



Journée des utilisateurs OpenURNS  
Saclay - 23 juin 2023

# Traitement des incertitudes

## Applications et perspectives à EDF

Etienne Décossin - responsable de programme R&D

*Crédits : Anne Dutfoy, Bertrand looss et toute l'équipe incertitudes  
EDF R&D*

# Contexte et enjeux EDF autour du traitement des incertitudes

## Beaucoup d'études concernent la **sûreté** et la **fiabilité**

- Évaluation plus fine des **marges de sûreté** et consolidation des démonstrations  
P.ex. simulations d'accidents thermo-hydrauliques
- Meilleure « fiabilité » des prévisions  
P.ex. maîtrise des incertitudes dans les prévisions de consommation

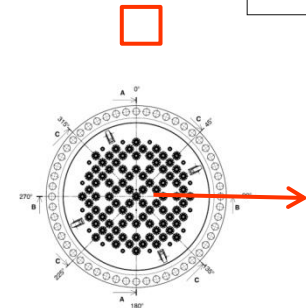
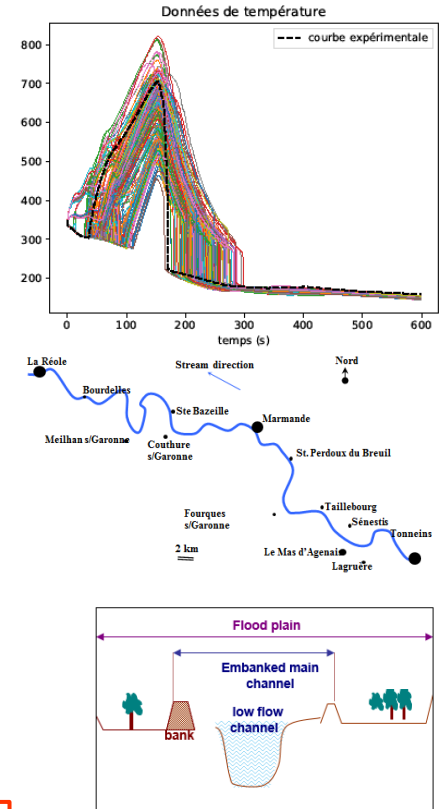
## Montée des problématiques de calibration et validation avec le recours croissant de la simulation aux différentes échelles

- Utiliser des codes en toute confiance dans les démonstrations : Guide 28 pour la sûreté nucléaire  
Vérification, Validation, Quantification des incertitudes, Calage, Assimilation, Transposition
- Maîtriser les **incertitudes expérimentales**  
Métrologie, Modélisation et intervalles de confiance robuste, Interpolation et extrapolation (spatiale)

## Concevoir des systèmes en maîtrisant les risques

- Gestion d'actifs, procédés, **optimisation sous incertitudes**
- **Jumeaux numériques**

La nécessité d'une compétence à l'état de l'art  
... mais également de rendre didactiques ces approches

