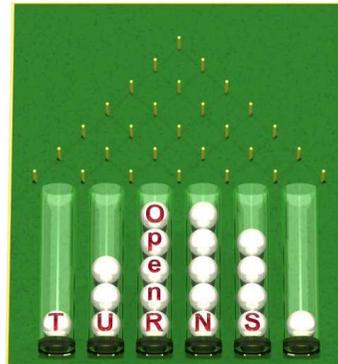
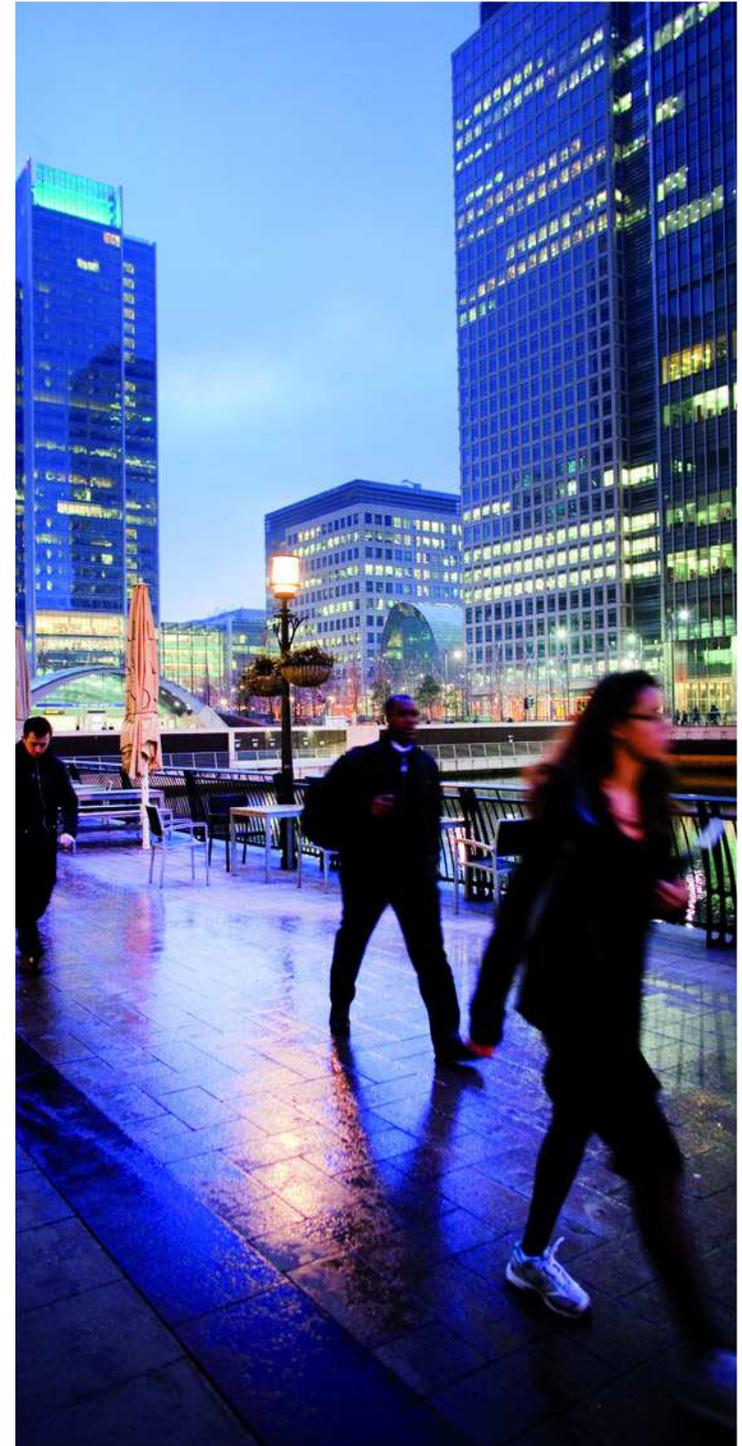




Traitement d'incertitudes en contexte industriel : quelques applications EDF



Anne-Laure Popelin
EDF R&D, Management du Risque Industriel
Ecole PECNUM,
Lyon, 20 mai 2015



Objectifs et enjeux du traitement des incertitudes en contexte industriel

- ▶ En pratique, la prise en compte des incertitudes dans les études industrielles est motivée par (au moins) un objectif parmi :
 - **Compréhension**: mieux comprendre les modèles utilisés (**exploration de modèle**), guider les efforts de R&D/les futures campagnes d'essais (**analyse de sensibilité**)
 - **Qualification**: donner du crédit à un modèle ou une méthode de mesure, i.e. quantifier le niveau de précision / **degré de confiance** associé au calcul / essai
 - **Sélection de modèle** : comparer la performance relative de plusieurs scénarios afin **d'optimiser** la conception ou la maintenance d'un système
 - **Démonstration de conformité**: pour démontrer la conformité du système avec des critères ou un seuil réglementaires (ex : sûreté nucléaire, contraintes environnementales, certification aéronautique, ...)
- Au sein d'une même étude, plusieurs objectifs ... et progressivité
 - Ex : L'analyse de sensibilité peut servir dans une première étude à construire une étude plus complexe menant à la conception finale et / ou la démonstration de la conformité

