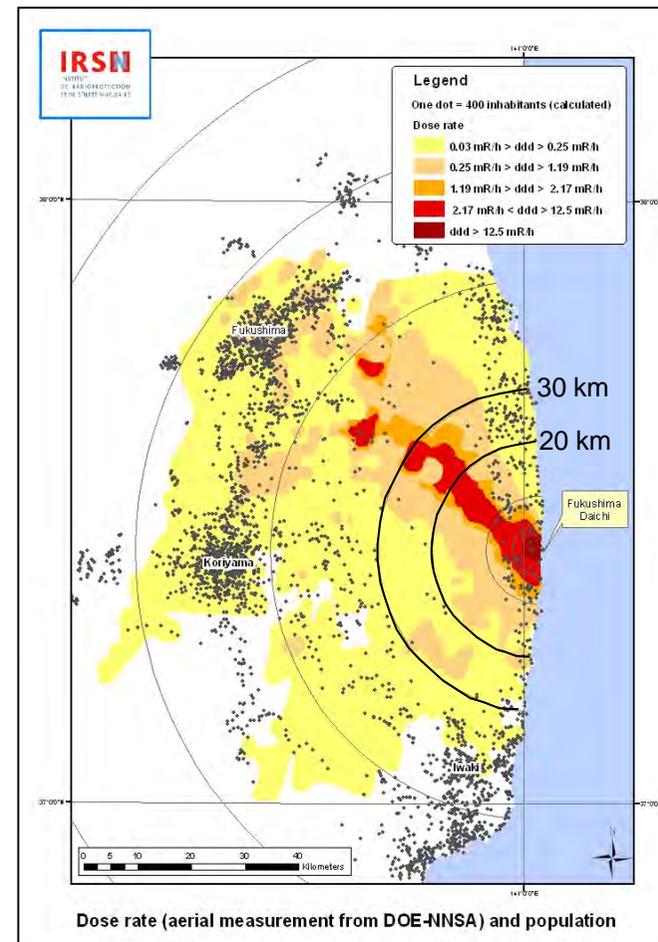
Doses hors l'alimentation.

Dépôts Césiums	Zone1	Zone2	Zone3	Zone4	Zone5
Estimation			69 400		
de la	292 000		26 400		
population		43 000	21 000	3 100	3 200

Prise de décision !

Certaines populations doivent être évacuées

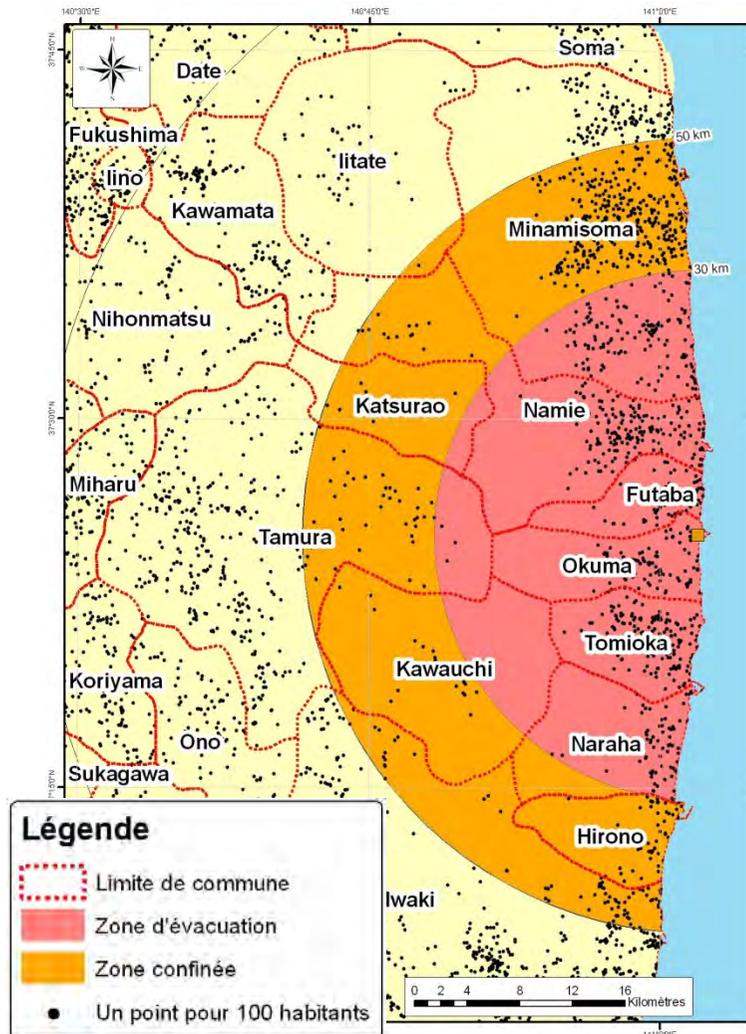
Si on évacue, on réduit la dose de 60% (1an) et 82% (3 mois)