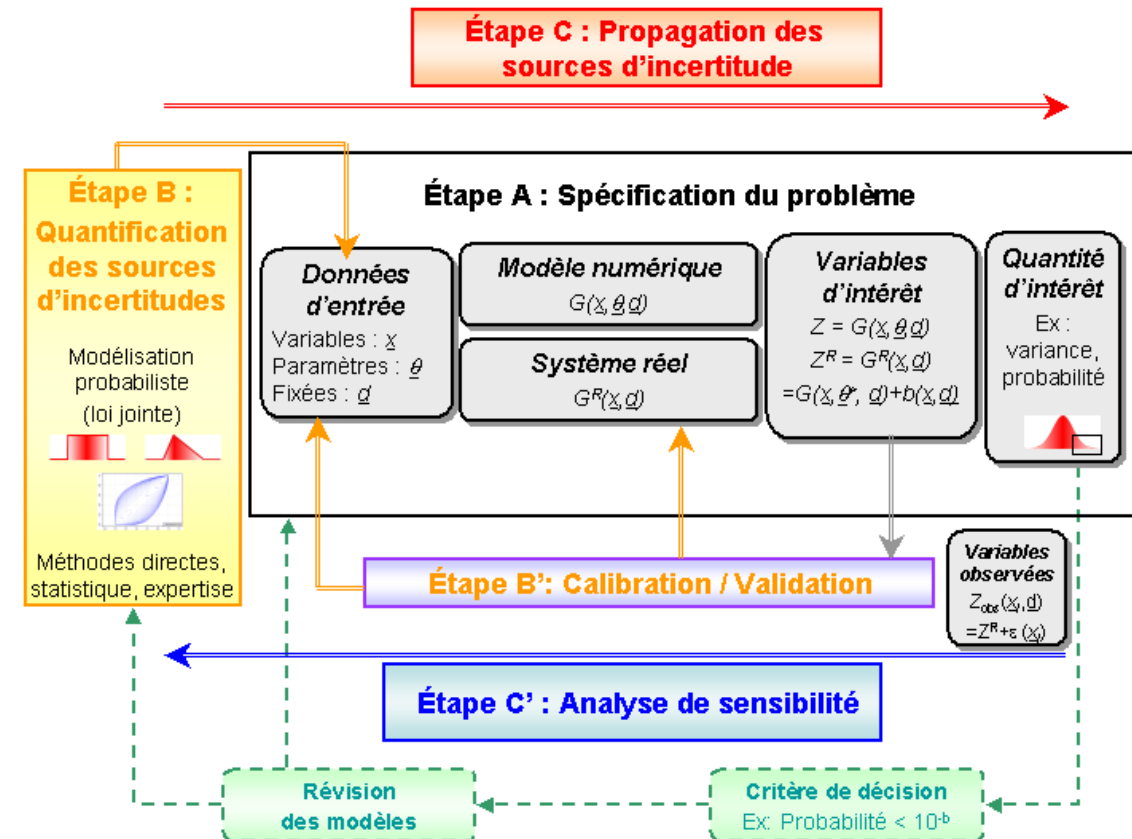


# Nos acquis

## Un pôle d'expertise en traitement des incertitudes développé sur 20 ans

- Approche générique pour unifier les pratiques des différents métiers
- Associer aux efforts de développements des grands codes de calcul le traitement des incertitudes
- Une ressource spécialisée pour « mettre la main à la pâte »
- Favoriser la recherche, le développement et le partage des méthodes avancées avec un réseau de partenaires en pointe dans le domaine

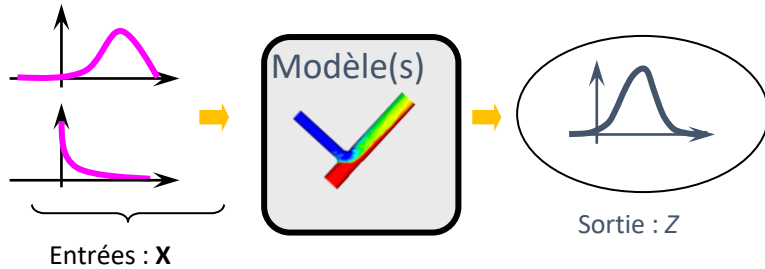
## Des méthodes outillées



*Schéma générique « Méthodologie Incertitudes »  
(15 ans de bons et loyaux services)*

# Travaux R&D – Guides et accompagnement

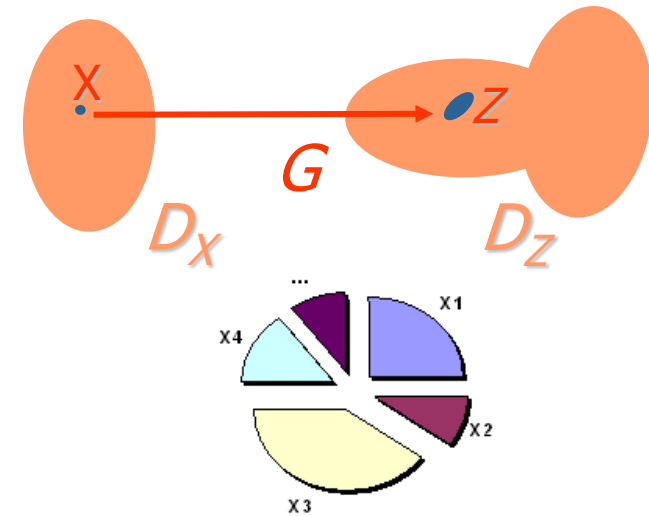
## Modélisation & propagation des incertitudes



