

---

# Sujets CEA Cadarache



Développement de méthodologies de traitement des incertitudes pour les codes de simulation stochastiques

Analyses de sensibilité de codes de transfert de contamination

Bertrand IOOSS

CEA, Direction de l'Énergie Nucléaire  
Centre de Cadarache, Département d'Étude des Réacteurs

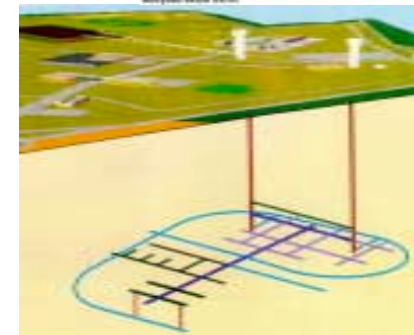
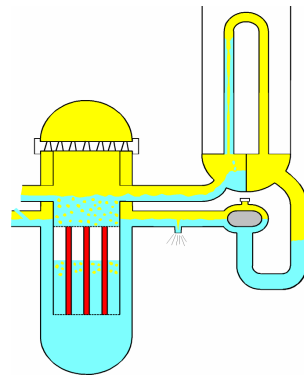
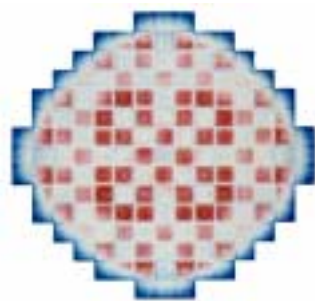
Journée MASCOT-NUM / IMdR

Présentation de sujets de thèse

# Contexte de la simulation numérique en ingénierie nucléaire

Quelques objectifs :

- Simulation du fonctionnement du cœur d'un réacteur
- Simulation d'accidents hypothétiques
- Simulation de l'impact environnemental (réacteur, usine, entreposage, stockage de déchets)



Difficultés :

- Modélisation de **phénomènes complexes et couplés**
- Investigation de modèles dans une **large gamme de variation** de leurs entrées
- Besoin d'estimer certains **paramètres inaccessibles** du modèle
- Evaluation **d'événements rares**

# Les enjeux de la prise en compte des incertitudes

## Maîtriser le caractère incertain des résultats de calculs



### • **Modélisation :**

- explorer différentes combinaisons pour les valeurs des paramètres d'un modèle → zones inexplorées, détecter des anomalies du modèle
- identifier les paramètres prépondérants et leurs interactions