Modélisation du dénombrement de la population

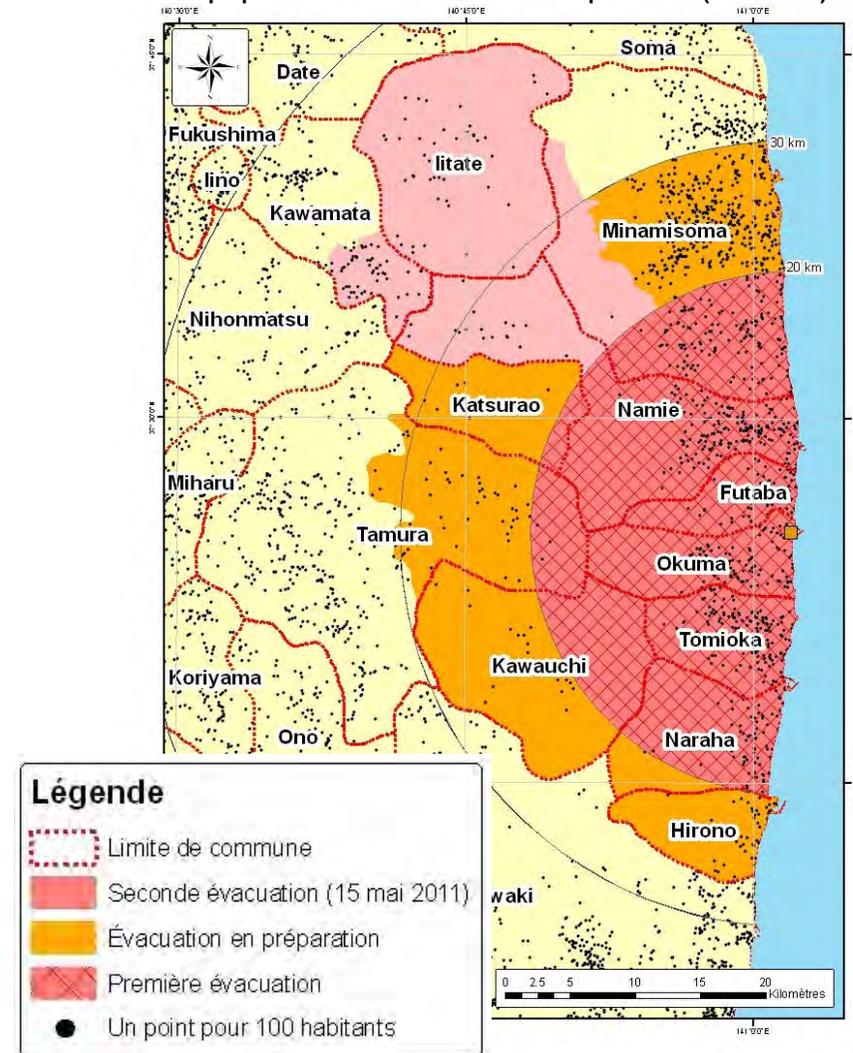
Première plan de protection (12 mars 2011)

Évacuation dans un rayon de 20 km 80.000 personnes
Confinement dans les 20 à 30 km 65.000 personnes (→ 22 avril)



Second plan de protection (15 mai 2011)

Évacuation En préparation d'évacuation 20.000 personnes
55.000 personnes (→ 21 août)



Modélisation du dénombrement de la population

Première plan de protection (12 mars 2011)

Évacuation dans un rayon de 20 km 80.000 personnes
Confinement dans les 20 à 30 km 65.000 personnes (→ 22 avril)