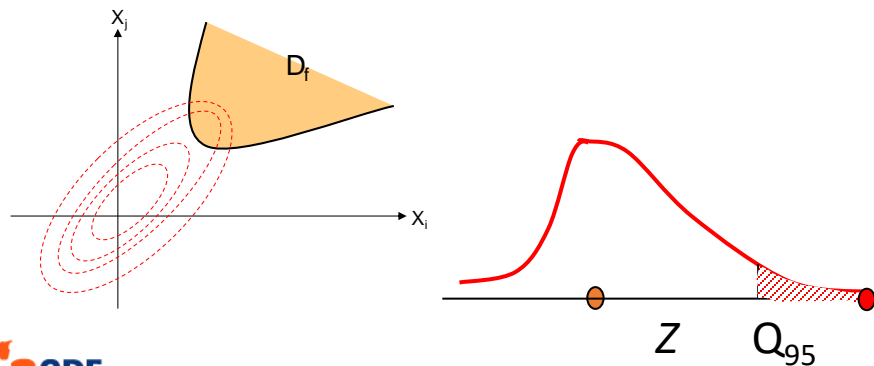
Plan  
d'expériences

Métamodèles

## Analyse de sensibilité



## Analyse de fiabilité (des structures)



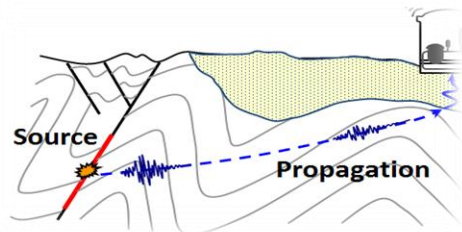
## Ajustement de paramètres (calage)

Cas « classique » : Les paramètres à caler sont <b>physiquement constants</b>					
<div><div><div>-</div><div>Richesse de l'information</div><div>+</div></div><div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div>&lt;</div></div>					

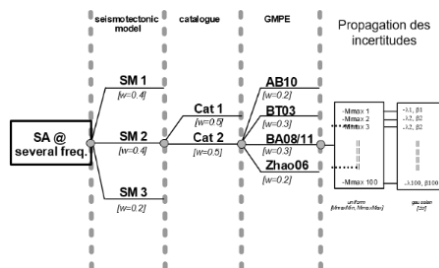


# Séisme

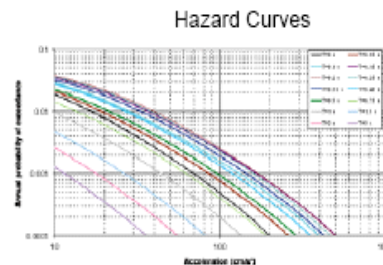
## Actualisation bayésienne dans l'arbre logique PSHA pour le calcul de l'aléa sismique



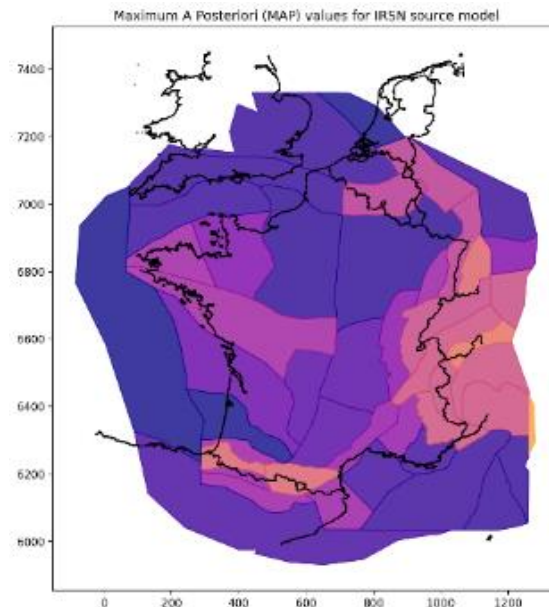
Modèle physico-probabiliste du PSHA



Arbre logique multi-modèles PSHA



Courbe d'aléa sismique



**Objectif** Amélioration de la connaissance et diminution des incertitudes sur la courbe d'aléa sismique avec une méthode plus justifiée : **actualisation bayésienne de l'arbre logique PSHA**

**Approche** Mise en commun des compétences en apprentissage statistique et en sismologie d'EDF et du CEA. Post-doc EDF-NCSU sur l'actualisation des modèles de propagation.

### Résultats

- Création de l'outil Python PHEBUS pour l'actualisation des modèles de source sismiques, basé sur OpenTURNS et Open Quake, application à la France.
- A terme, intégration dans PHEBUS des résultats du post-doc sur l'actualisation complète de l'arbre logique