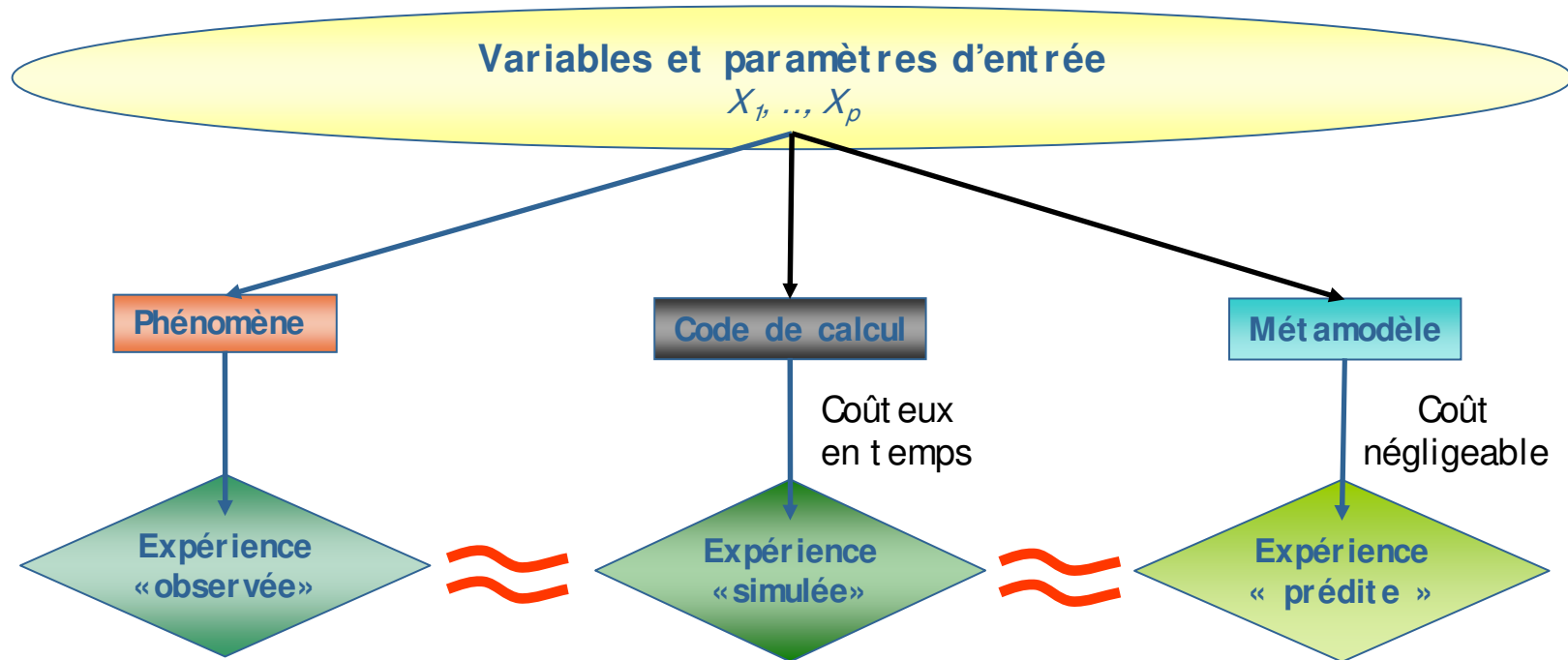
### • **Validation :**

- réduire l'incertitude d'une prédiction
- identifier les principales sources d'incertitudes, pour **prioriser la R&D**
- calibrer les paramètres d'un modèle en recalant prédictions et observations

• **Sûreté** : éléments de justification de **maîtrise d'un risque**, choix des marges adaptées, ...

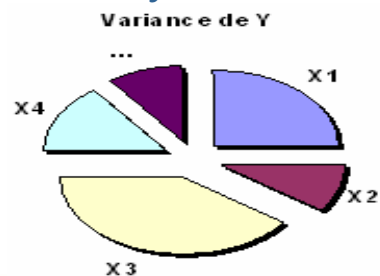
• **Conception** sous incertitudes, **optimisation des performances** d'un système

# Code coûteux : construction de métamodèles

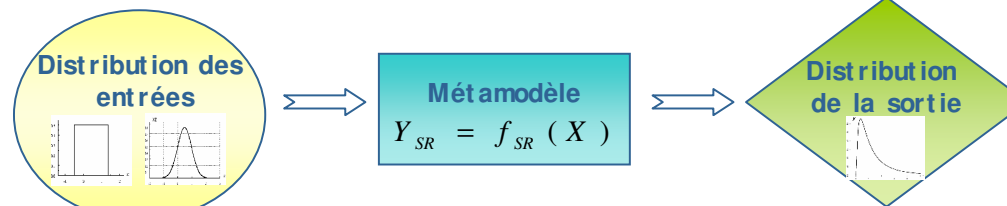


## Exploitation du métamodèle :

### ■ Analyse de sensibilité



### ■ Propagation d'incertitudes



### • Calibration

Détermination des paramètres  
 ↓  
 Adéquation expériences simulées et observées

# Sujet 1 (stats) : Incertitudes de codes stochastiques

---

*Responsable CEA : Bertrand Looss, Cadarache, Dpt d'Étude des Réacteurs*

*Directeur de thèse : Fabrice Gamboa, Institut de Maths Toulouse*



## • Plan d'expériences et métamodèles pour **code de calcul stochastique**

---

- Code déterministe :  $Y = g(\mathbf{X})$ . Nombreux résultats et méthodes disponibles
- Code stochastique :  $Y = g(\mathbf{X}) + v(\varepsilon, \mathbf{X}; \varepsilon)$ 

Par exemple : codes basés sur Monte Carlo (simulation de trajectoires de neutrons, dispersion lagrangienne de particules dans un fluide), modèles de files d'attente, codes intégrant des instabilités numériques, ...
- La réponse  $Y$  est intrinsèquement aléatoire : à chaque  $\mathbf{X}$  correspond une densité de probas  $f_{Y|\mathbf{X}}$ .

On ne s'intéresse plus à la valeur d'une sortie, mais à sa moyenne, variance, ..., distribution de probabilités.

