

Evaluation des incertitudes dans les simulations pour la physique des réacteurs

Journées NEEDS
21 octobre 2014

Xavier Doligez pour le projet M2C2 et Mathieu Couplet pour le projet ASINCRONE
doligez@ipno.in2p3.fr ; mathieu.couplet@edf.fr



➤ ASINCRONE

Mathieu Couplet
(réfèrent technique)
Cécile-Aline Gosmain
(pilote)
Damien Schmitt
Bertrand Iooss
Loïc Le Gratiet

Yann Richet
Joachim Miss

Thierry Klein
Agnès Lagroux

➤ M2C2

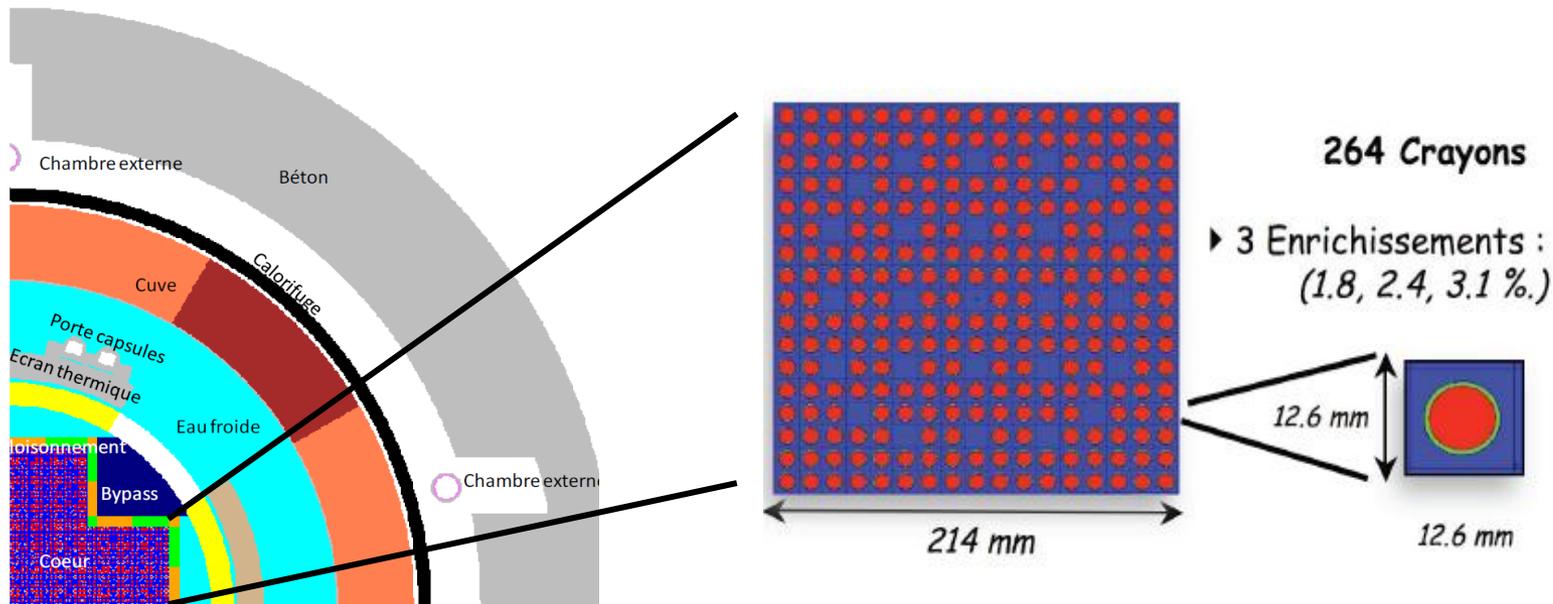
Eric Dumonteil
Emeric Brun
Fausto Malvagi

Alexis Jinaphanh
Bertrand Cochet
Jean-Baptiste Clavel
Anthony Onillon

Xavier Doligez
Marc Ernoult
Olivier Méplan
Alexis Nuttin
Nicolas Capellan
Adrien Bidaud
Guy Marleau
Nicolas Thiolliere
Muriel Fallot
Baptiste Mouginot

➤ Les observables sont multiples :

- Flux et taux de réactions dans les chaînes d'instrumentation
- Inventaires fin de cycle
- Evolution de température



➤ La simulation du réacteur complet est inenvisageable

Utilisation de (méta-)modèles et de schémas pour estimer les observables en fonctionnement

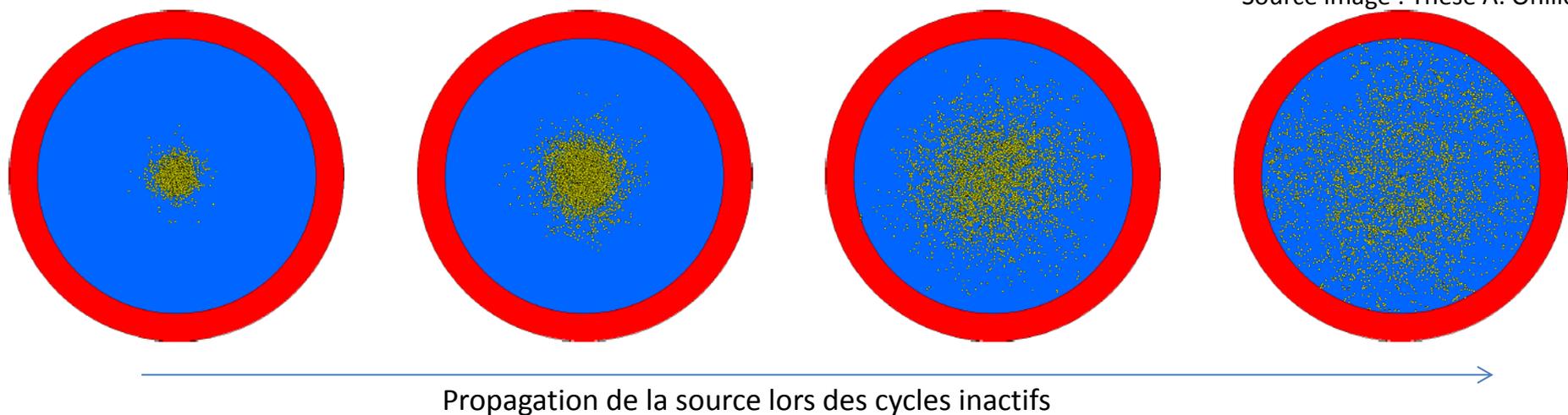
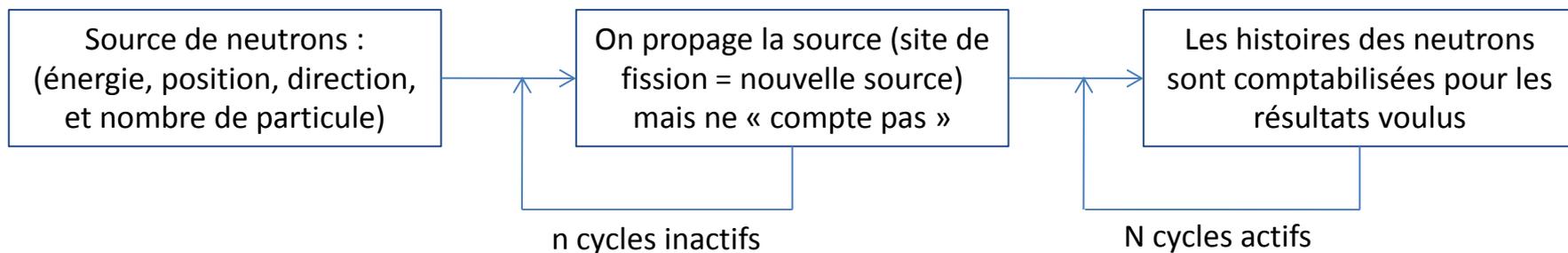
Sources d'incertitudes :