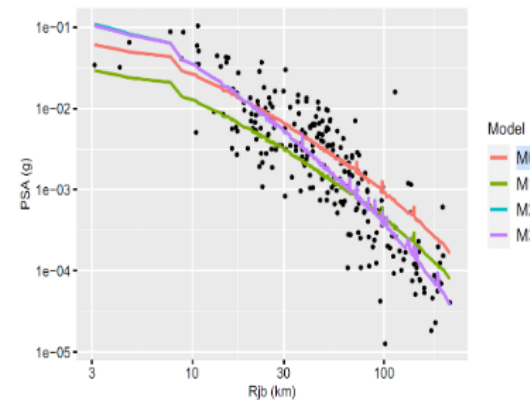
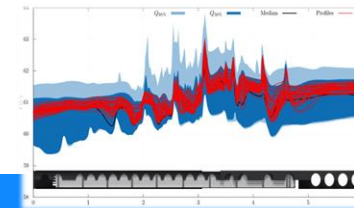
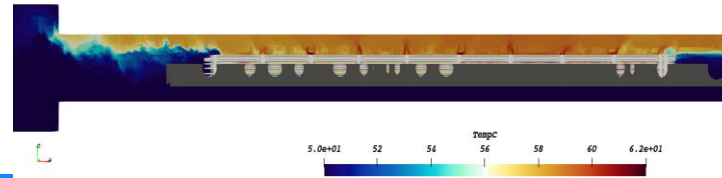
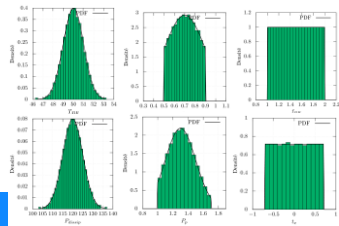
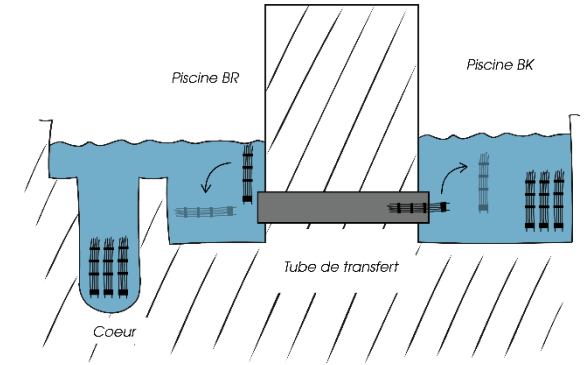


Figure 7  
Comparison between models based on Joyner-Boore distance for PSA at  $T = 0.2$  s

# Incertitudes en CFD – le « concept-car »

**Contexte** lors d'un blocage d'un assemblage combustible dans le tube de transfert la puissance résiduelle est dissipée par la seule convection naturelle

**Objectif** estimer l'incertitude commise sur la température au dessus de l'assemblage au regard de la température de saturation de 122°C



Methodologie

## Paramétrisation et mise en place de plans d'expérience avec OpenTURNS

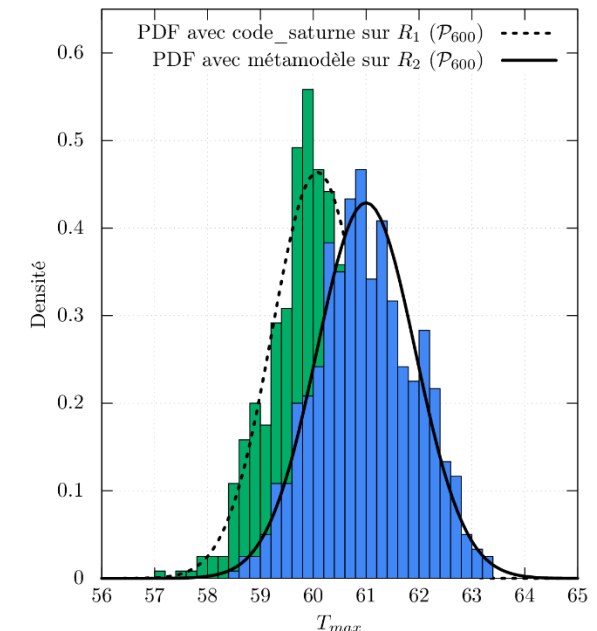
Définition probabiliste de la variabilité des paramètres et génération d'un plan d'expérience de 600 réalisations

## Réalisation de plus de 600 calculs issus du plan d'expérience avec code\_saturne

Lancement avec code\_saturne de toutes les simulations sur le super ordinateur Cronos (*temps de retour 1 semaine*)

## Exploitation des résultats avec OpenTURNS (Persalys)

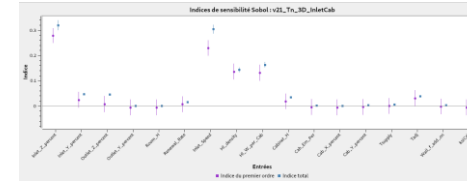
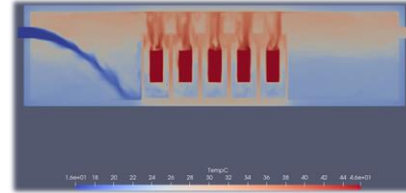
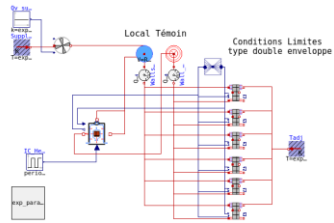
Les résultats issus de l'ensemble des simulations sont agrégés par OpenTURNS pour en permettre une analyse approfondie