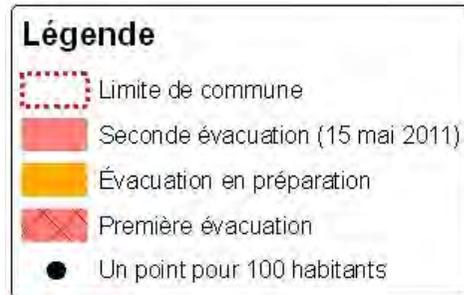
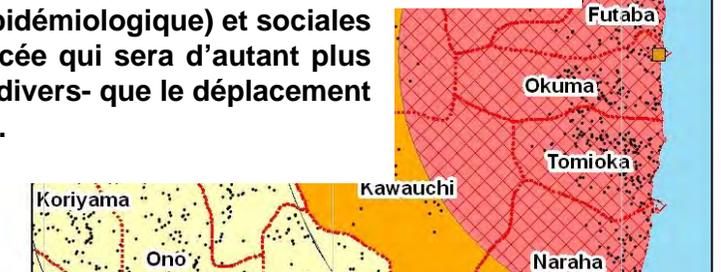
Soit environ 250.000 personnes soumises à un déménagement forcé
270.000 personnes (Source AIEA)

→ Conséquences sanitaires (suivi épidémiologique) et sociales (traumatisme à la population déplacée qui sera d'autant plus grave -troubles psychosomatiques divers- que le déplacement sera long et, pour certains, définitif).