# Axes de recherche

---

## Travail de modélisation statistique

- **Planification des expériences numériques** : comment s'adapter à la spécificité du problème ?
  - Le problème est similaire à celui posé par Taguchi (facteurs contrôlés / facteurs de bruit) dans le domaine des plans d'expériences classiques
    - Développement de stratégie de planification robuste d'expériences
- **Construction d'un métamodèle** : comment reconstruire la distribution de probabilité conditionnelle
  - Utiliser des mélanges de lois paramétriques, et modéliser les paramètres de ces lois
  - Étude des propriétés théoriques des estimateurs
- **Méthodologie d'analyse de sensibilité** : quelle mesure utiliser dans ce cas ?
  - Définition de nouveaux indices
  - Développement d'une stratégie de planification des calculs

# Applications envisagées

---



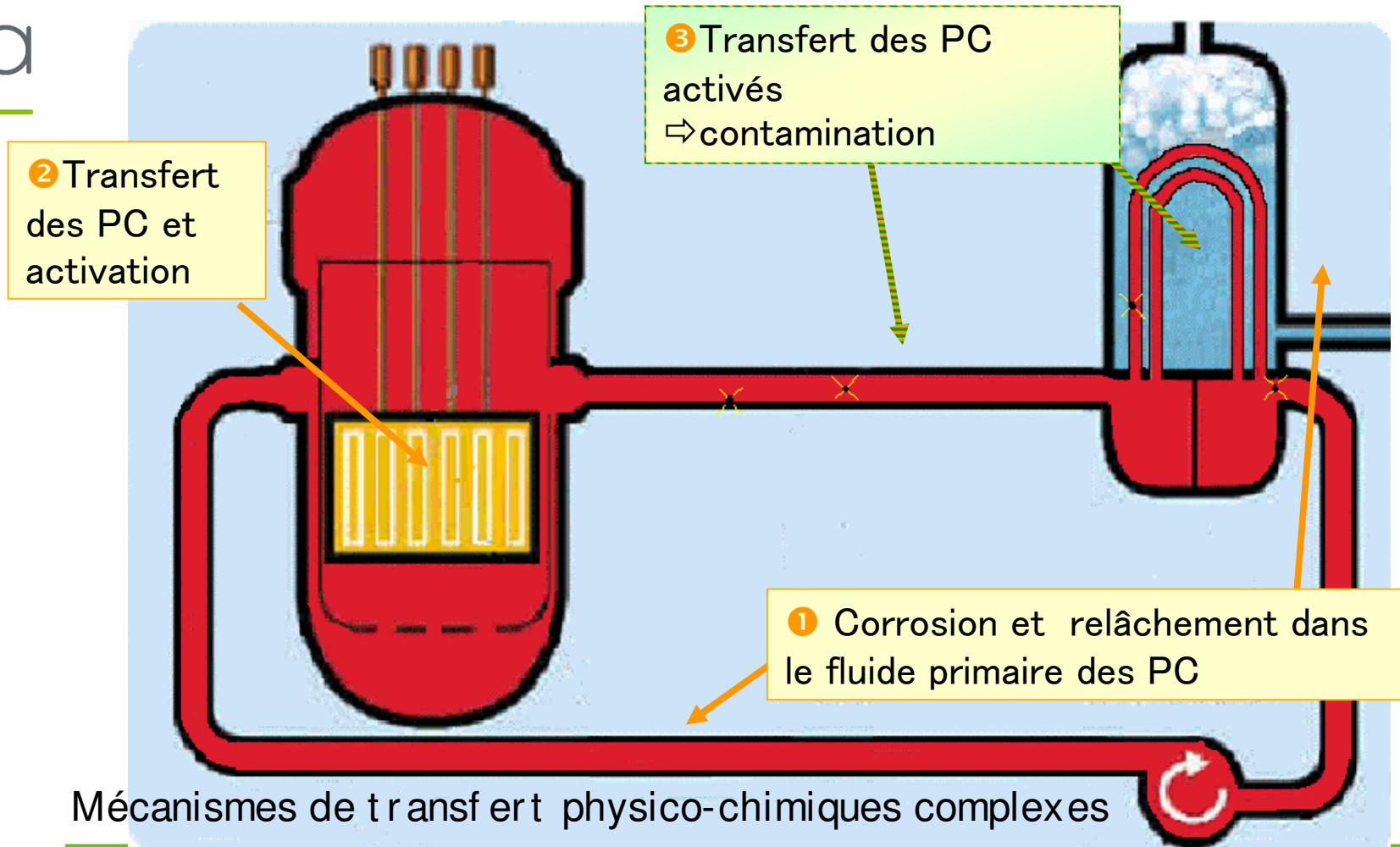
- Modèles analytiques simples (par ex. sur des EDP stochastiques, trajectoires de particules en mécanique des fluides)
- Avec CEA Cadarache/ DER/ SPRC : analyse de sensibilité de codes de calcul Monte Carlo pour le calcul de cœur de réacteur (simulations très coûteuses)
- Avec IRSN/ Fontenay aux Roses/ DSU/ SEC : calculs d'évolution radioactive du combustible par Monte Carlo