- Températures
- Densités
- Données nucléaires
- Géométrie

} L'utilisation du Monte-Carlo rajoute une variance statistique

Solveur de flux Monte-Carlo

On calcule l'histoire d'un grand nombre de particules
→ calcul en KCODE (l'histoire s'arrête à la fission)

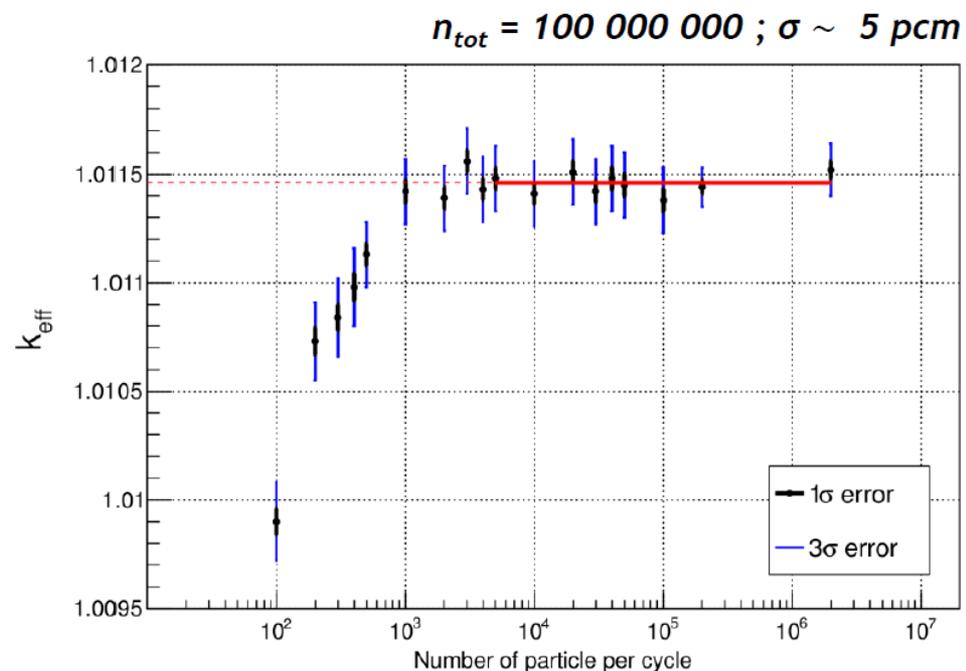


Conséquences :

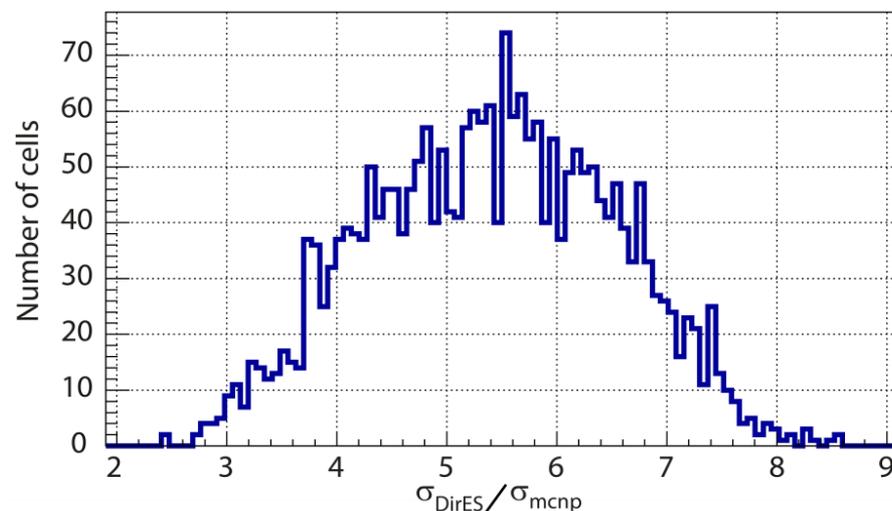
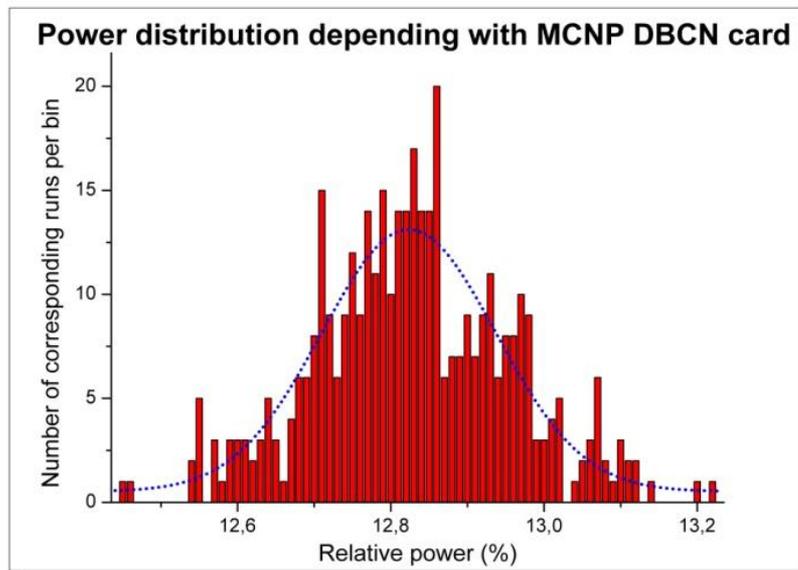
- Chaque observable est associée à une erreur statistique qui dépend du nombre d'histoires simulées (et donc de la puissance de calcul)
- Il faut s'assurer que la source a convergé « correctement » avant d'estimer les observables

Les cycles sont corrélés entre eux :

- Les histoires ne sont pas indépendantes
- La définition du calcul MC peut impacter les résultats
 - Ex sur le k_{eff} d'un assemblage « infini »