# Traitement des incertitudes en Thermo-aéraulique industrielle aux échelles système et 3D

**Enjeu** Garantir la disponibilité de matériels électriques

**Objectif** Identifier des paramètres influents sur la stratification thermique, comparer des approches système et 3D, **préparer des protocoles expérimentaux** en local témoin



Méthodologie

## Encapsulation d'outils

Mailleur **Salome**  
+ Solveur 3D **Code\_Saturne**  
+ Solveur 0D-1D  
**TAEZoSysPro** (Modelica)  
+ modèle python **Persalys**  
(YACS – slurm study)

**SALOME**

 code.saturne

**OM**

## Plan d'expérience pour 17 paramètres incertains

géométrie, conditions  
limites, coefficients  
modèles

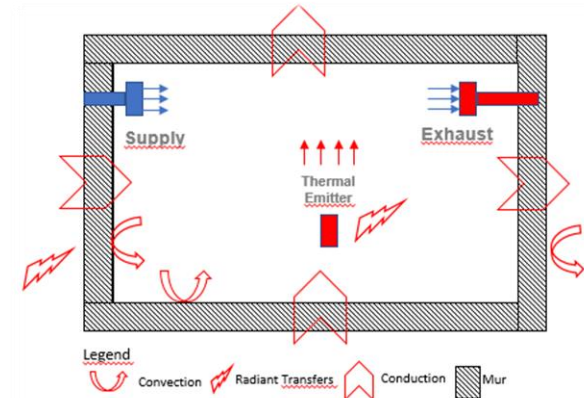
 Persalys



## Décomposition de la variance pour mesurer la sensibilité des sorties à ces paramètres

indices de Sobol',  
métamodèles de  
krigeage/chaos  
polynomial

Construction d'abaques  
numériques de  
stratification 



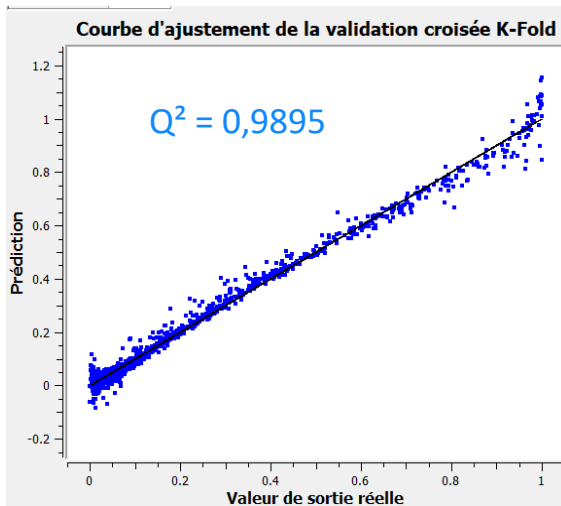
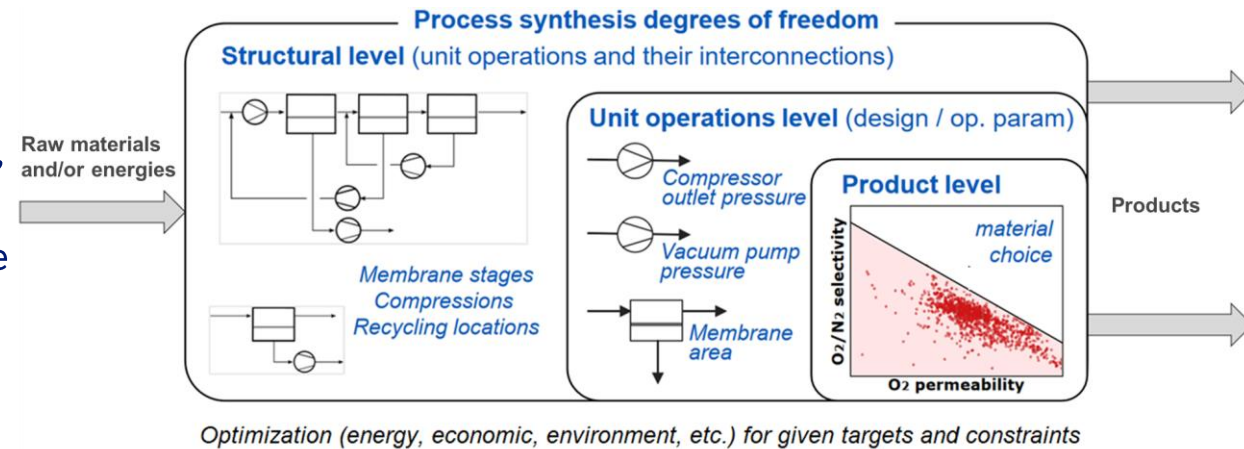
# Méta-modélisation pour la synthèse de procédés

**Contexte** Concevoir de manière optimale des procédés, par détermination : de la structure, des dimensions des opérations unitaires ; des conditions opératoires ; des matériaux / produits chimiques.

