

**IRSN**

INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

*Faire avancer la sûreté nucléaire*

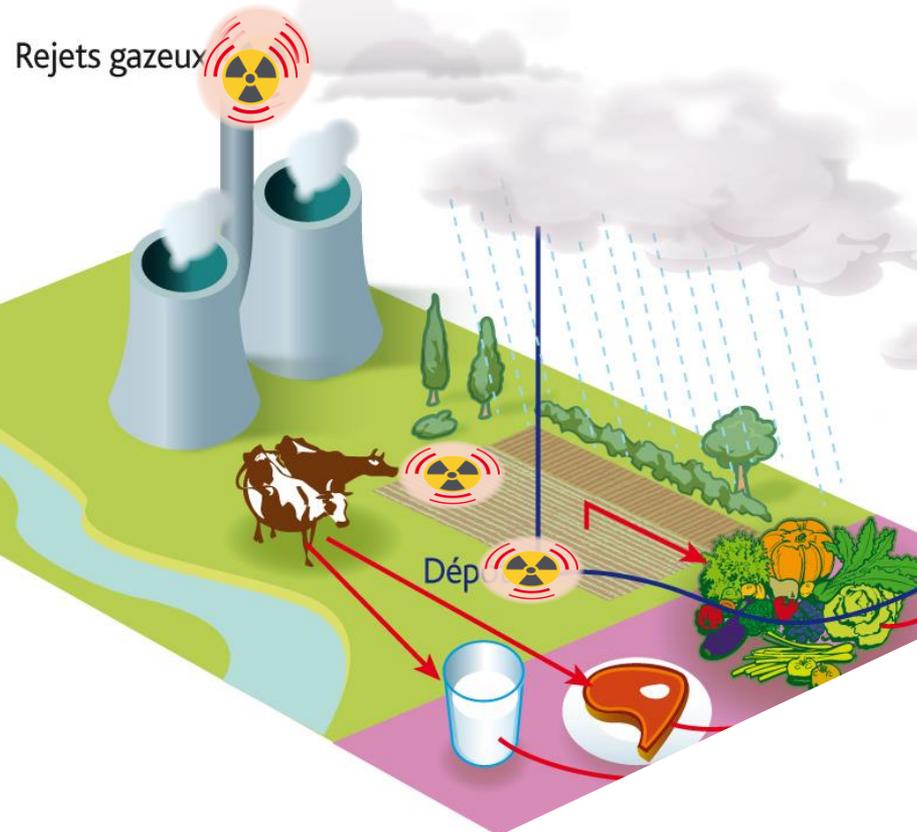
# Les modèles de dispersion atmosphérique en situation de crise

Anne MATHIEU

Irène KORSAKISSOK, Denis QUELO,  
Jérôme GROELL, Olivier SAUNIER,  
Damien DIDIER

- 
- Contexte de la gestion de crise
  - Les modèles de dispersion pour la gestion de crise.  
L'exemple de l'IRSN
  - Validation des modèles utilisés pour la gestion de crise

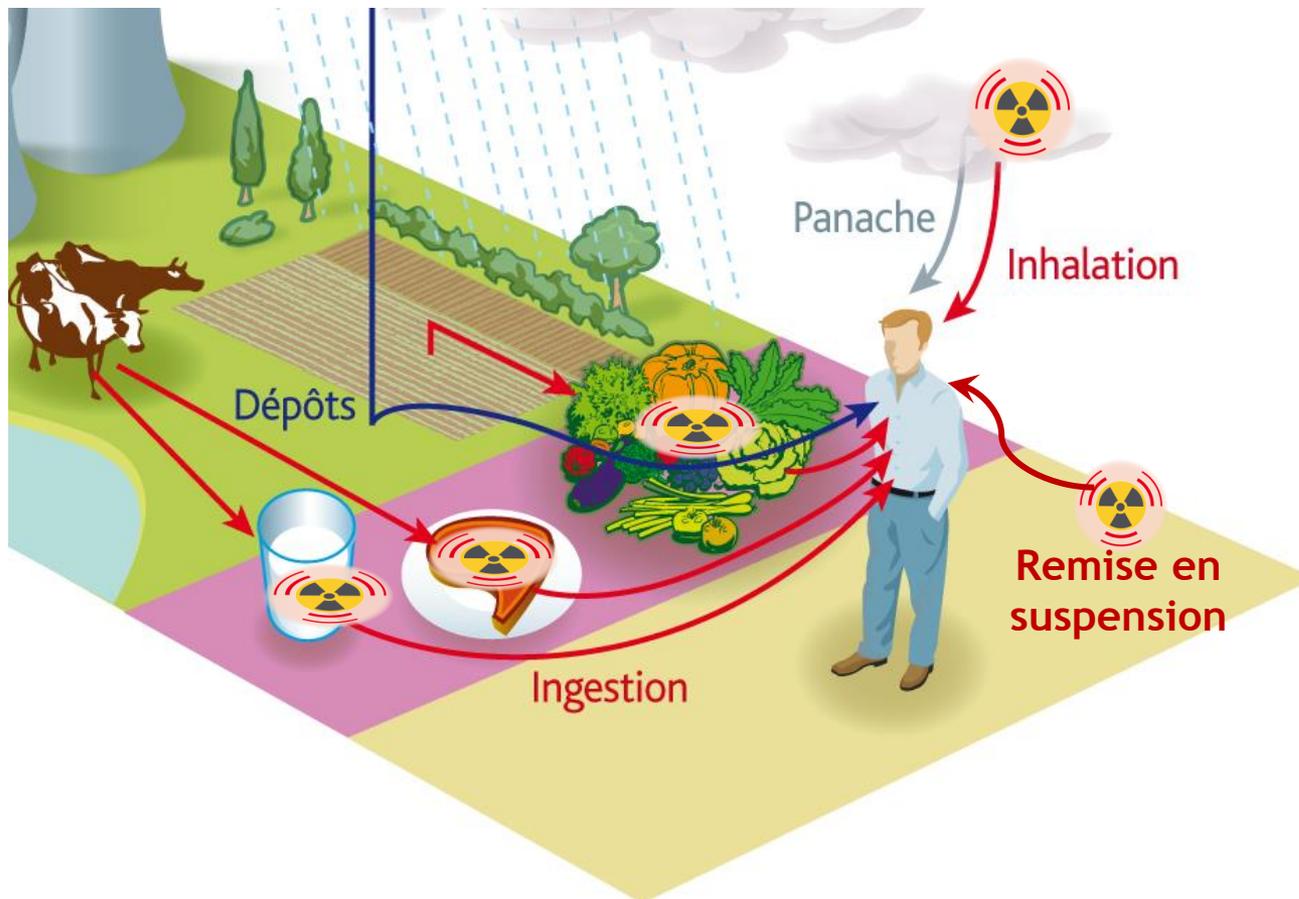
# Contexte de la gestion de crise



Des rejets accidentels dans l'atmosphère conduisent à la contamination de l'air et par dépôt à celle des :

- ▶ sols et surfaces bâties
- ▶ productions agricoles

Et à l'exposition des populations



Irradiation externe  
▶ par le panache

Irradiation externe  
▶ par les dépôts

Contamination interne  
▶ par inhalation du panache

Contamination interne  
▶ par ingestion de denrées contaminées

Contamination interne  
▶ par inhalation de particules et gaz remis en suspension

## Objectif de la gestion d'une situation accidentelle : protéger les populations

### Phase de menace

- **Evaluation prévisionnelle des conséquences de l'accident en cours (anticipation)**
  - Proposition d'actions de protection des populations