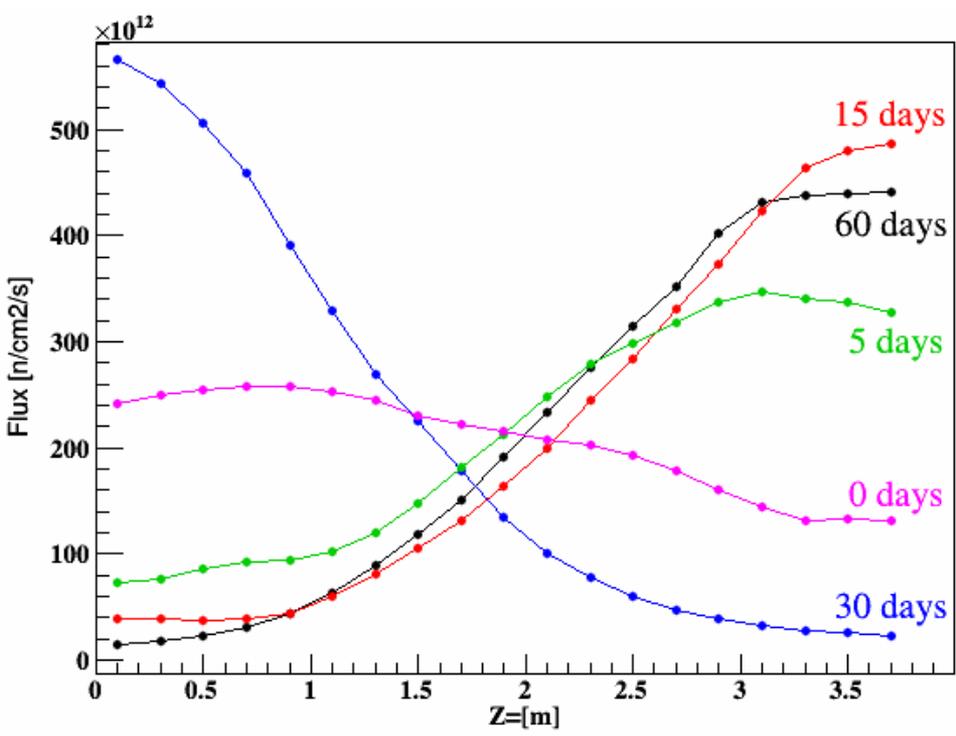
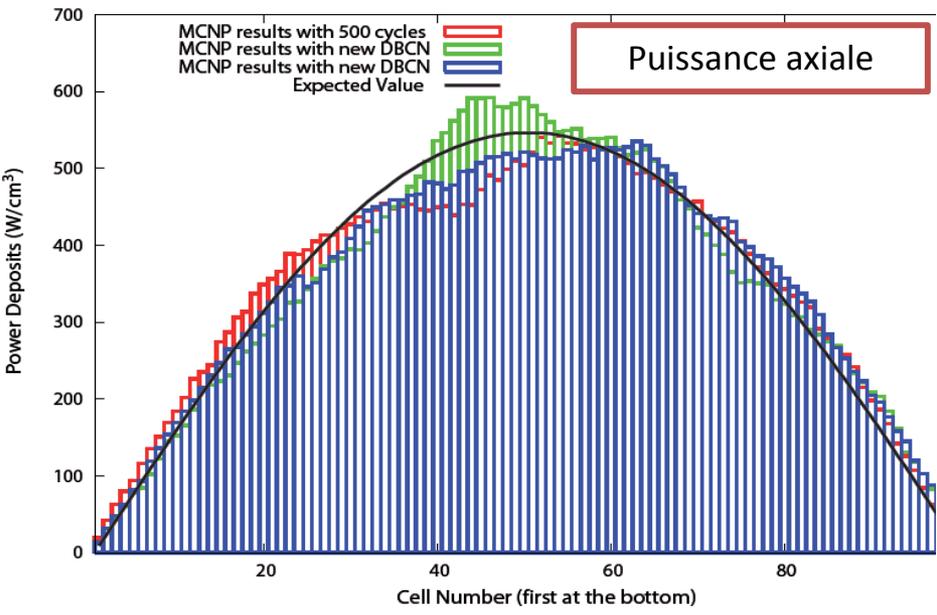


La discrétisation spatiale peut aussi impacter l'estimation des variances

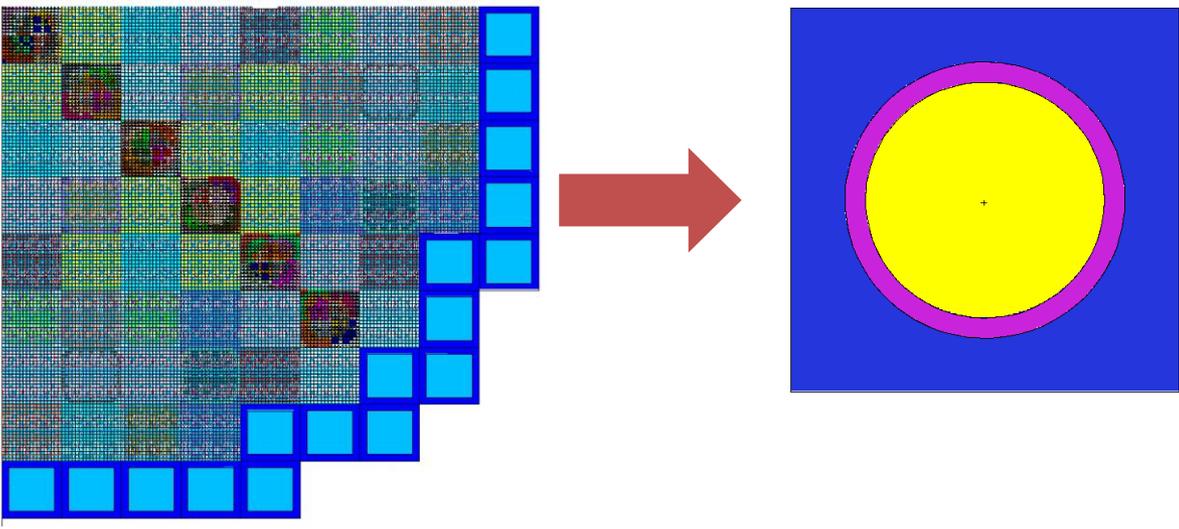


$\sigma_{\text{DirES}} / \sigma_{\text{MCNP}}$ pour une géométrie REP (2410 cellules)

La résolution stochastique de l'équation du transport et couplage avec l'évolution