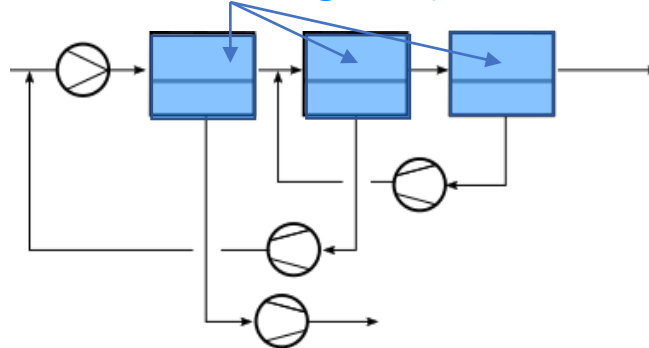
→ par optimisation (*non-convex Mixed-Integer NonLinear Programming*),  
> 1 000 000 d'appels nécessaires à certains modèles

**Objectif** S'affranchir du modèle physique (coûteux, capricieux) lors de l'optimisation pour accélérer la recherche d'optimums

Création d'un plan d'expériences, analyse des données, et méta-modélisation (chaos) dans OpenTurns / Persalys

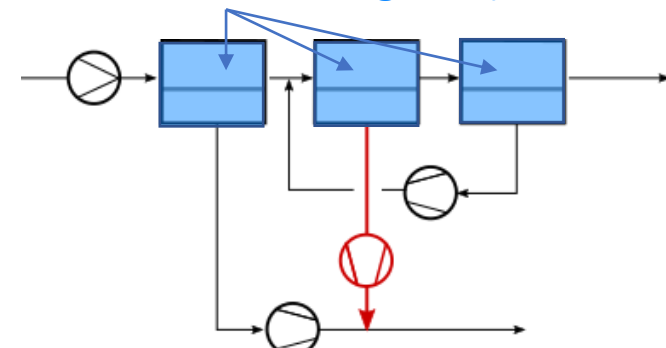


Résultat de synthèse avec un polynôme du chaos de degré 4 ( $Q^2 = 0,9895$ )



✗ **Solution non validée par le modèle physique**

Résultat avec un polynôme du chaos de degré 6 ( $Q^2 = 0,996$ )



✓ **Solution validée**



# Traitement des incertitudes pour la continuité de fourniture du réseau de distribution HTA

**Enjeu** Respect du Décret « Qualité des Réseaux de Distribution »

**Objectif** Evaluer différents indicateurs de continuité de fourniture du réseau de distribution. A l'échelle d'un département, pour chaque client:

- Nombre annuel de coupures
- Durée cumulée annuelle de coupure

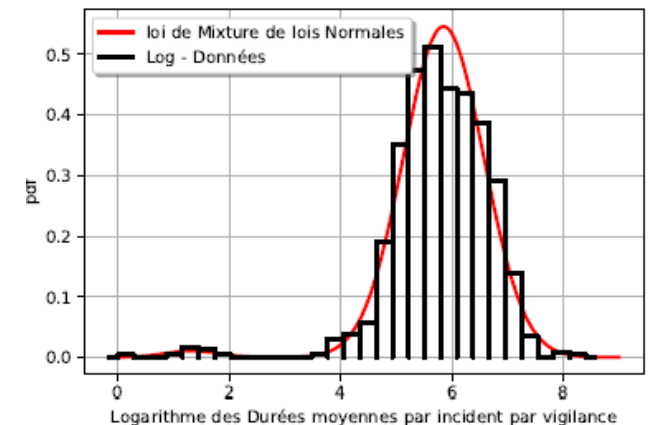
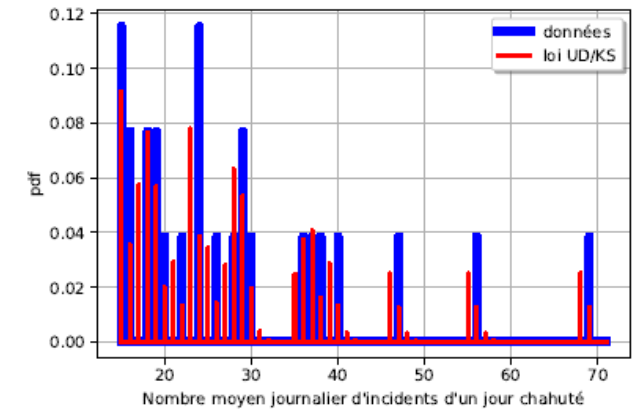
Ces indicateurs permettent d'orienter les décisions d'investissement.