### Phase de rejet

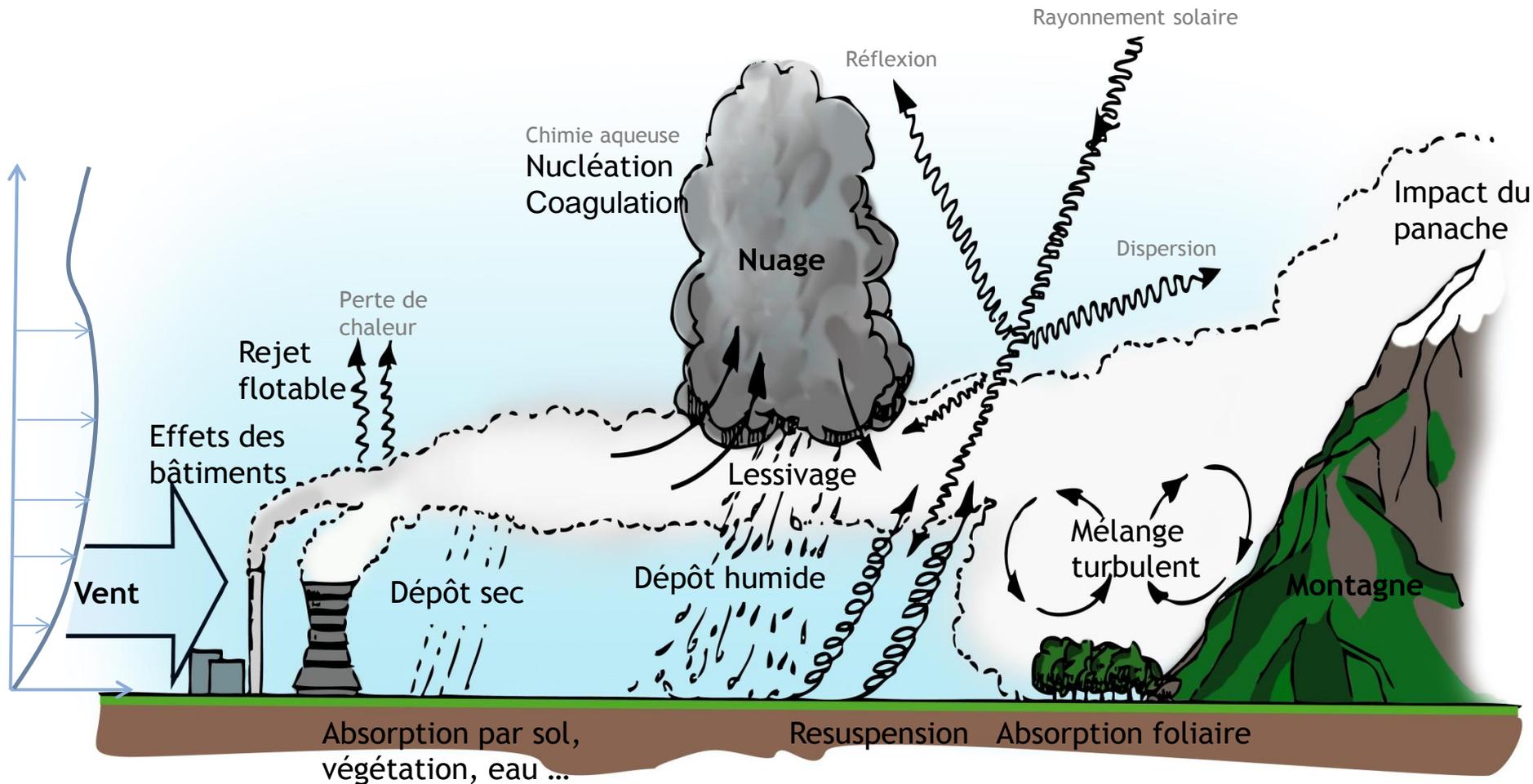
- **Analyse des résultats de mesure en fonction de leur disponibilité**
  - Confirmation/réévaluation des actions de protections prises
- **Révision des prévisions**

### Phase post accidentelle

- **Evaluation de l'exposition durable des populations**
  - Proposition d'actions de protection, mise en place d'un zonage post accidentel
- **Gestion de la contamination des territoires**

➔ Importance de l'outil de modélisation des transferts des radionucléides dans l'environnement

## ➔ Les transferts atmosphériques impliquent un grand nombre de phénomènes complexes, d'échelles très variées



## ➔ Nécessité de simplifier !

# Les modélisation de la dispersion atmosphérique

Débit de rejet en fonction du temps

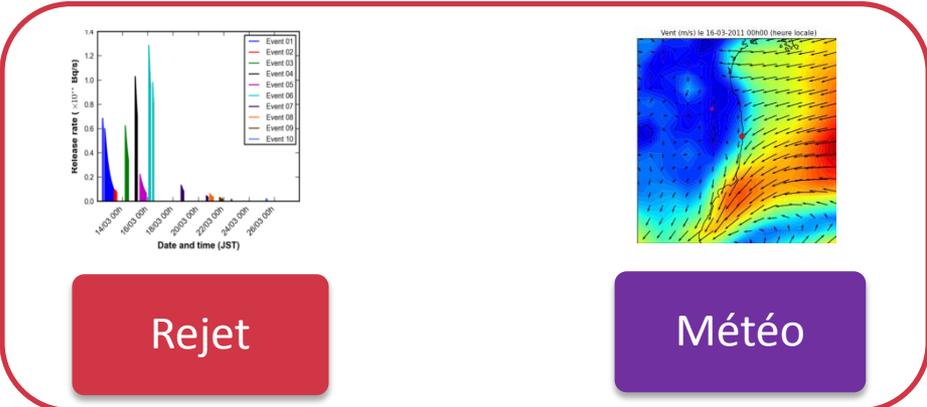
Composition isotopique

Hauteur du rejet

Température, vitesse d'éjection

Occupation sol

Relief, bâtiments



Observation ponctuelle

Préprocesseur météo (profils)