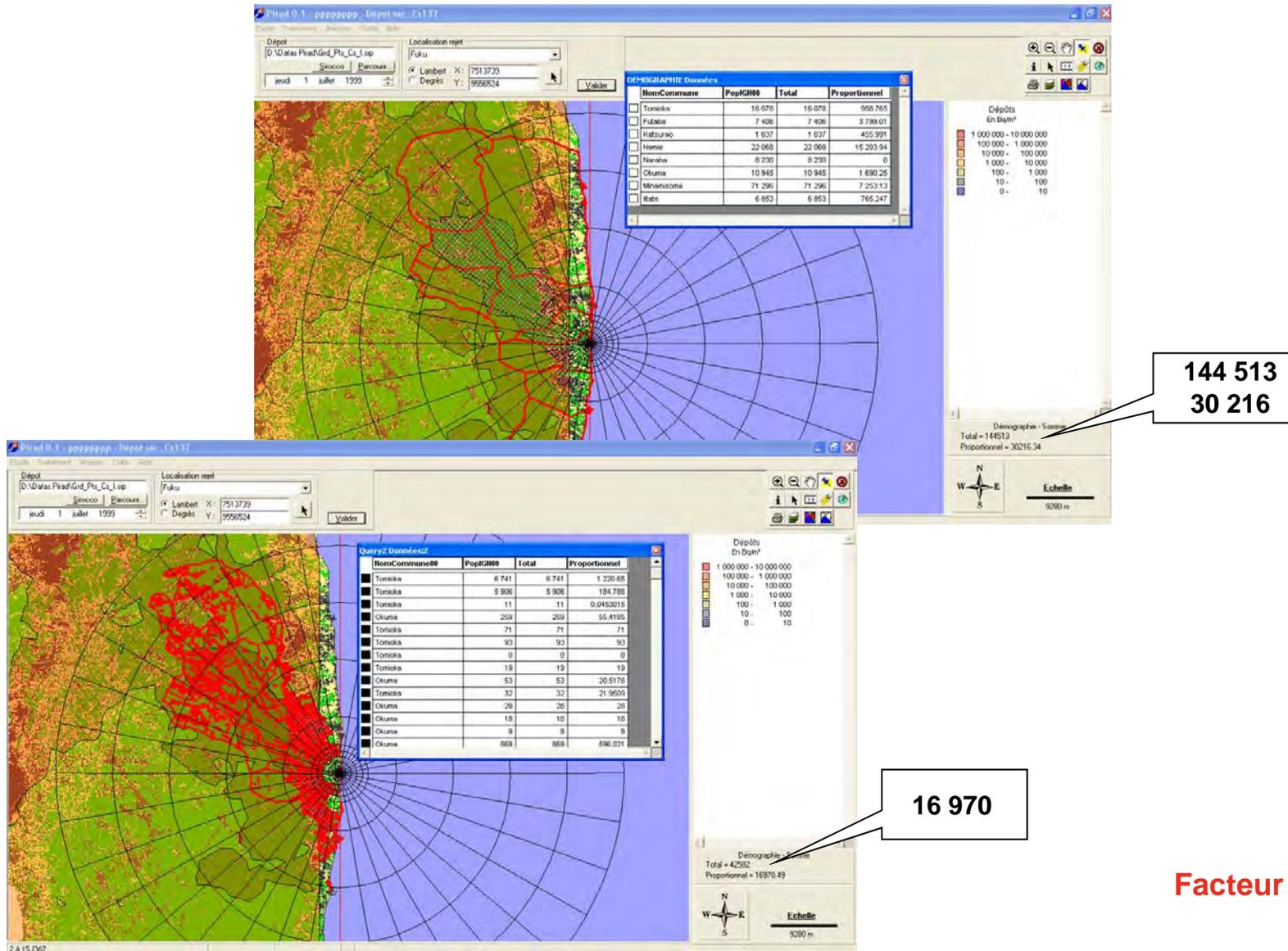


Second plan de protection (15 mai 2011)

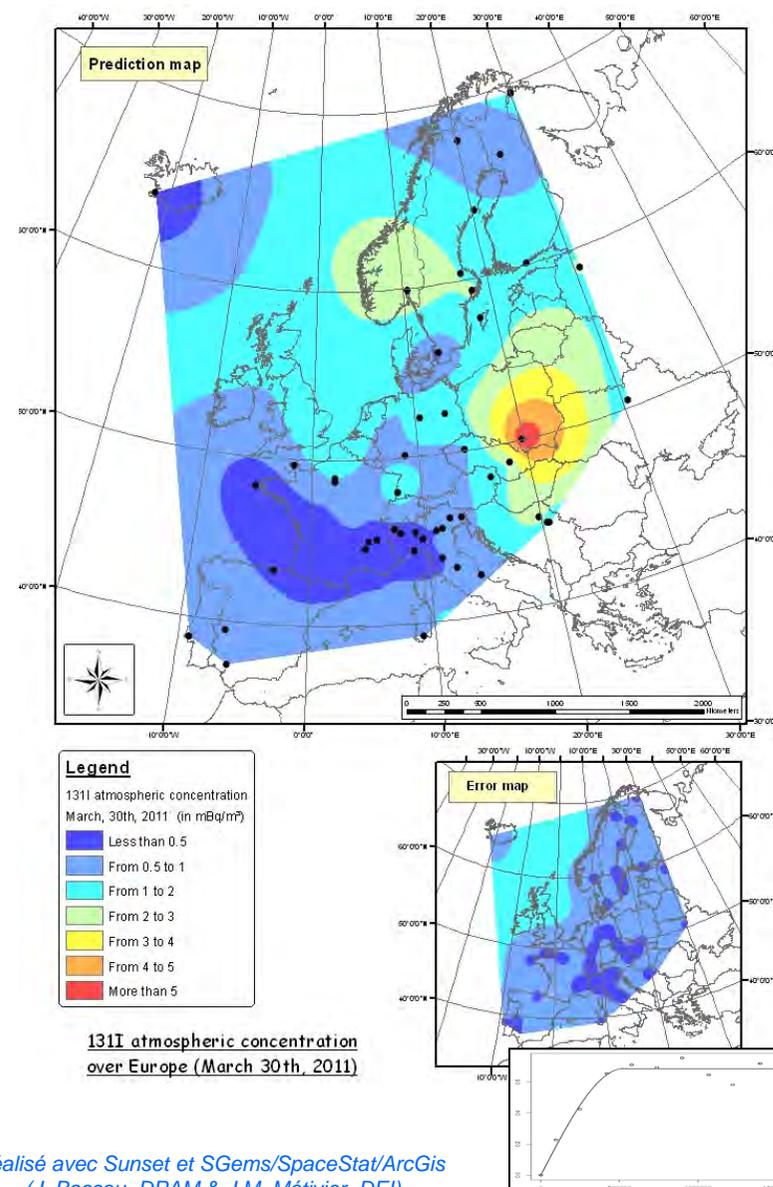
Évacuation 20.000 personnes
En préparation d'évacuation 55.000 personnes (→ 21 août)