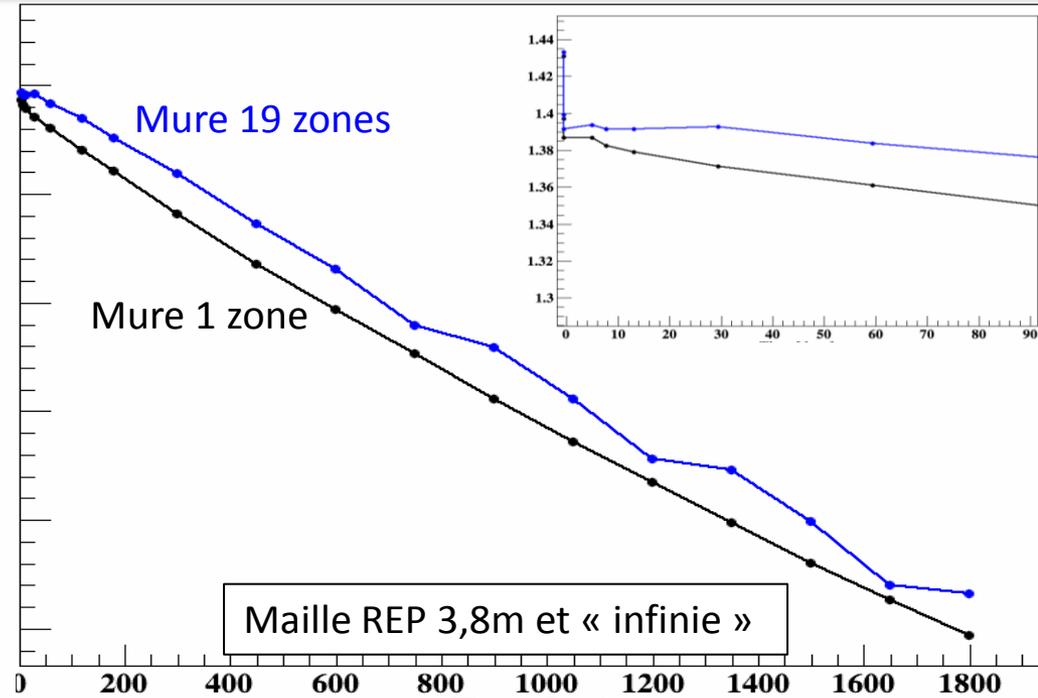
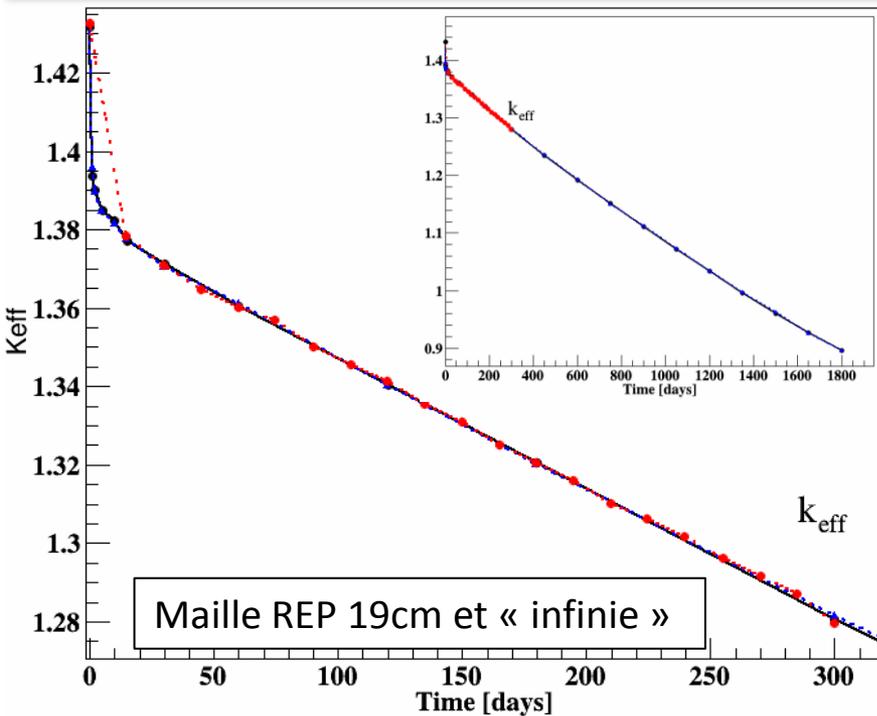
➤ Simplification à l'extrême de la géométrie



Crayon infini en Z
 Crayon « REP » (3,80 m)

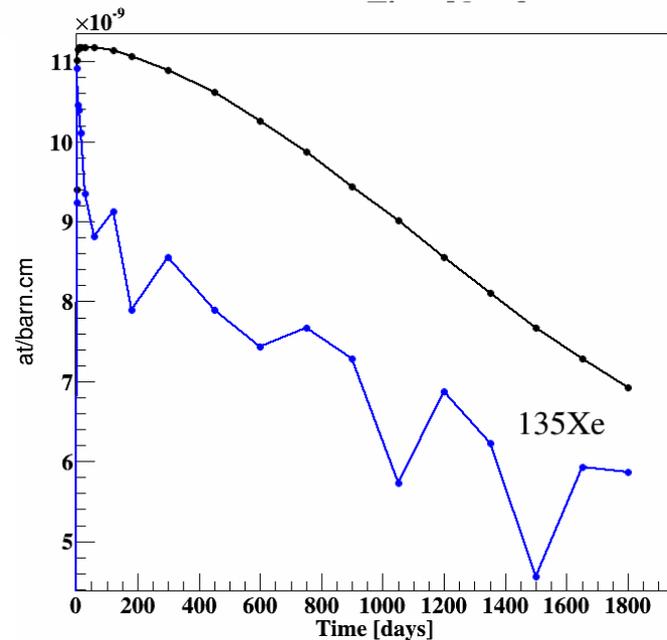
→ 3 découpages axiaux
 → 2 temps d'évolution