Météo 3D

Terrain

Modèle

Advection

Dépôt sec

Décroissance rad et filiation

Diffusion

Dépôt humide

Chimie, physique aérosols



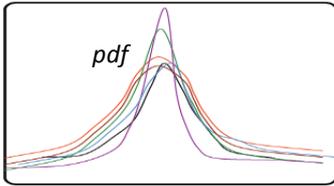
Concentrations dans l'air

Dépôts au sol

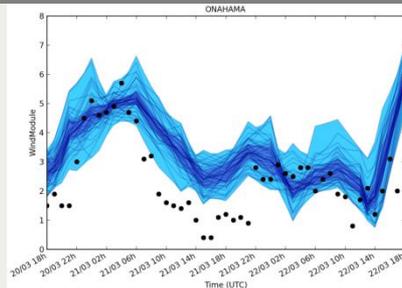
Débit de dose, doses

# La réalité des situations accidentelles : de nombreuses incertitudes - L'exemple de l'accident de Fukushima

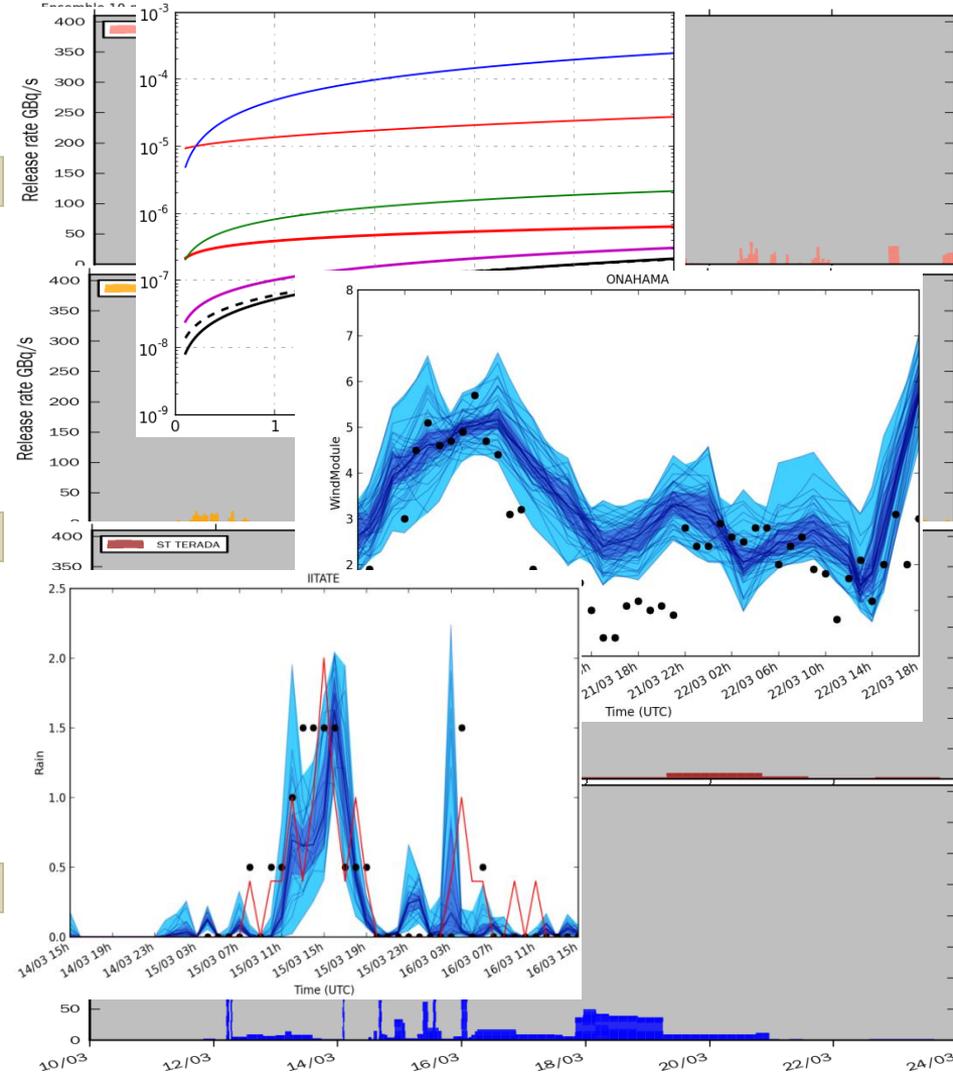
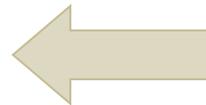
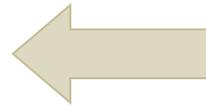
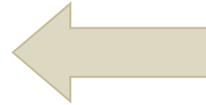
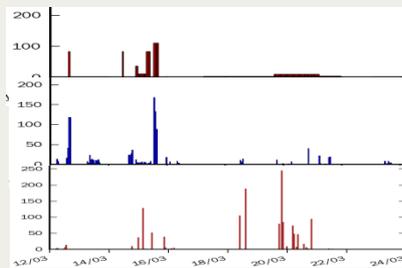
## Paramètres du modèle