## Méthodologie - OpenTURNS

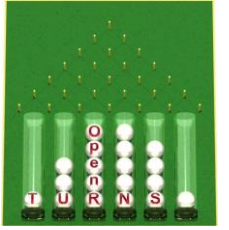
- Définition d'un **critère probabiliste** pour caractériser un **jour « chahuté »**, c'est à dire un jour ayant subi un nombre anormalement grand d'incidents dus à des causes climatiques externes
  - Estimation de la **loi du nombre de jours chahutés** dans l'année
  - Estimation de la **loi de la durée de réparation** de l'incident
- ➔ utilisation des fonctionnalités d'estimation de loi, de modélisation par des lois complexes

## Résultats

- Méthodologie à l'étude pour être **intégrée dans l'outil QAT (Qualité d'Alimentation des Territoires)** utilisé par Enedis en collaboration avec la R&D



# OpenTurns - Un outil qui fait référence



## Des canaux de diffusion larges

- Package OpenTurns sous Linux-Debian, Fedora et leur dérivés
- Package Python installable en standard  
via conda : 155 000 téléchargements la dernière année  
via pip : 5500 téléchargements en février 2023, en progression.
- Intégration dans l'environnement de simulation SALOME  
Permet la simulation de bout en bout et l'accès au HPC
- Forum utilisateurs

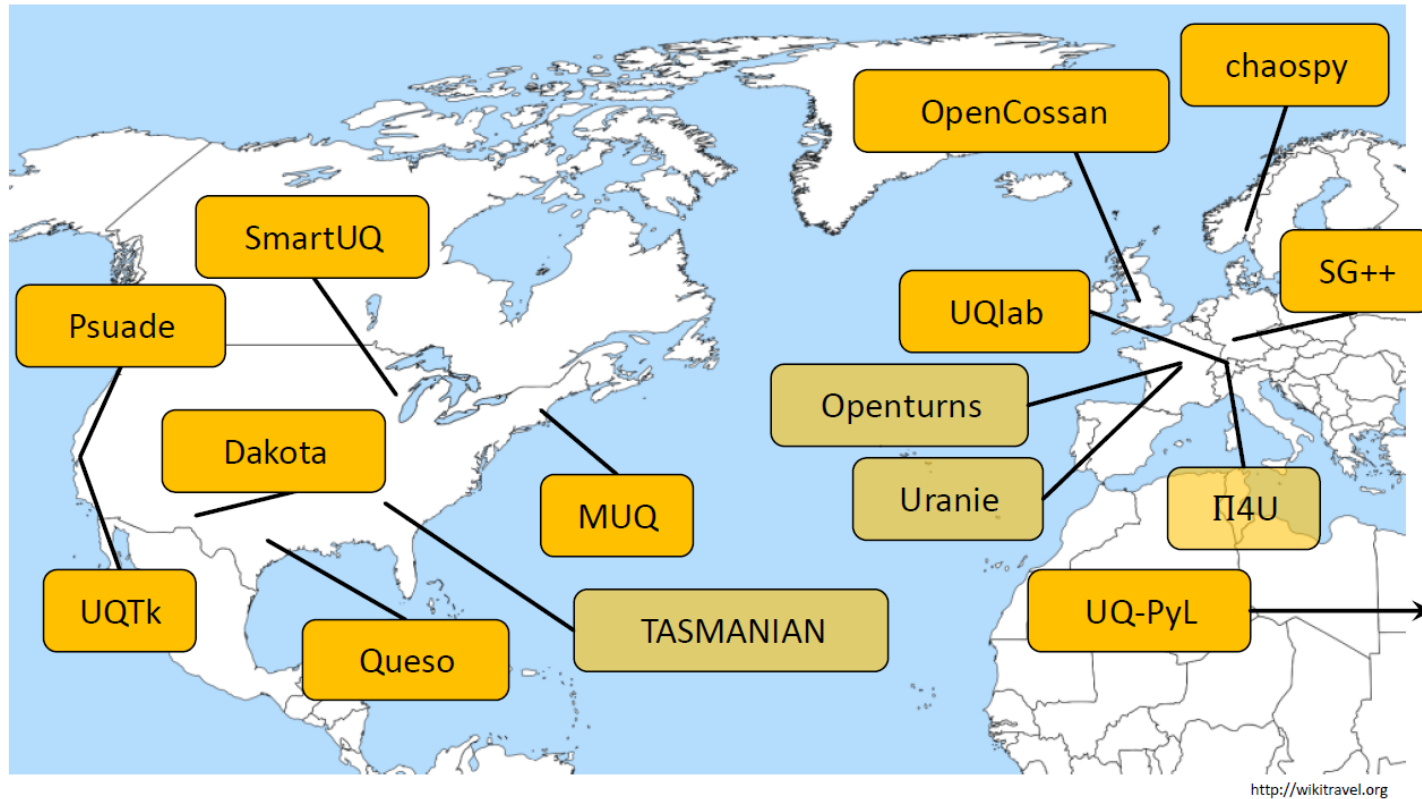
## 3 niveaux d'utilisation

- Besoin ponctuel (non spécialiste)  
Enjeu fonctionnel : facile à utiliser pour les débutants
- Analyses détaillées (utilisateur confirmé)  
P.ex. identifier quelles variables sont influentes
- Développement d'outils d'analyses pour les développeurs du module physique