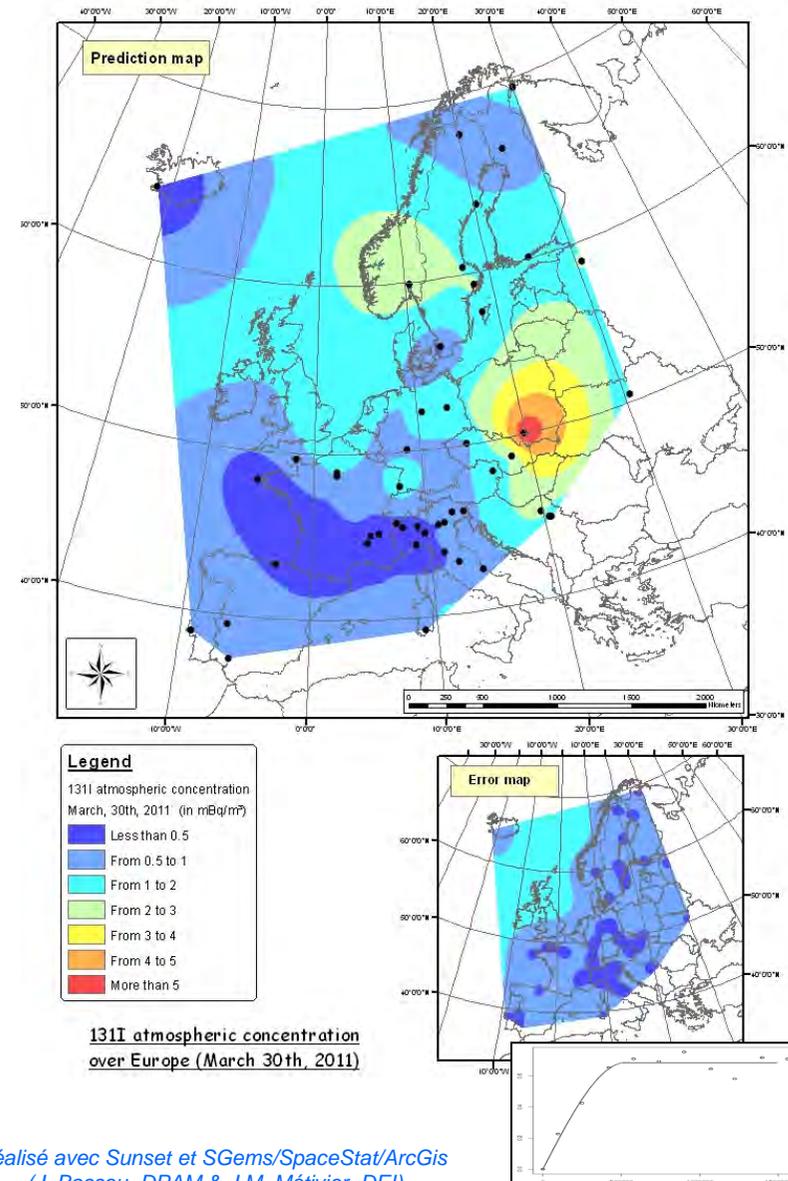
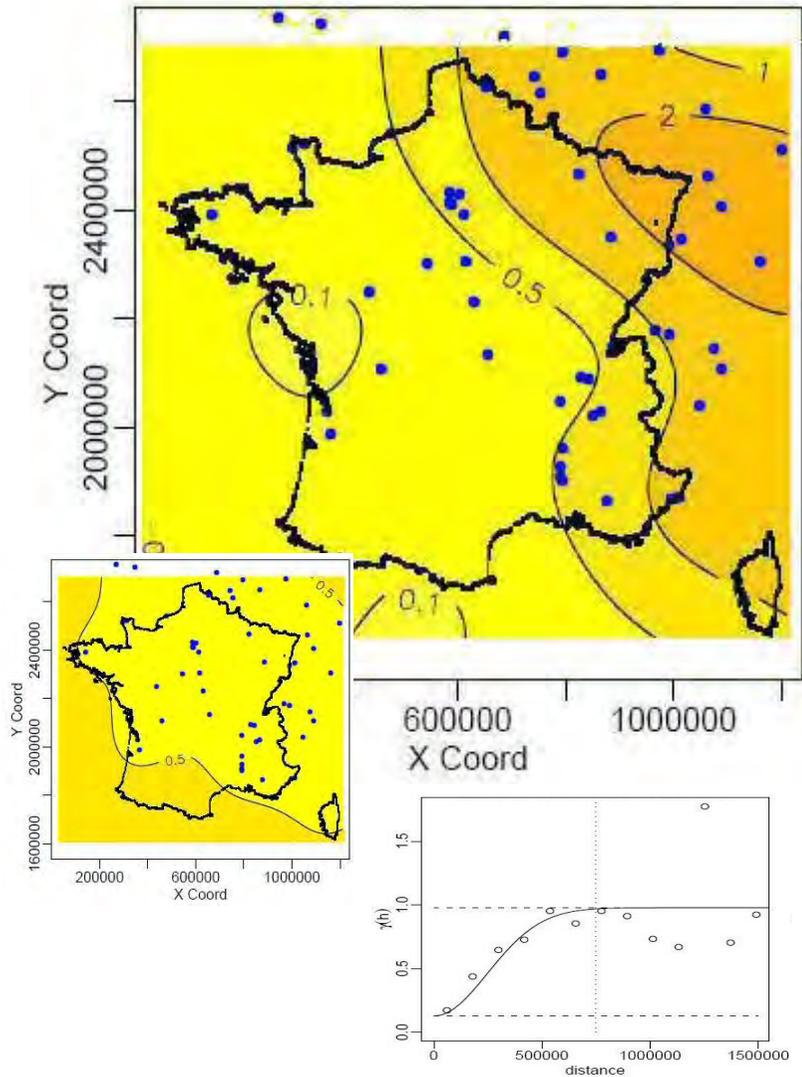
Couplage Code de calcul / SIG