## Entrée : données météo

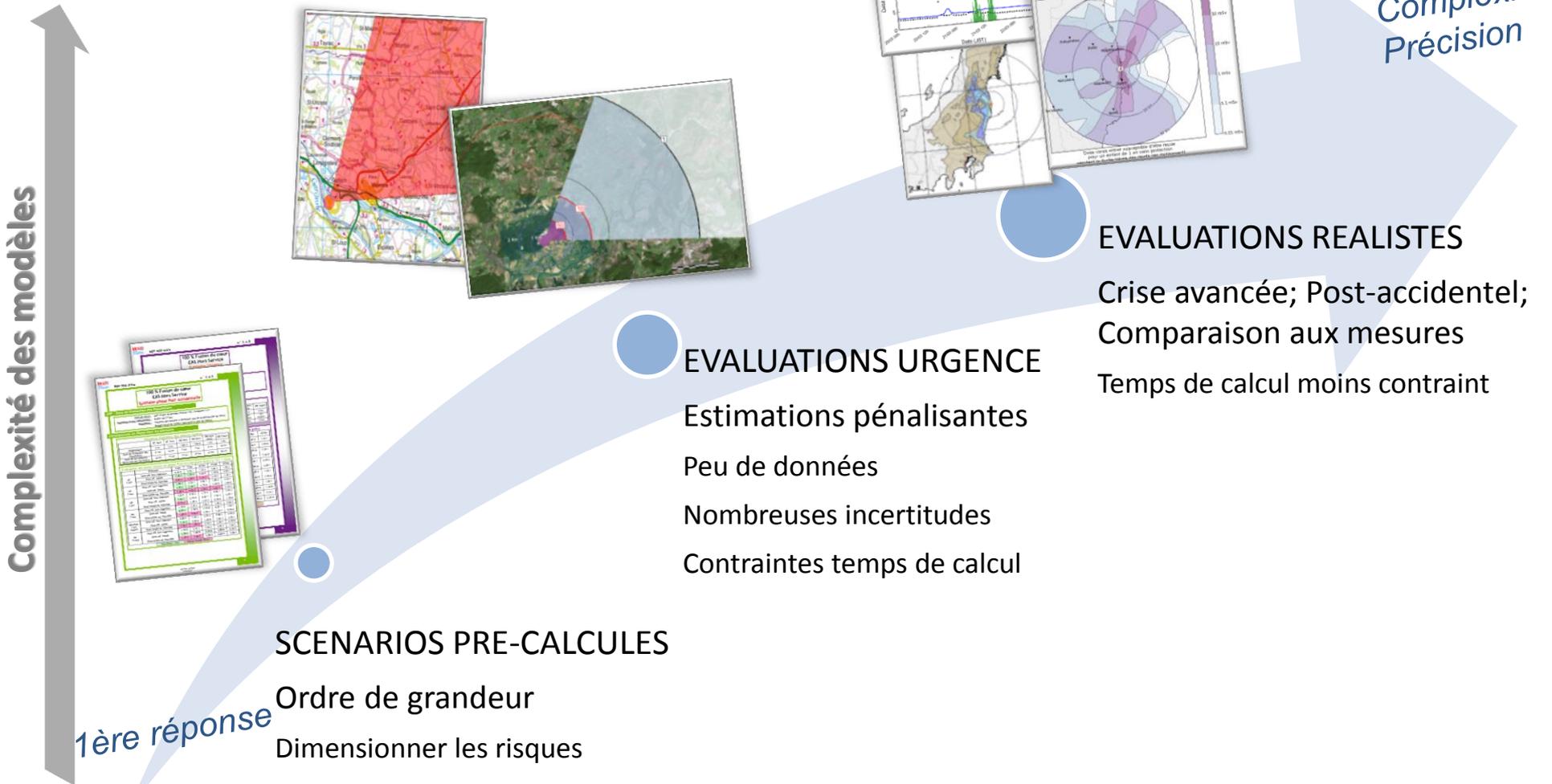


## Entrée : terme source

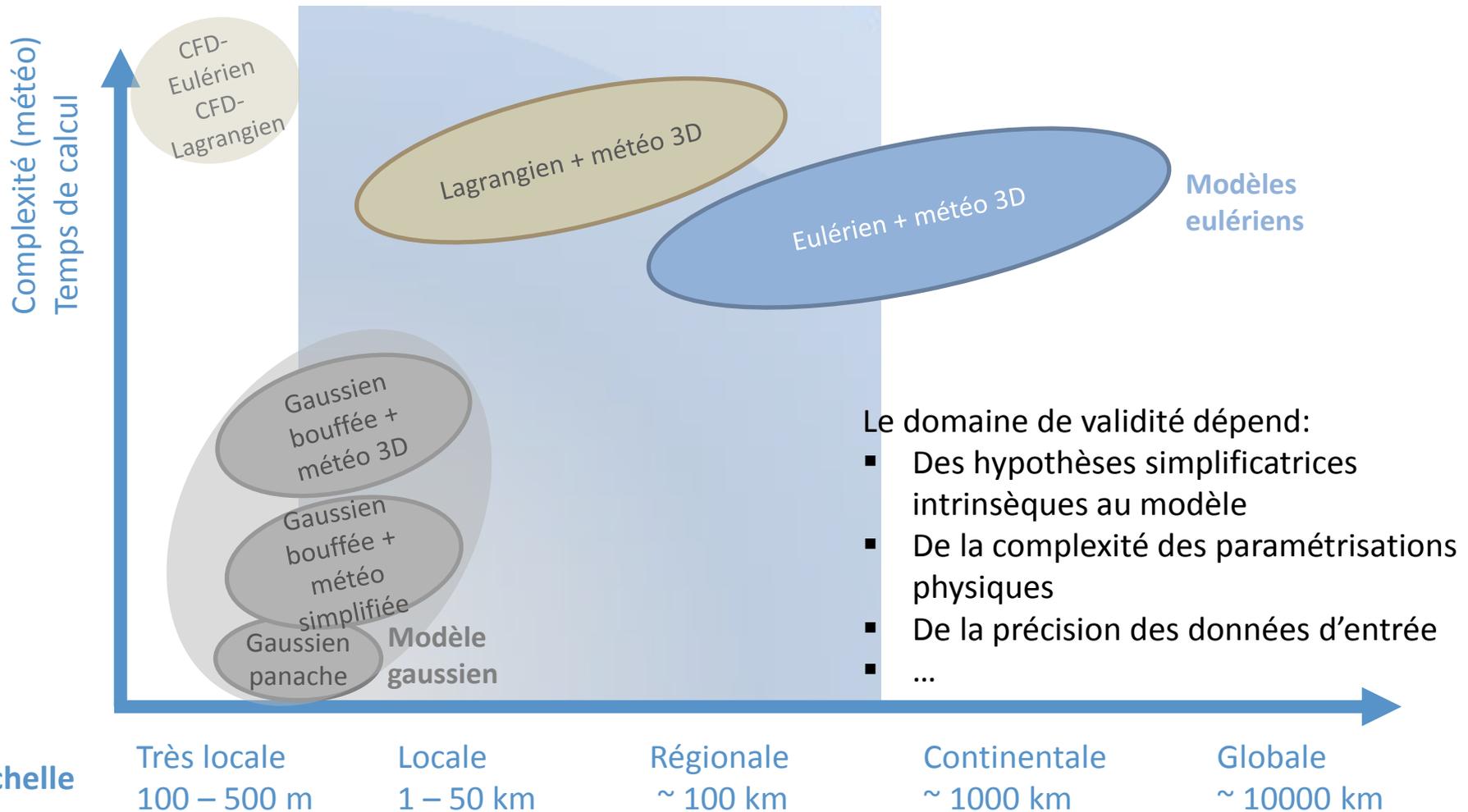


# Les spécificités du contexte d'utilisation

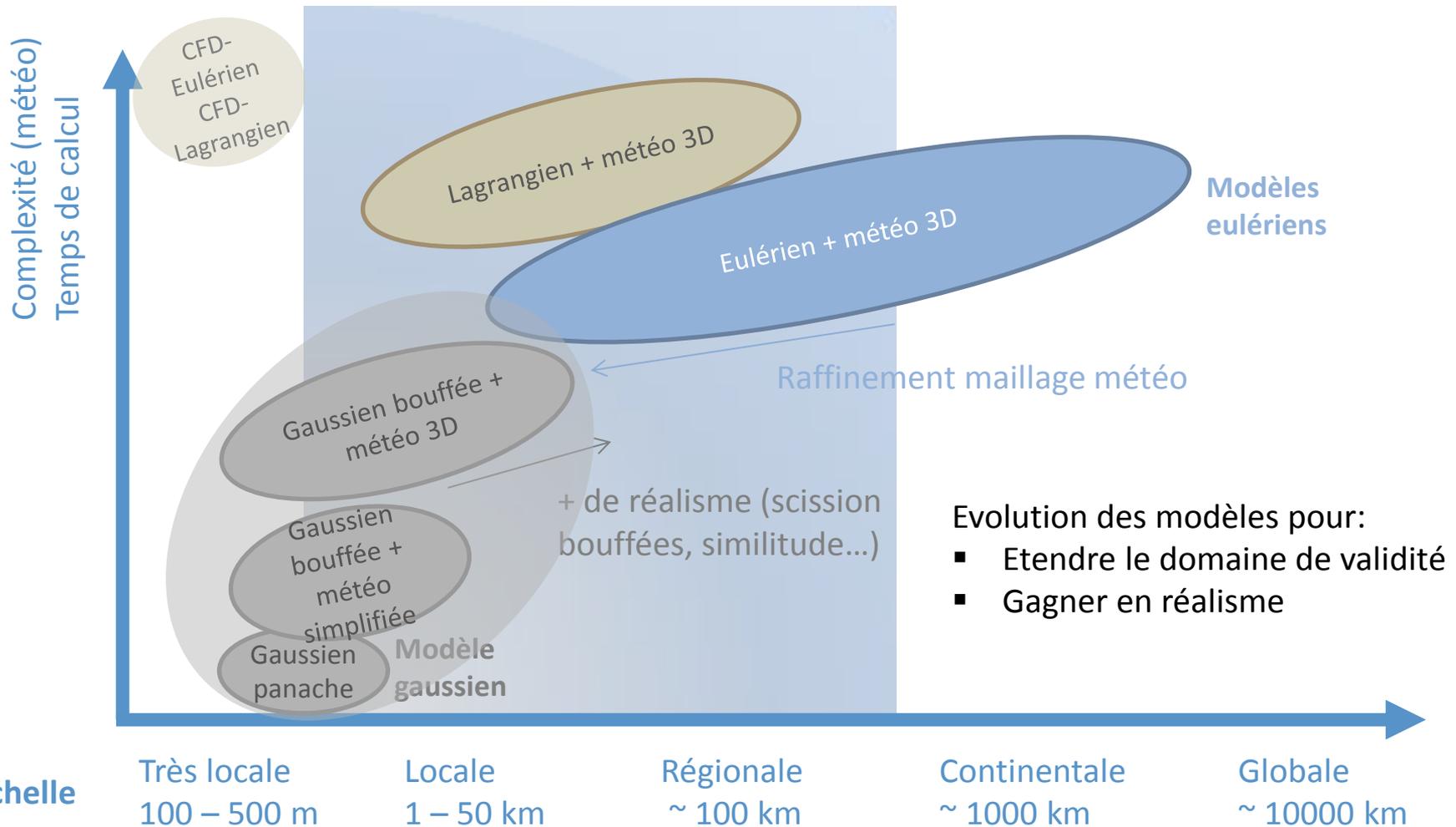
- Recherche de compromis
- Des choix pragmatiques