## Les atouts d'OpenTurns

- Une **diversité de cas d'applications** qui permet de proposer des méthodes génériques
- des centres de R&D dont la vocation est de faire avancer les méthodes pour répondre aux besoins de leurs entités opérationnelles
- le réceptacle naturel des travaux de thèse des partenaires
- Une **offre de formations méthodologiques** et techniques auprès des industriels et dans le milieu académique
- Un **réseau scientifique** très large et une présence internationale (conférences, publications, ...),
- une **licence open source** qui favorise la diffusion auprès des académiques, des projets collaboratifs ...
- une **équipe dédiée** à qui chaque partenaire a donné du temps pour dynamiser les développements et entretenir une vie active de la communauté (forum ...)

# Dans un domaine actif



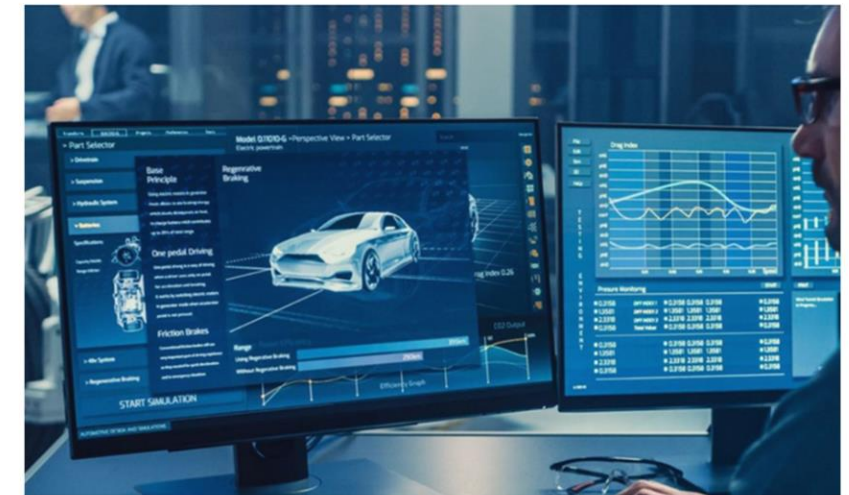
SIAM UQ 16, MS 41, 56, 72: Software for UQ, Dirk Pflüger & Tobias Neckel

Dr. rer. nat. Tobias Neckel | Algorithms for Uncertainty Quantification | Summer Semester 2017

you are invited to:

**Free Webinar: SmartUQ Capabilities and Strengths: A Comparison Against OpenTURNS**

*January 31, 2023 2:00 PM to 3:00 PM ET*



SmartUQ is a powerful Machine Learning (ML) and Uncertainty Quantification (UQ) software tool optimally designed for science and engineering applications. It was invented to solve modern UQ and ML problems such as those found in internal combustion engine and gas turbine applications. As such, it is well suited for a plethora of UQ and ML applications across multiple industries including aerospace, automotive, and energy.

# Perspectives autour d'OpenTurns à EDF

## **Contrat de consortium renouvelé**

- Gouvernance open-source simple et efficace, gage de reconnaissance transparence

## **Poursuivre et intensifier les efforts de dissémination vers nos métiers**

- Augmentation à venir du nombre d'utilisateurs
- Formations iTech, accompagnement et amorçage des études
- Diffusion/promotion des outils OpenTurns, valoriser l'ergonomie de Persalys pour les nouveaux entrants
- Mieux connaître nos utilisateurs, en interne et en externe

## **Tirer parti des opportunités du GIS LARTISSTE**

## **Savoir traiter de très gros volumes des données, en intégrant facilement des algorithmes d'IA modernes**

## **Mieux qualifier les métamodèles : validation, robustesse, estimation de l'erreur**

## **Contribuer au développement des jumeaux numériques**

- Accélérer/rendre possibles les calculs au travers de métamodèles
- Se coupler d'un point de vue méthodologique et pratique (interopérabilité des outils, briques réutilisables)
- Donner confiance dans le résultat, dans une optique d'aide à la décision