L'influence de la discrétisation



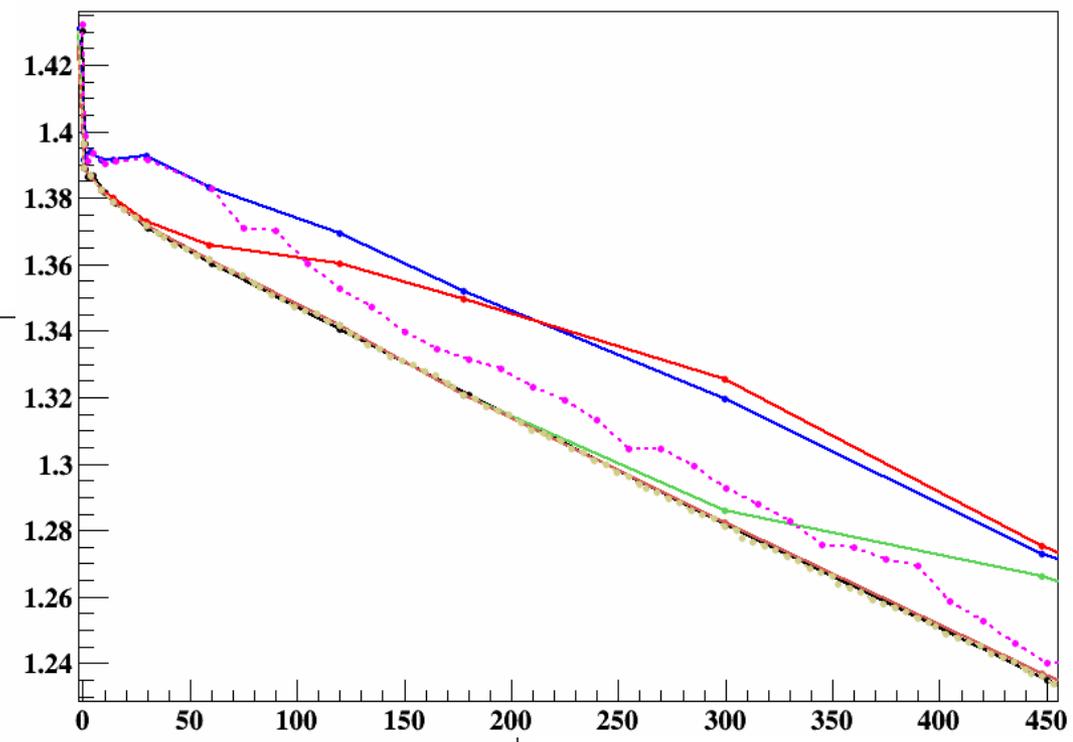
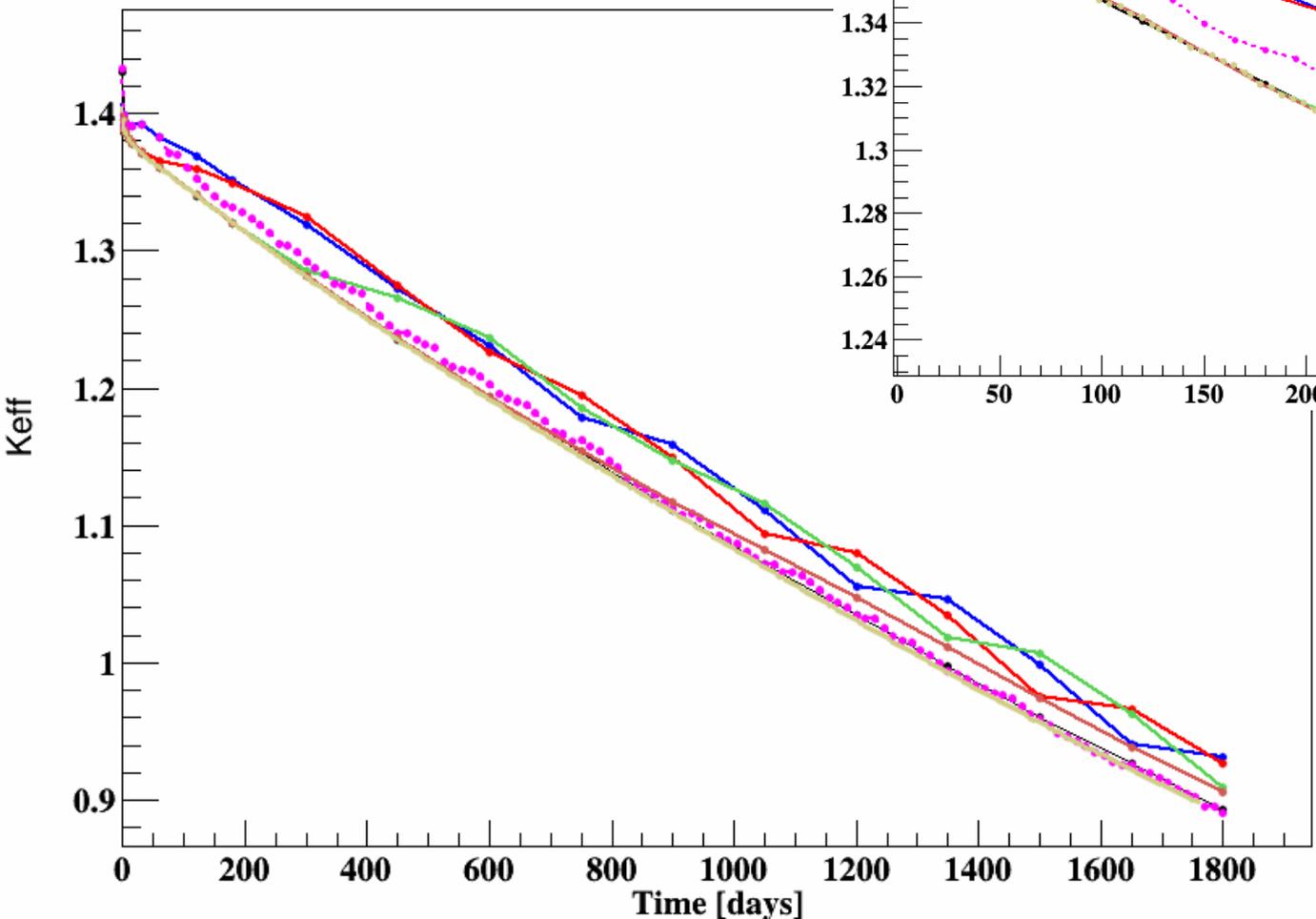
La cause de la différence :
→ l'effet Xénon (entres autres)

Les incertitudes statistiques du MC introduisent des oscillations Xe qui n'ont aucun sens physique



Les pistes d'amélioration : on force la physique (et on augmente la statistique)

- 1 zone
- 19 zones, 2×10^3 n/cycle
- 19 zones, 100×10^3 n/cycle
- 19 zones, 1000×10^3 n/cycle
- 19 zones, 2×10^3 n/cycle, $\Delta t = 15j$
- 19 zones, 100×10^3 n/cycle, symétrie
- 19 zones, 50×10^3 n/cycle, symétrie, $\Delta t = 5j$



- **Sur l'évolution du k_{eff}**
 - Répercussion sur l'estimation du Burn-up fin de cycle
 - Répercussion sur les inventaires fin de cycle
- **Sur les puissances locales**
 - Répercussion sur les études de couplages thermo-hydrauliques (études accidentelles)
 - Besoin de chercher un niveau de discrétisation acceptable
- **Sur l'évolution des matières en cœur**
 - Répercussion sur les flux de neutrons, les flux de chaleurs

Ces incertitudes sont à comparer avec les autres sources d'incertitudes...

- Modélisations
- Vecteurs isotopiques début de cycle
- ...