*Profil du candidat : statistiques, calcul scientifique, ouvert à la modélisation physique*

# Sujet 2 (phys. + stats) : Méthodologie d'analyse de sensibilité

## Code de transfert de contamination par les produits de corrosion

Responsable : Frédéric Nguyen, CEA Cadarache, Dpt Technologie Nucléaire



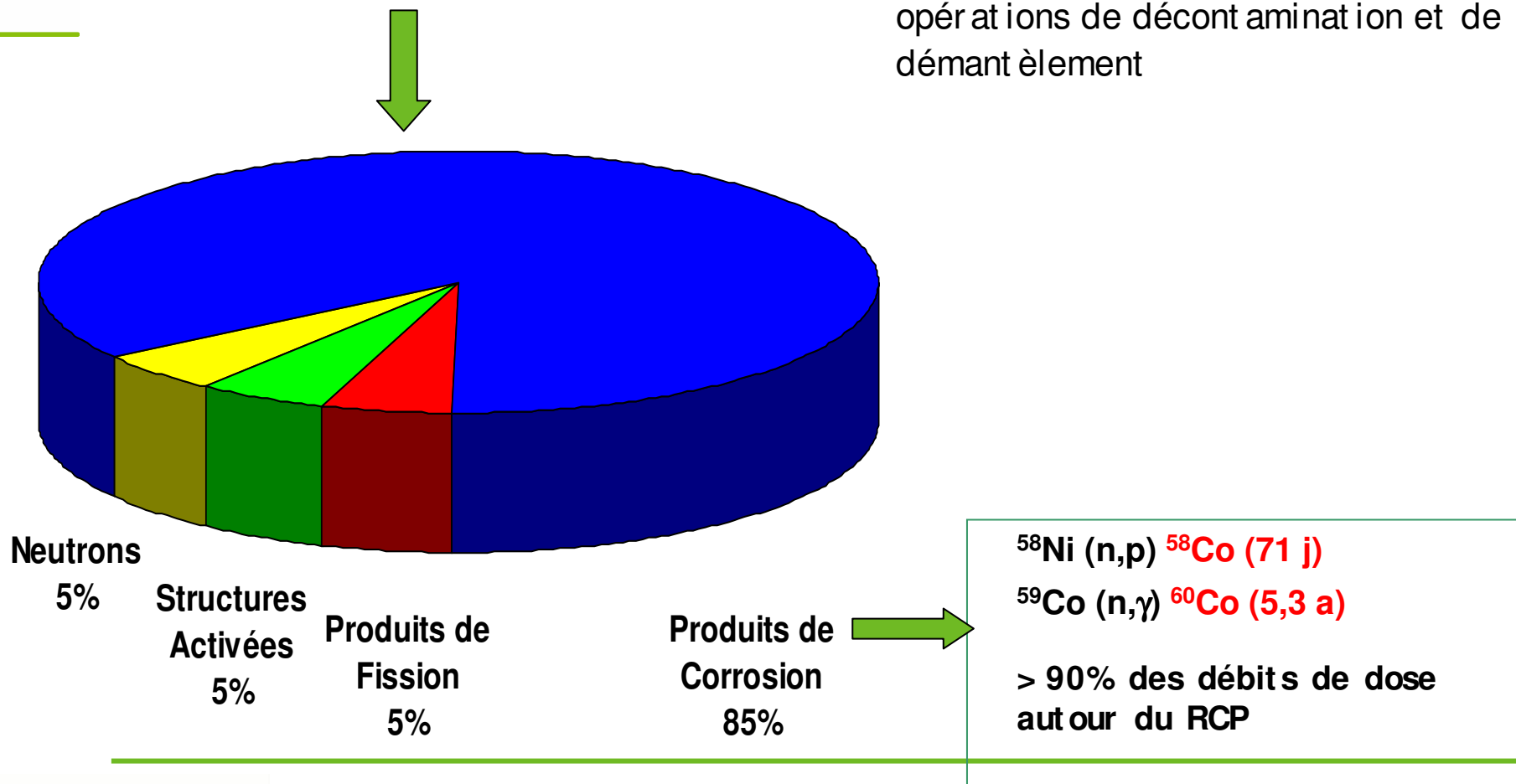


# Problématique du transfert de contamination

✓ Réduction des doses au cours des opérations de maintenance (ALARA)

✓ Minimisation des déchets et des effluents

✓ Maîtrise du terme source pour les opérations de décontamination et de démantèlement



# Le code PACTOLE

---



- Simulation de la contamination dans un circuit primaire de réacteur nucléaire => défi
  - **Modélisation multi-physique** (neutronique, TH, érosion, déposition, corrosion, spéciation, dissolution, précipitation, etc.)