«Nuage radioactif» Modélisation géostatistique



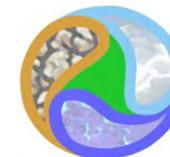
«Nuage radioactif» Modélisation géostatistique



Réalisé avec Sunset et SGems/SpaceStat/ArcGis
 (J. Baccou, DPAM & J.M. Métivier, DEI)

Réalisé avec R (L. Garcia-Sanchez 1 J.M. Métivier)

Conclusion



1^{ère} étude : Une première !

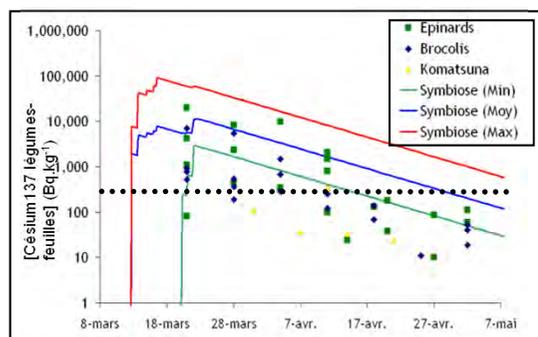
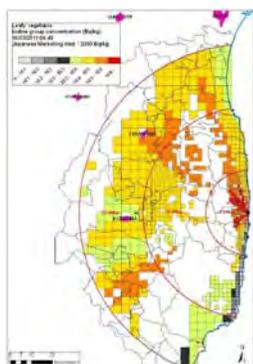
Image Landsat - (pré et post-traitement en cours d'automatisation)

Réalisation d'une étude d'impact accidentel en urgence - Une semaine – 3 hommes - ~ 5h CPU

Plate-forme Symbiose opérationnelle avec mise au point d'un simulateur au pied levé

Manque de données site-spécifiques => hypothèses majorantes

Importance des données spatiales et de l'outil SIG (même en crise) : document d'aide à la décision



Conclusion

1^{ère} étude : Une première !