... et à propager au reste du réacteur

- Analyses de **Sensibilité** et d'**INCeRtitudes** pour les **Outils** de calcul **NEutronique**
- Développer, étudier et appliquer à un **modèle TRIPOLI non industriel** des méthodes de traitement d'incertitudes dédiées aux simulateurs bruités, dans la perspective d'études sur des REP à plus long terme (**démarche de faisabilité**)

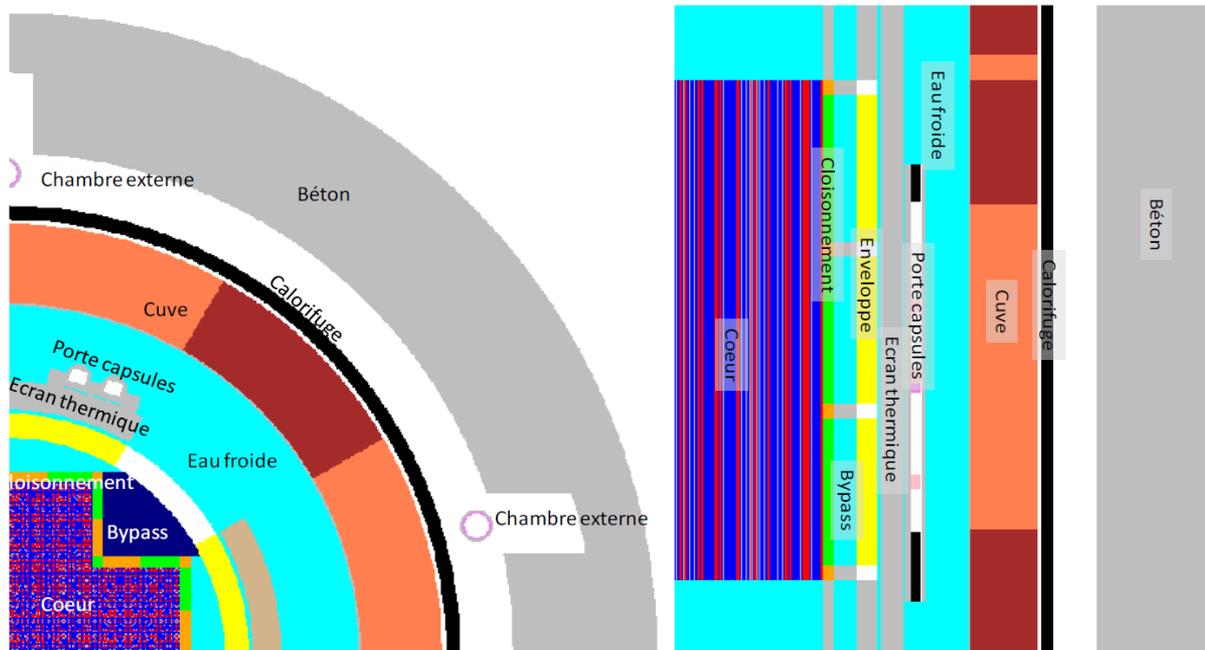
- **Simulateur bruité** : $g(X) = E[f(X, \varepsilon) \mid X]$

- X : données incertaines
- $g(X)$: quantité d'intérêt
- $f(., \varepsilon)$: simulateur bruité

$f(., \varepsilon)$ considéré comme une boîte noire et associé à un budget de calculs limité

- Traitement d'incertitudes
 - **Analyse de Sensibilité globale (indices de Sobol)**
 - Propagation d'incertitudes (**estimation de quantiles**)
 - Un outil : le krigeage (métamodèle)

- Quart de pseudo-réacteur à eau pressurisée



- Quantités d'intérêt (scores)

- Dépôt énergie 0n , dpa atomes Fe (cloisonnement et enveloppe)
- Flux (cuve, capsules)
- Taux de réaction ^{10}B (chambres externes)

- Données incertaines

- Paramètres géométriques (4)
- Densités (4) et fractions isotopiques (4)
- Température de l'eau (11)
- Sources neutroniques :
1 assemblage central, 2 périphériques
17 x 17 crayons par assemblage
2 spectres de fission (^{235}U et ^{239}Pu)

- Indices de Sobol :

$$Y = g(X) = g(X_1, \dots, X_p)$$

Quelles sont les variables d'entrée X_i contribuant le plus à l'incertitude de Y ?

- Indices du 1er ordre : part relative de $\text{Var}(Y)$ imputable à X_i seul :

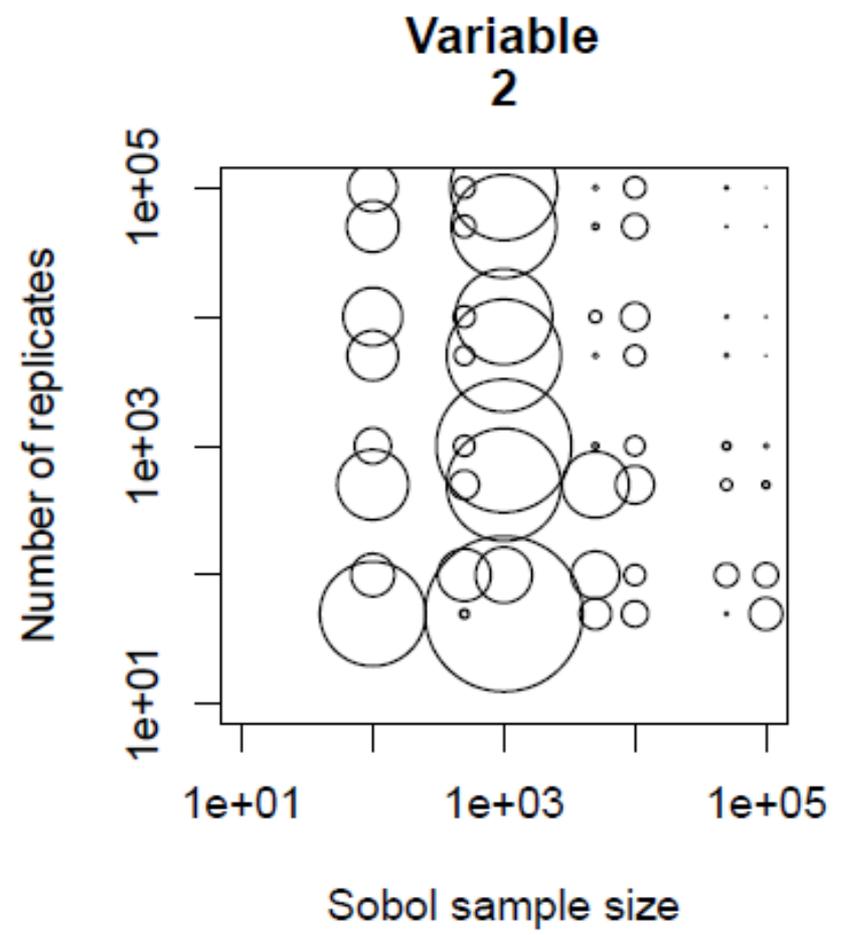
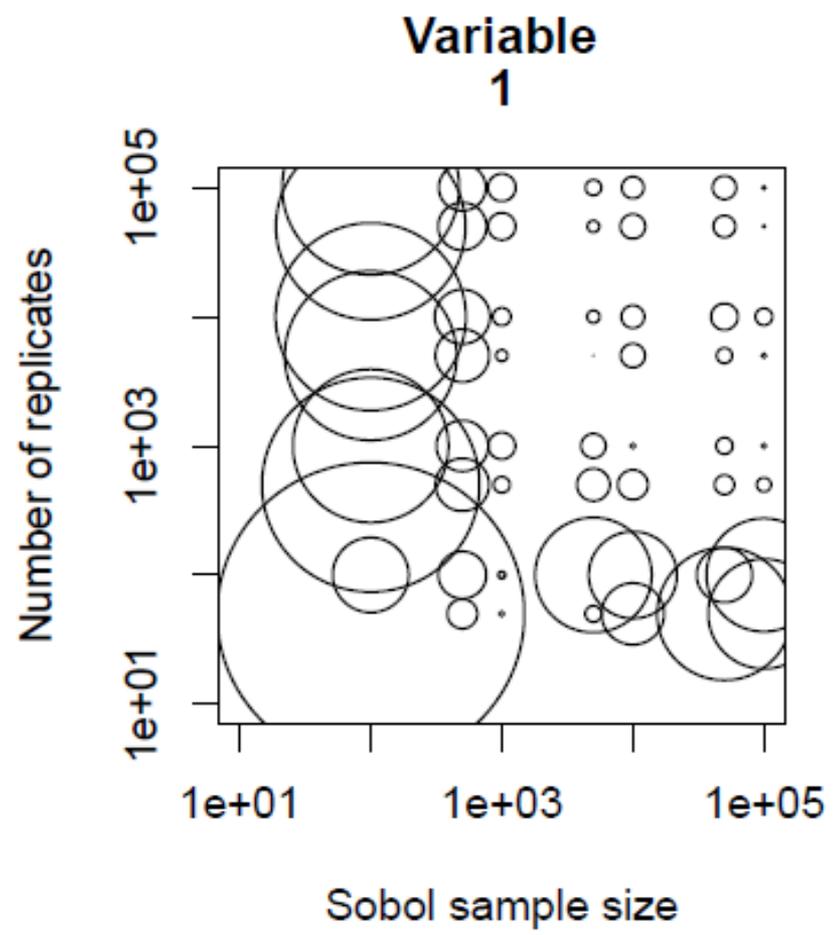
$$S_i = \frac{E[\text{Var}(Y) - \text{Var}(Y|X_i)]}{\text{Var}(Y)} = \frac{\text{Var}(E[Y|X_i])}{\text{Var}(Y)}$$