# Typologie des modèles

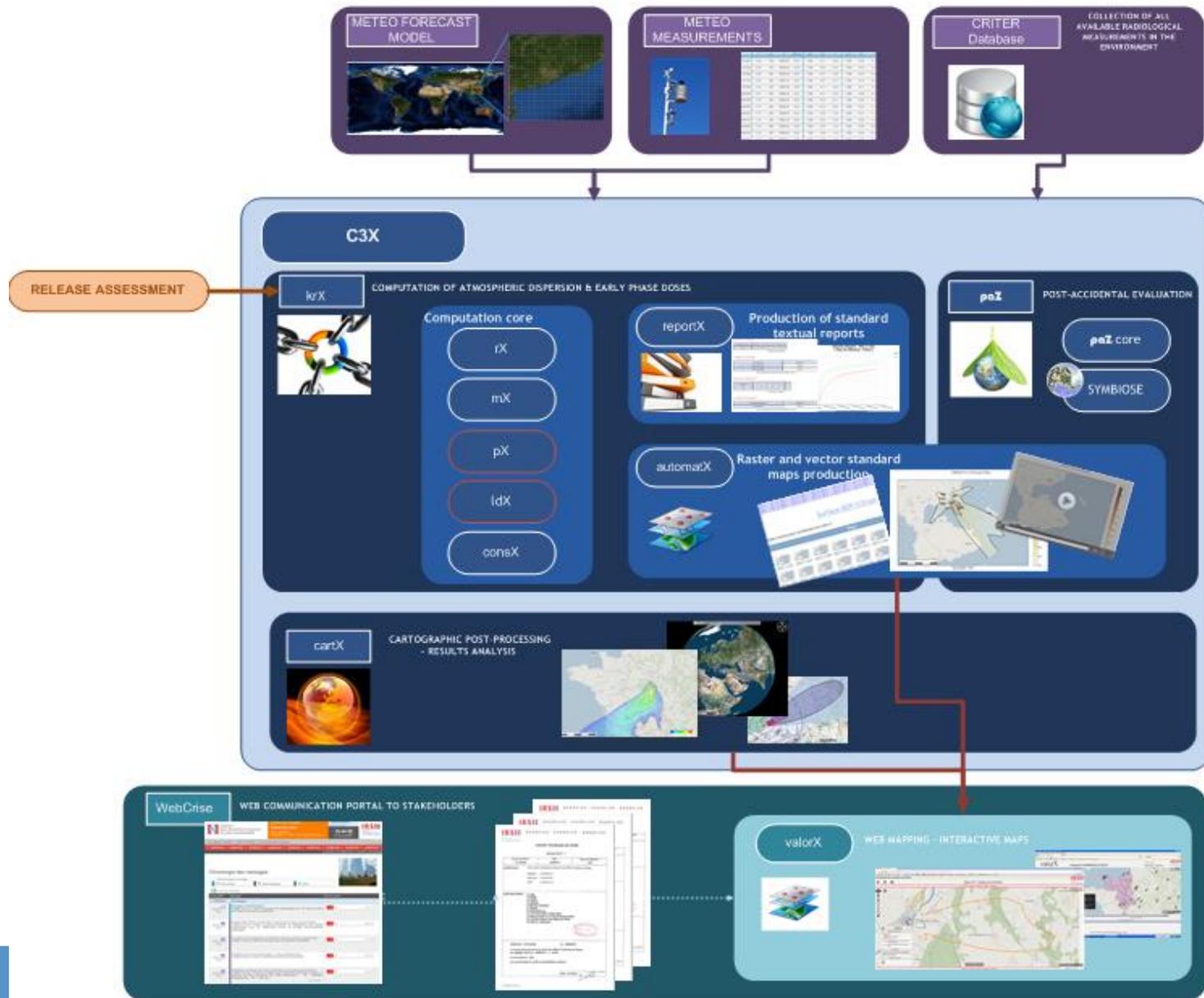


# Typologie des modèles



# A titre d'exemple, la plateforme opérationnelle de l'IRSN, C3X

Par décret, une des missions de l'IRSN est de proposer aux pouvoirs publics (notamment l'Autorité de Sûreté Nucléaire), en cas d'incident ou d'accident impliquant des sources de rayonnements ionisants, des mesures d'ordre technique, sanitaire et médical propres à assurer la protection de la population, des travailleurs et de l'environnement et à rétablir la sécurité des installations



# Les modèles de dispersion atmosphérique dans C3X

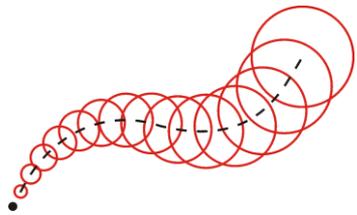
## Échelle locale



### **pX** : modèle à bouffées gaussiennes

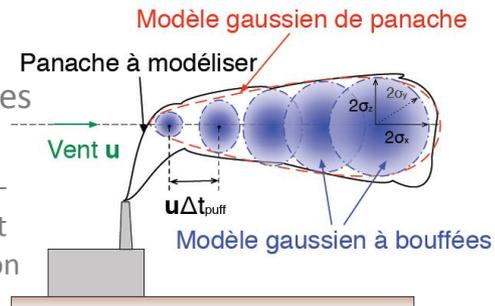
Co-développé par l'IRSN et le LMFA (Centrale Lyon)

Solution analytique de l'équation d'advection diffusion simplifiée. Temps de calcul court.



Chaque bouffée transporte une quantité  $Q$  de polluants  
Son advection et sa diffusion se font sous l'effet de la météo au centre de la bouffée.

Distribution gaussienne des concentrations dans les trois directions Lois d'écart-type : Doury, Briggs (urbain et terrain libre), Pasquill, diffusion constante, similitude



**Echelle spatiale** : conditionnée par la taille de la bouffée et l'hypothèse de météo homogène dans la bouffée

**Echelle temporelle** : conditionnée par les lois d'écart-type (~10 min) et par la résolution temporelle des données météo

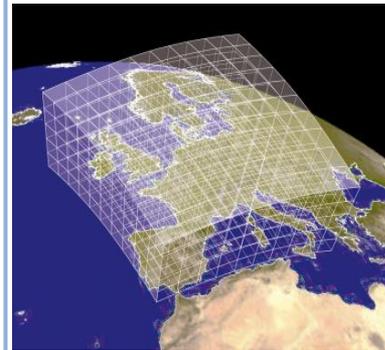
## Échelle régionale à continentale



### **IdX** : modèle eulérien

Adapté du modèle de recherche Polair3D (CEREA)

L'atmosphère est divisée en volumes finis. On étudie les flux de matière à travers chaque maille.

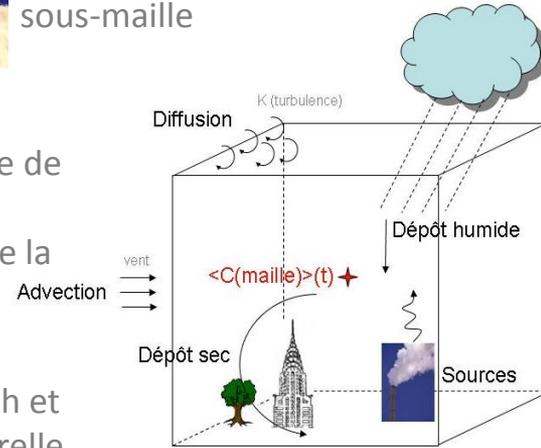


Dans une maille un résultat moyen, représentatif de l'échelle du calcul.

Paramétrisation des processus sous-maille

**Echelle spatiale** : échelle de la maille (3 à 50km) – précision dépendante de la résolution des données météorologiques