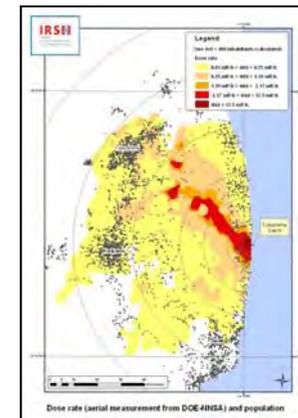
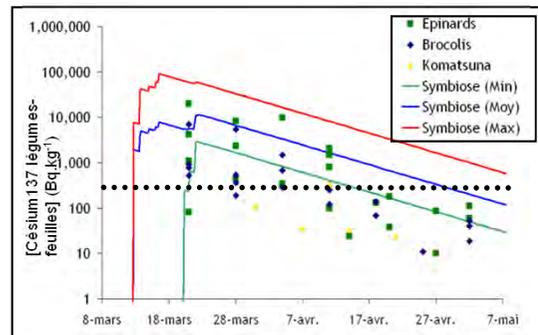
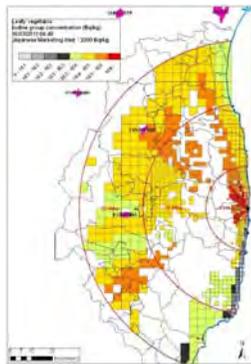
Image Landsat - (pré et post-traitement en cours d'automatisation)

Réalisation d'une étude d'impact accidentel en urgence - Une semaine – 3 hommes - ~ 5h CPU

Plate-forme Symbiose opérationnelle avec mise au point d'un simulateur au pied levé

Manque de données site-spécifiques => hypothèses majorantes

Importance des données spatiales et de l'outil SIG (même en crise) : document d'aide à la décision



2^{nde} étude

Prise en compte de la géographie pour distribuer la population

Non prise en compte de la géographie réelle des dépôts

Prise de décision

Conclusion

1^{ère} étude : Une première !

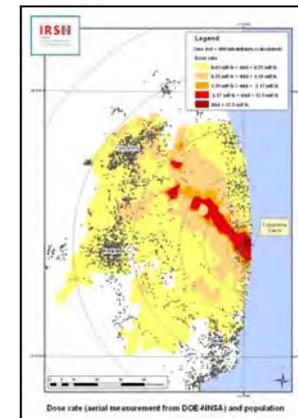
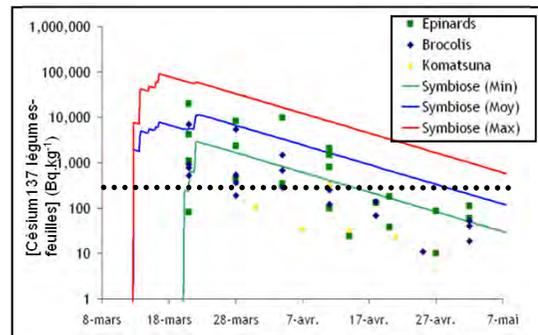
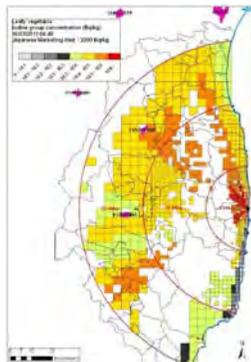
Image Landsat - (pré et post-traitement en cours d'automatisation)

Réalisation d'une étude d'impact accidentel en urgence - Une semaine – 3 hommes - ~ 5h CPU

Plate-forme Symbiose opérationnelle avec mise au point d'un simulateur au pied levé

Manque de données site-spécifiques => hypothèses majorantes

Importance des données spatiales et de l'outil SIG (même en crise) : document d'aide à la décision



2^{nde} étude

Prise en compte de la géographie pour distribuer la population

Non prise en compte de la géographie réelle des dépôts

Prise de décision

Couplage Code / SIG

Conclusion

1^{ère} étude : Une première !

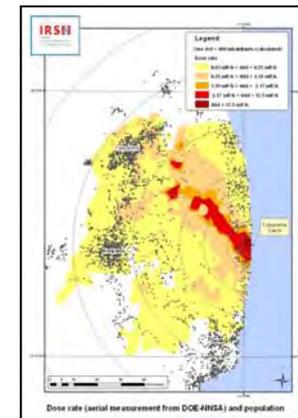
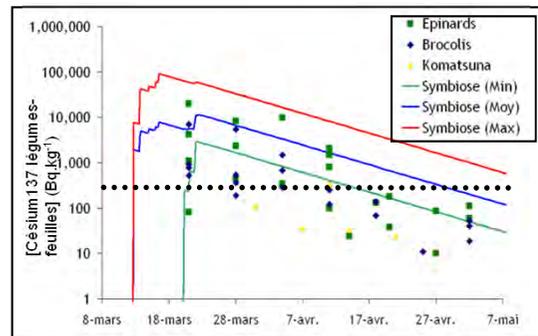
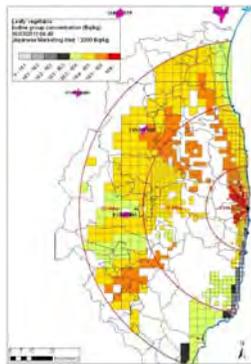
Image Landsat - (pré et post-traitement en cours d'automatisation)