- Indices d'ordre deux : part relative de $\text{Var}(Y)$ imputable à l'interaction entre X_i et X_j :

$$S_{ij} = \frac{\text{Var}(E[Y|X_i, X_j])}{\text{Var}(Y)} - S_i - S_j$$

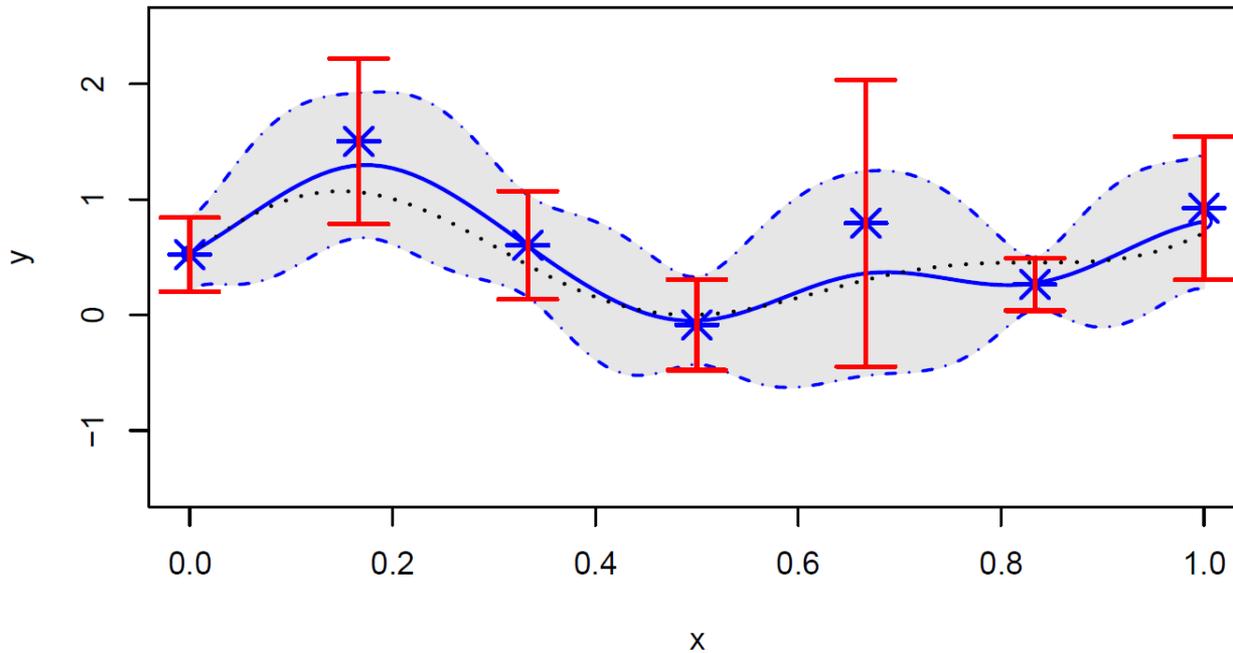
- Décomposition de la variance en parts relatives : $\sum_i S_i + \sum_{i,j} S_{ij} + \dots + S_{12\dots p} = 1$

- Travail théorique sur les propriétés asymptotiques d'estimateurs des indices de Sobol de type Monte-Carlo (*peak and freeze method*) dans le cas des simulateurs bruités
- Illustration numérique sur une fonction jouet :



Krigeage et planification d'expériences numériques (1/2)

- Estimation des indices de Sobol par Monte-Carlo impossible directement (coût CPU)
- Utilisation de métamodèles :
réponse réelle du système \approx réponse Y calculée par TRIPOLI \approx sortie Z du métamodèle
coût CPU très élevé coût CPU faible
- Krigeage (modélisation par processus gaussiens) – illustration 1D



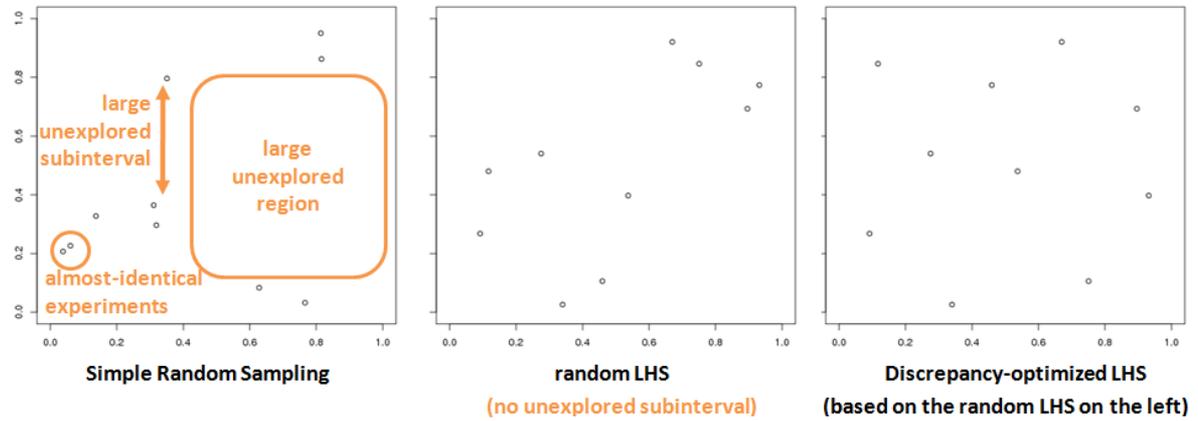
Roustant et al. (2012). *DiceKriging, DiceOptim: Two R Packages for the Analysis of Computer Experiments by Kriging-Based Metamodeling and Optimization*. Journal of Statistical Software.