**Echelle temporelle** : ~1 h et par la résolution temporelle des données météo



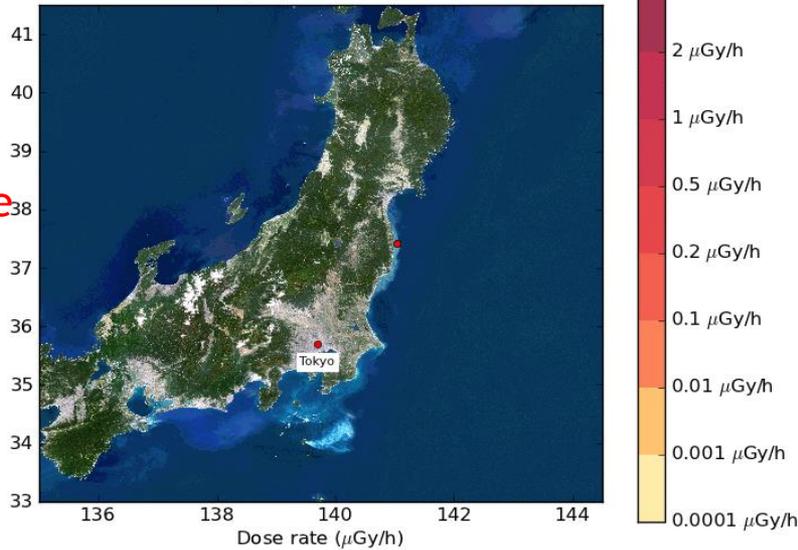
12-03-2011\_00h00



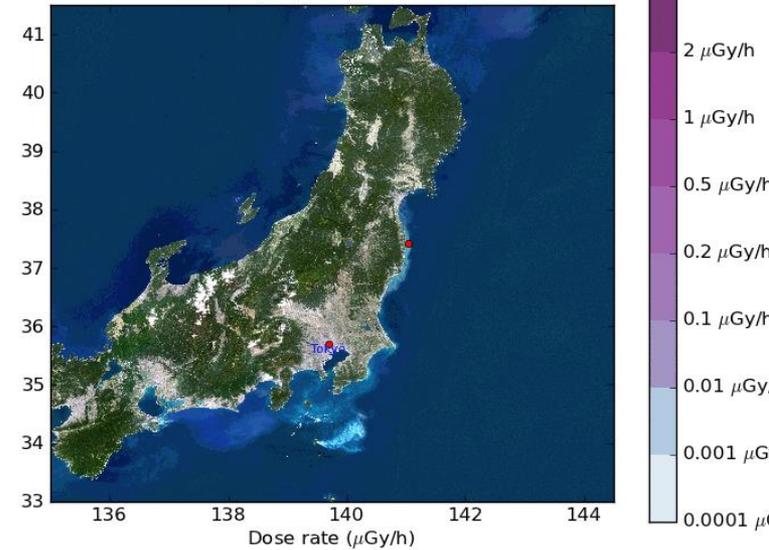
12-03-2011\_00h00



12/03/2011 07h00



12/03/2011 07h00

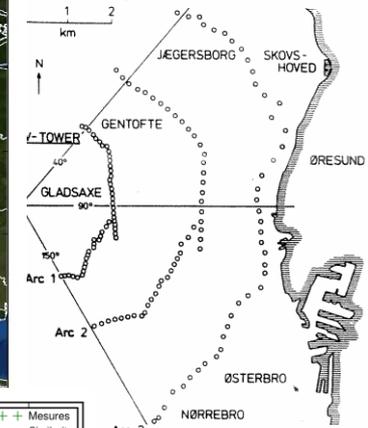
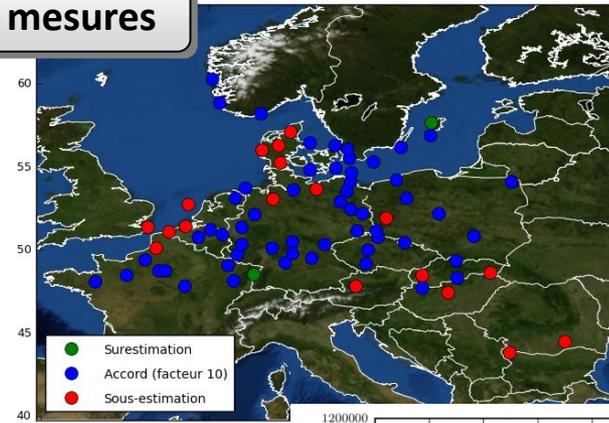


**px** : short range  
atmospheric  
dispersion

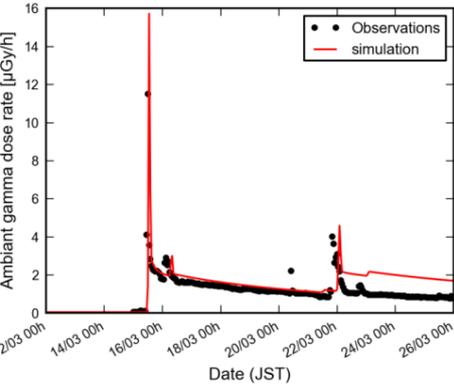
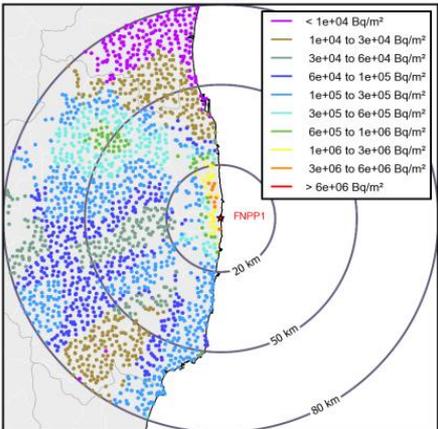
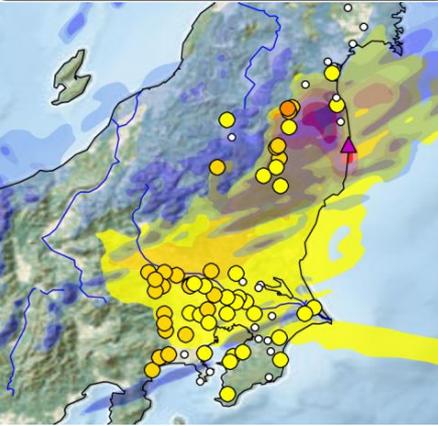
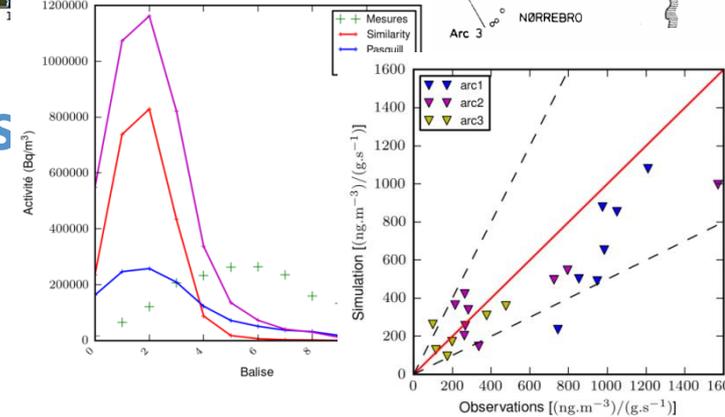
**ldx** : long range  
atmospheric  
dispersion

Campagnes de mesures

Agreement on dose

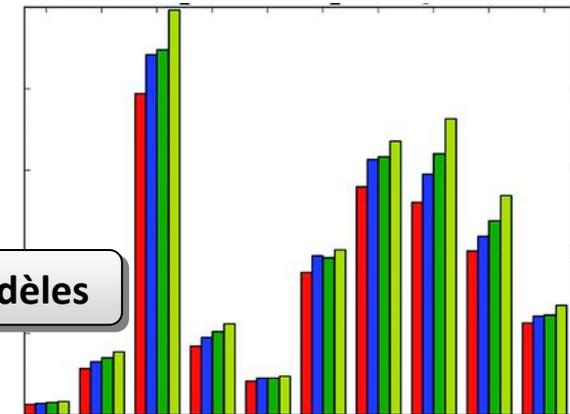


# Validation des modèles Méthode d'utilisation pour la crise



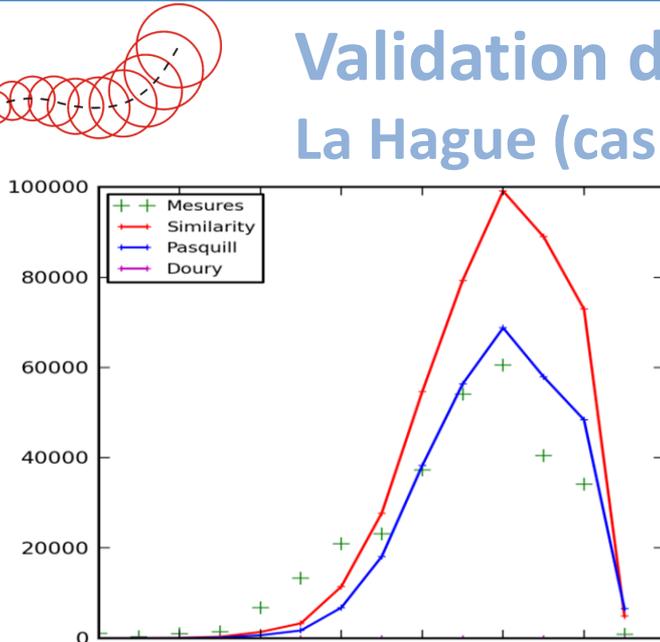
- Zone impactée - Temps d'arrivée
- Durée de passage
- Doses