  - **Conditions inhabituelles et sévères** (300° C, 150 bar, flux de neutrons, vitesses d'écoulement jusqu'à 5- 15 m. s<sup>-1</sup>).
- Objectif: calculer les activités surfaciques et volumiques en chaque point du circuit primaire
- Le code **PACTOLE**  
Prédiction du comportement et de l'**ACT**ivation des produits de corrosion dans le circuit primaire des réacteurs à eau (**O**) **LE**gère

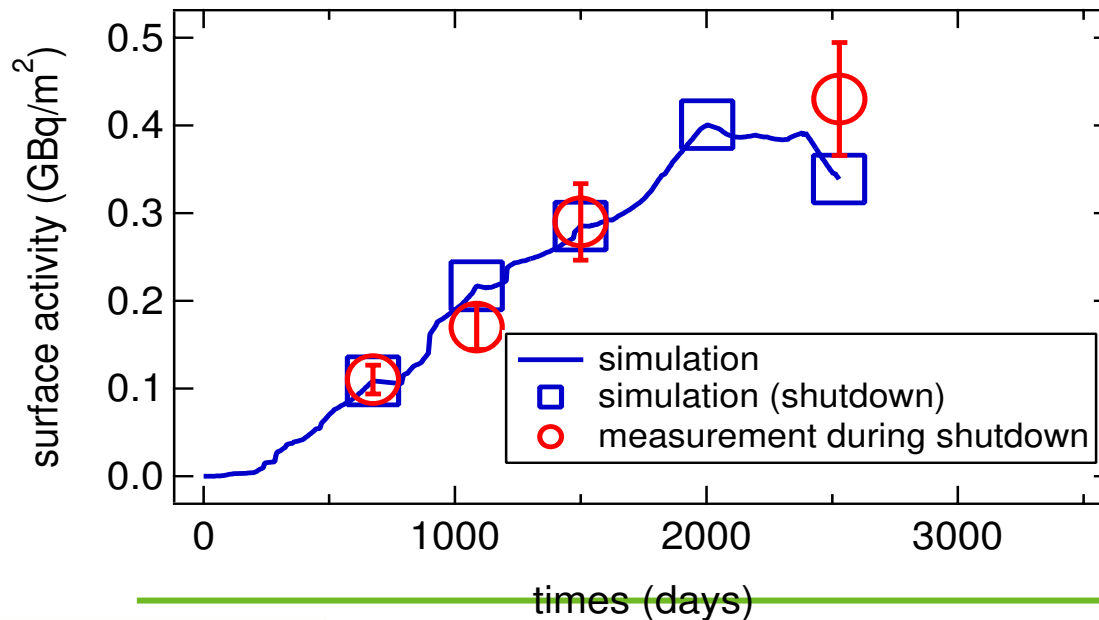
# Axes de recherche

Objectif final : démarche pour la validation du code



## Moyens :

- Implémenter une méthode d'analyse de sensibilité performante (approche adjointe) afin d'identifier les modèles et paramètres influents
- Développer une méthodologie de calibration multicritères pour identifier les paramètres inconnus
- Définition d'un programme expérimental à partir de ces résultats



activité déposée en GBq/m<sup>2</sup>  
sur un générateur de vapeur  
d'un REP 1300MWe