La dimension probabiliste du modèle permet la définition de méthodes de planification séquentielle d'expériences numériques dans un objectif donné (cf. *Efficient Global Optimization, Stepwise Uncertainty Reduction*)

Comment choisir les valeurs des paramètres des expériences numériques (simulations) et le nombre de répétitions de chaque expérience ?

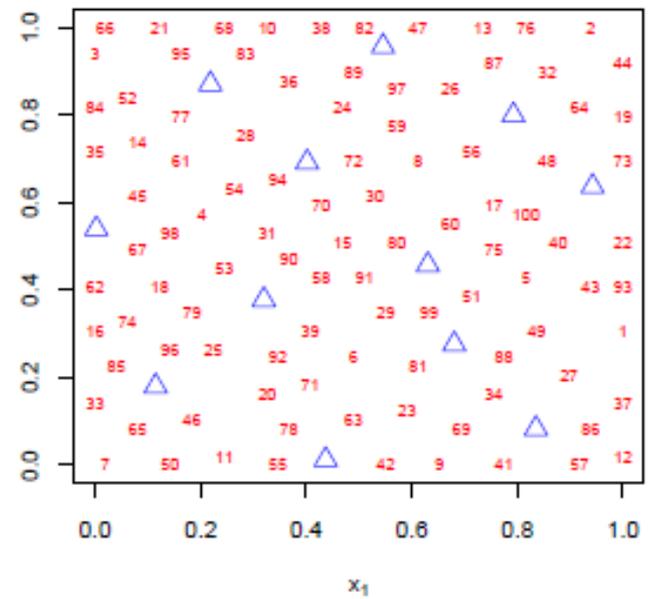
• Stratégie :

1) Space filling design : *discrepancy-optimized LHS* (ci-contre en 2D) ou suite à discrédance faible

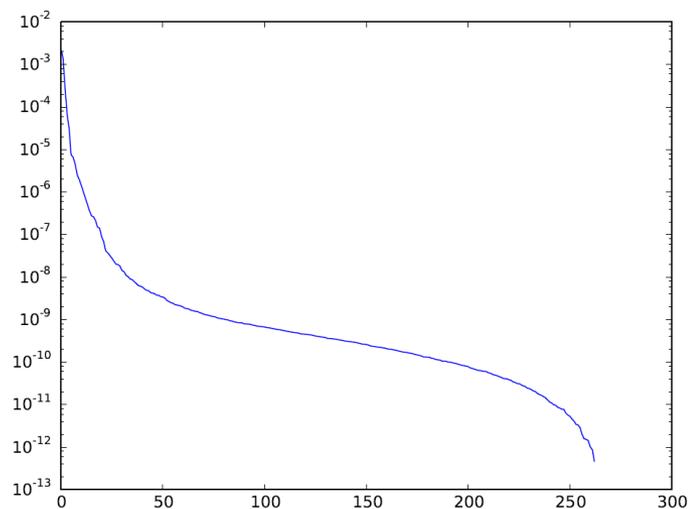


2) Allocation des répétitions sur ce plan initial puis enrichissement du plan basés sur le critère IMSE (*Integrated Mean Squared Error*)

→ Développement d'une méthode implémentée dans le paquet R « sensitivity » (à droite illustration sur une fonction jouet)

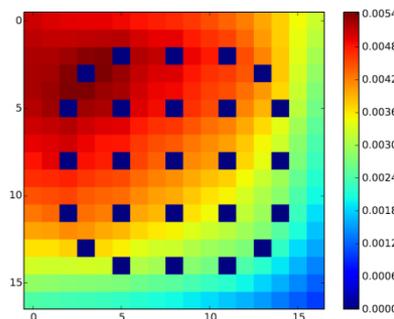


- La distribution normalisée des sources pour chaque types d'assemblages (central et périphérique) et chaque spectre de fission (^{235}U et ^{239}Pu) est une donnée de grande dimension : $17 \times 17 = 289$ crayons.
- Un axe de travail concerne la modélisation probabiliste de l'incertitude sur ces « nappes », à partir de données, représentatives mais non industrielles ici.
- Approche par Analyse en Composantes Principales : une illustration (assemblage périphérique, ^{235}U)

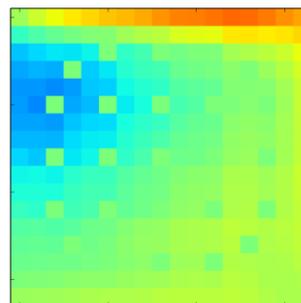


Spectre (R=97% pour K=3 composantes)

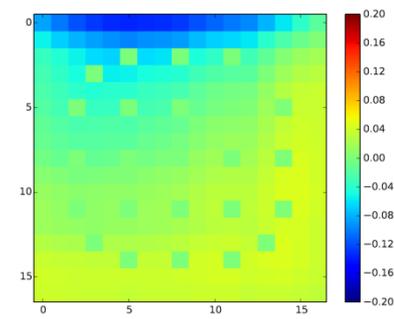
→ Développement d'une procédure linéaire « d'interpolation » pour une ACP fonctionnelle



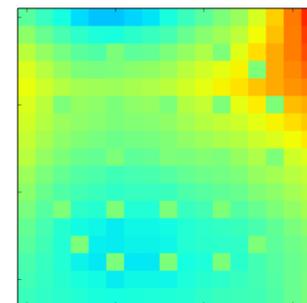
moyenne



2^e composante



1^{ère} composante

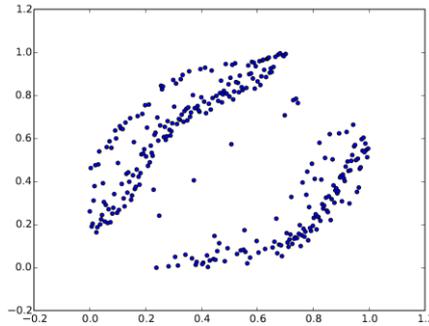


3^e composante

^{235}U

Perspectives à court terme ASINCRONE

- ACP efficace sur le plan de la réduction de la dimension MAIS...
 - Problème de précision et de non positivité pour les sources Pu de l'assemblage central
 - Problème de forte dépendance entre les coefficients de l'ACP :



Rang coeff. 1^{ère} composante vs celui 2^e composante

- Construction d'un métamodèle de krigeage (évaluation d'un plan d'expériences en cours)

Conclusions générales

- L'estimation de la variance statistique des codes stochastiques reste un enjeu de recherche
 - Notamment en situation de couplage (M2C2)
- Cette variance est une source d'information pour l'établissement du plan d'expériences