Intercomparaisons entre modèles



# Validation de pX: exemples de résultats

## La Hague (cas stables, manip IRSN – AREVA-NC)



- 1 « radiale » = un ensemble de capteurs disposé sur 1 arc à une distance donnée dans la direction du vent
- Activités mesurées sur 20 minutes
- La Hague: source « réelle » à 100m, mais effet des bâtiments

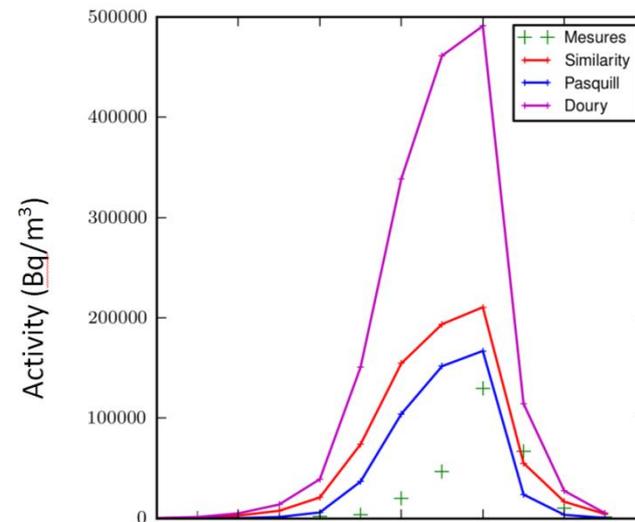
Activité mesurée (en  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ) et simulée avec une hauteur de rejet à 50m  
Cas du 22 septembre 2011. Distance à la source: 1,4 km. Stabilité E

### Objectifs:

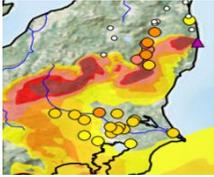
- ✓ Cas stables, source en hauteur
- ✓ Effet des bâtiments en champ proche

### Résultats:

- ✓ Doury moins bon que Pasquill/similitude
- ✓ Effet de rabattement au sol !
- ✓ Attention à la représentativité météo



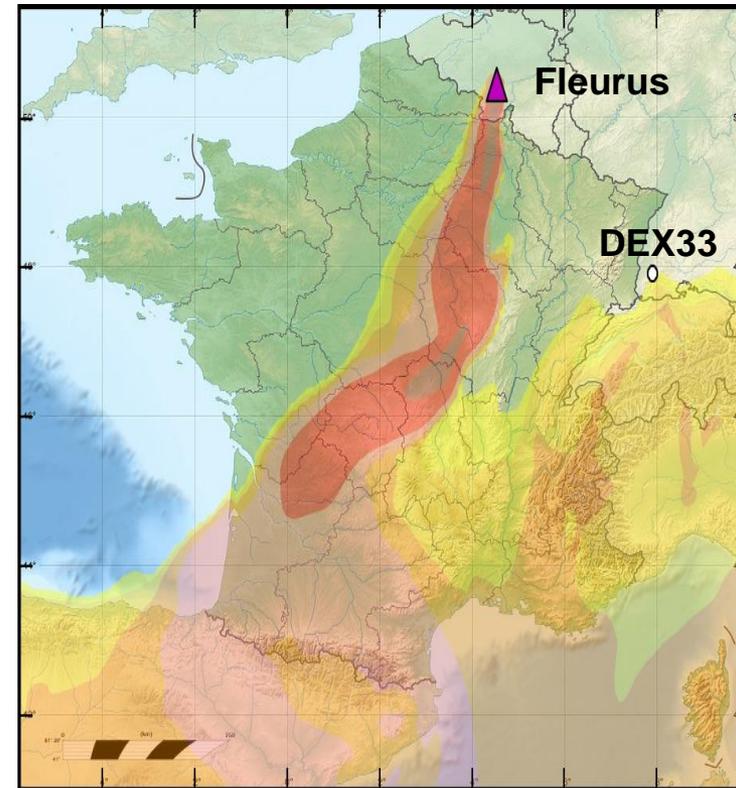
Activité mesurée (en  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ) et simulée avec un rejet au sol  
Cas du 20 février 2013. Distance à la source: 2 km. Stabilité D-E



## Validation de IdX : exemple d'intercomparaison, l'exercice CTBTO

- Capacité des modèles de dispersion à prédire les concentrations journalières en  $^{133}\text{Xe}$  sur une station CTBTO en Allemagne à partir d'un rejet émis depuis Fleurus sur un mois complet.
- Champs météo issus de 5 centres de prévi et 5 modèles de dispersion utilisés: 26 simulations testées

Modèle	KS	R	FB	F5	Rank	NMSE	MSE
Hof 4	0,39	0,94	0,03	0,61	3,09	0,63	18,3
Mau 3	0,45	0,93	-0,02	0,52	2,92	0,81	3,5
<b>Ldx + Arpège</b>	<b>0,52</b>	<b>0,92</b>	<b>-0,33</b>	<b>0,55</b>	<b>2,68</b>	<b>1,77</b>	<b>5,6</b>
Hif 3	0,45	0,90	-0,58	0,58	2,62	4,25	36,5
Hof1	0,45	0,75	-0,32	0,39	2,53	3,79	25,9
Hof 2	0,45	<b>0,97</b>	-0,89	0,68	2,43	5,87	25
Rob	<b>0,29</b>	0,35	-0,19	0,39	2,41	5,72	20,8
Ros 2	0,52	0,81	-0,56	0,35	2,24	4,87	11,9
Mau 1	0,58	0,79	-0,36	0,45	2,22	3,24	9,9
Ros 1	0,52	0,73	-0,56	0,58	2,18	5,42	13,3
Kry 1	0,42	0,47	-0,42	0,45	2,17	6,41	16,2
Sei 1	0,52	0,46	0,13	0,58	2,08	5,45	25
Gen	0,39	0,23	0,36	0,35	2,06	6,56	20,5
Est	0,45	0,30	-0,08	0,35	1,95	7,62	41,4
Sei 2	0,55	0,43	-0,07	0,35	1,95	6,14	37,5
Kry 2	0,52	0,61	-0,67	0,35	1,87	7,40	27,3
Kij	0,45	0,17	-0,13	0,35	1,87	9,80	40
Sei 3	0,58	0,20	-0,03	0,35	1,80	8,89	36,6
Sei 7	0,55	0,19	-0,10	0,35	1,79	9,27	35,7
Sei 8	0,55	0,19	-0,13	0,32	1,78	9,29	59,7
Sei 9	0,58	0,19	0,28	0,16	1,64	10,3	25,5
Hay	0,65	0,71	-1,41	0,06	1,31	26,9	25,3
Cha	0,71	0,83	-1,69	0,23	1,20	62,7	23,2
Mau 2	0,58	0,59	1,75	0,23	1,12	192	12400



- Situation moins complexe que Fukushima.
- Bon comportement de IdX par rapport aux autres modèles (classé 3<sup>ème</sup> sur l'exercice).

# Conclusions & Perspectives

## ■ Les Modèles utilisés en gestion de crise sont en constante évolution

Les moteurs de progrès :

- ✓ Puissance de calcul
- ✓ Réalisme des données d'entrée (prévisions météo)
- ✓ Connaissance des processus

## ■ L'utilisation des modèles en crise

Une affaire d'expert





# Les objectifs de la validation

## ■ Cycle de vie du modèle

Fait suite à la mise en place d'une nouvelle modélisation : test de ces performances sur des cas d'application

Performances évaluées avec des indicateurs statistiques classiques (souvent à vocation qualité de l'air)

## ■ Guide d'utilisation – Aider à l'utilisation opérationnelle des modèles en situation de crise

Tester la capacité des modèles à Être enveloppe / Être réaliste

Evaluation des performances vis-à-vis des situations critiques par rapport au domaine de validité des modèles...