Réalisation d'une étude d'impact accidentel en urgence - Une semaine – 3 hommes - ~ 5h CPU

Plate-forme Symbiose opérationnelle avec mise au point d'un simulateur au pied levé

Manque de données site-spécifiques => hypothèses majorantes

Importance des données spatiales et de l'outil SIG (même en crise) : document d'aide à la décision



2^{nde} étude

Prise en compte de la géographie pour distribuer la population

Non prise en compte de la géographie réelle des dépôts

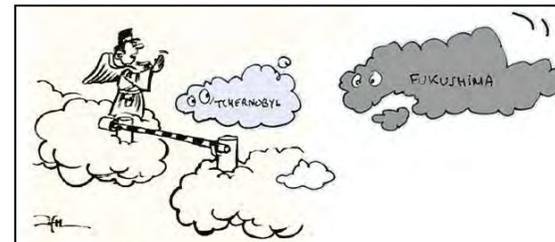
Prise de décision

Couplage Code / SIG

3^{ème} étude

Passage du nuage

Prise de décision



Conclusion

1^{ère} étude : Une première !

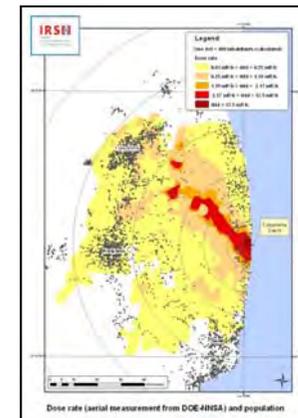
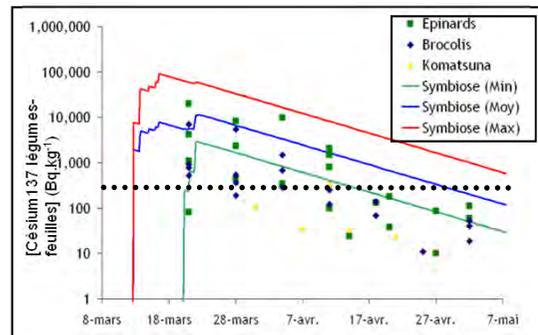
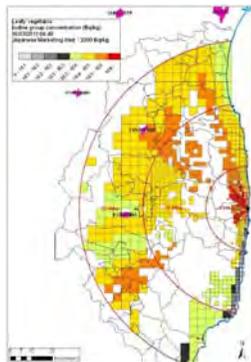
Image Landsat - (pré et post-traitement en cours d'automatisation)

Réalisation d'une étude d'impact accidentel en urgence - Une semaine – 3 hommes - ~ 5h CPU

Plate-forme Symbiose opérationnelle avec mise au point d'un simulateur au pied levé

Manque de données site-spécifiques => hypothèses majorantes

Importance des données spatiales et de l'outil SIG (même en crise) : document d'aide à la **décision**



2^{nde} étude

Prise en compte de la géographie pour distribuer la population

Non prise en compte de la géographie réelle des dépôts

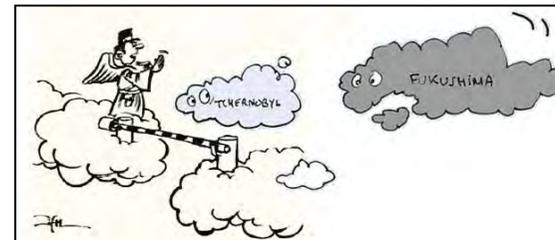
Prise de **décision**

Couplage Code / SIG

3^{ème} étude

Passage du nuage

Prise de **décision**





どうも有難う