Définir les configurations adaptées en fonction des objectifs d'utilisation

# Les différents type de validation

## Validation sur des campagnes de mesures de dispersion

- Nombreuses pour le champs proche (campagnes de terrains ou essais en soufflerie)  
Rares pour la longue distance
- Campagne en champ proche : rejets courts –
- Essais en

## Comparaisons modèles-mesures sur des accidents passés

## Intercomparaisons entre modèles

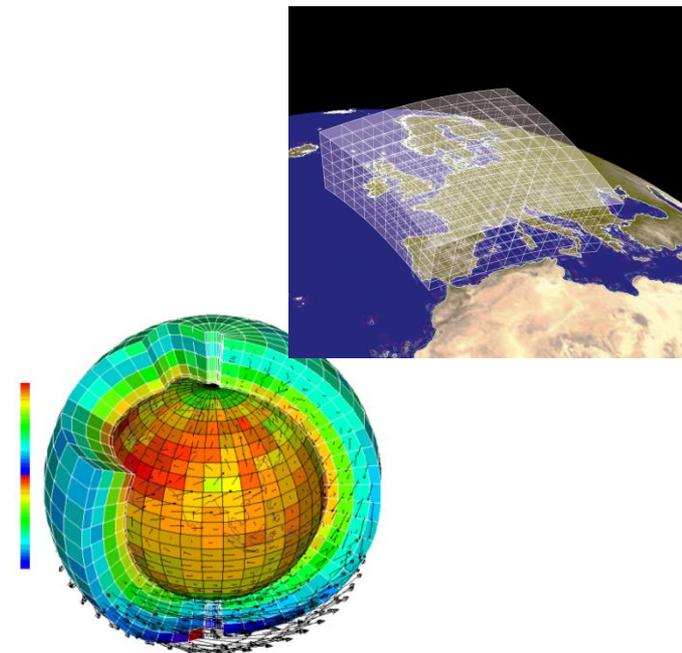
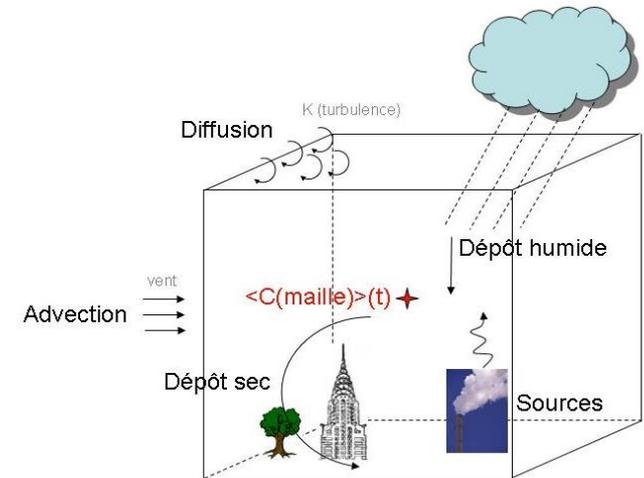
# La modélisation de la dispersion atmosphérique consiste à résoudre l'Équation d'advection-diffusion

$$\underbrace{\frac{\partial \bar{c}}{\partial t}}_{\text{terme instationnaire}} + \underbrace{\bar{u} \cdot \nabla \bar{c}}_{\text{terme d'advection}} = \underbrace{D_m \Delta \bar{c}}_{\text{terme de diffusion moléculaire}} - \underbrace{\nabla \overline{u'c'}}_{\text{terme de dispersion turbulente}} + \underbrace{\bar{S}}_{\text{terme d'apport}} - \underbrace{\bar{P}}_{\text{terme de perte}}$$

- **C** est la concentration dans l'air, **u** le vent moyen, **u'** et **c'** les fluctuations turbulentes
  - **S** est le terme source (émissions, formation par filiation radioactive ou réaction chimique),
  - **P** est le terme de pertes (dépôt sec et humide, décroissance, chimie, coagulation)...
- 
- Cette équation permet de décrire n'importe quel problème de dispersion turbulente
  - Pas de solution simple. Une solution approchée Il existe différentes familles de modèles

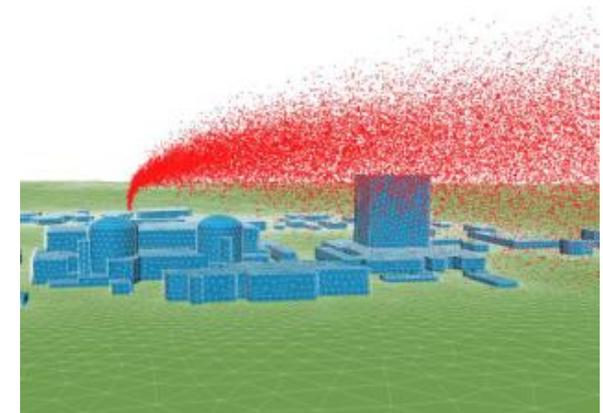
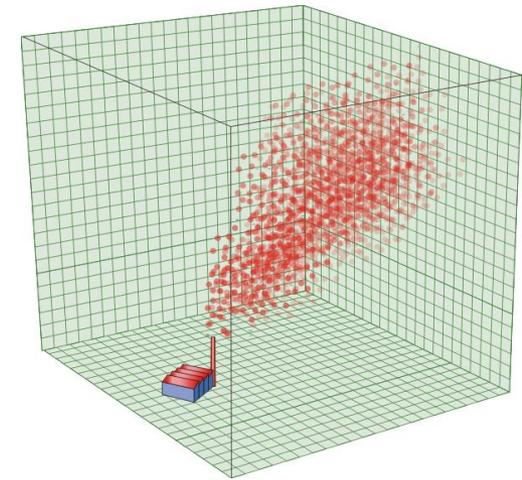
# Modèles eulériens

- Principe eulérien: *On se place du point de vue d'un observateur « fixe » qui voit passer l'écoulement*
- Toutes les grandeurs sont calculées sur un maillage (moyennes dans une maille).
- La précision (et le temps de calcul !) dépend de la résolution du maillage
- Les phénomènes d'une taille caractéristique inférieure à la maille ne sont pas résolus (paramétrés)
- Différents types de modèles eulériens: du champ très proche (CFD « online ») au modèle global
- En crise, les modèles eulériens « offline » sont souvent utilisés pour la dispersion à grande échelle : la météo est précalculée sur le maillage



# Modèles lagrangiens

- Principe lagrangien: *On se place dans le référentiel de l'écoulement (on « suit » le fluide, la particule...)*
- Modèle lagrangien stochastique (particulaire): les trajectoires sont le résultat
  - d'une partie déterministe (vent moyen)
  - et d'une partie aléatoire (turbulence)
- La précision (et le temps de calcul !) dépend du nombre de particules émises
- Plus on regarde « loin » de la source, plus le nombre de particules doit être grand



# Les spécificités du contexte d'utilisation : Situations accidentelles

## ■ Contraintes opérationnelles

- De temps de calcul
- Disponibilité des informations variables
- Incertitudes

## ■ Besoin de maîtrise

- Être enveloppe
- Être réaliste

## ➤ Choix du modèle et de la complexité des paramétrisations mises en jeu

### ➤ Recherche de compromis

- Rapidité / Précision (*Ordre de grandeur, estimation enveloppe versus calcul réaliste*)
- Incertitudes sur les données d'entrée / Modélisation complexe des processus (*Inutile d'avoir un modèle de dépôt sophistiqué sans données sur la taille/caractéristique des aérosols, etc...*)
- Tous les phénomènes n'ont pas toujours la même importance selon l'échelle spatiale et temporelle d'intérêt

### ➤ Des choix pragmatiques

- Réalité des mesures / Physique des processus (*Observations radar pluie à la place des précipitations prévues*)