Organisation EDF autour de la thématique

- ▶ Un projet « transverse » de R&D : développements méthodo et outil OpenTURNS
- ▶ Un « réseau incertitudes » interne
- ▶ De nombreuses applications dans des projets « métier »
- ▶ De nombreux partenariats / collaboration avec industriels / académiques / sociétés savantes

Projet tripartite



Mascot-Num regroupe et anime la communauté (académique et industrielle) dans ce domaine



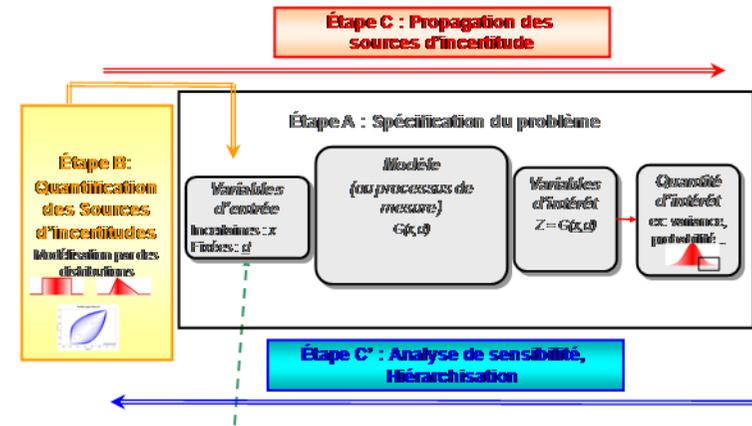
Sommaire

- ▶ Cadre générique du traitement des incertitudes
- ▶ OpenTURNS, logiciel dédié aux incertitudes
- ▶ Quelques applications industrielles

Sommaire

- ▶ Cadre générique du traitement des incertitudes
- ▶ OpenTURNS, logiciel dédié aux incertitudes
- ▶ Quelques applications industrielles

Traitement des incertitudes : approche générale



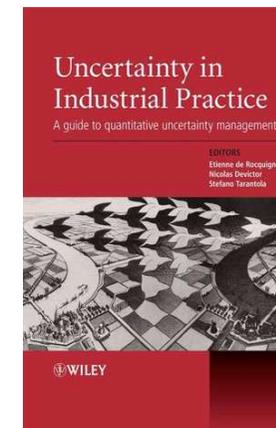
Un schéma qui couvre une bonne partie des problèmes

- compréhensible par les ingénieurs
- aide à la formalisation d'un problème
- la démarche « par étapes » distingue les phases de l'étude où différentes compétences sont demandées

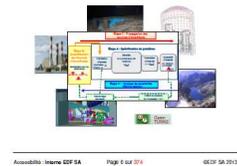
Vision du problème : propagation d'incertitudes « paramétriques »

- code « boîte noire » → approche « non intrusive »
 - logiciels distincts pour le modèle physique et la quantification/propagation d'incertitudes
- approche commune à un certain nombre d'entreprises et organismes de recherche (travaux communs EDF, Airbus, CEA + Dassault Aviation, LNE, RollsRoyce ...)

Groupes de travail ESRéDA, IMdR (2003-2008)



Y. Lefebvre, E. de Rocquigny, A. Dufloy, F. Deloigne, B. Sudret, A. Cagnac
et les équipes des projets
"Méthodes Incertitudes" (PIOM), "Outil de Traitement des Incertitudes" (PIOT), "Incertitudes" (PIOM) et "Incertitudes 2015" (PIOM)



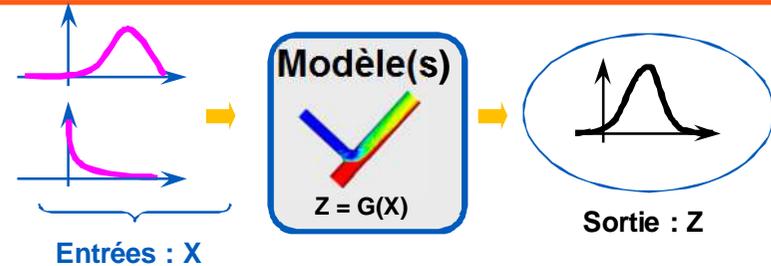
Besoin émergent : un cadre plus général qui intègre également vérification et validation : VVUQ

Analyses d'incertitudes et de sensibilité

Représentation boîte noire : $Z = G(X)$

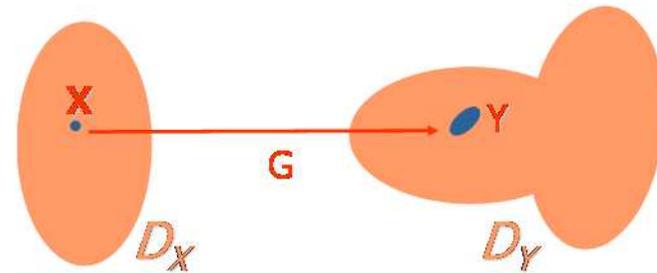
Analyse d'incertitude (problématique générale)

Estimation et étude de la distribution des sorties d'un code induite par les distributions de probabilités des variables d'entrée



Analyse de sensibilité

La sortie Z est-elle plus ou moins variable lorsque l'on fixe une des entrées X_i ?
Quelles variables d'entrée sont les plus influentes ?

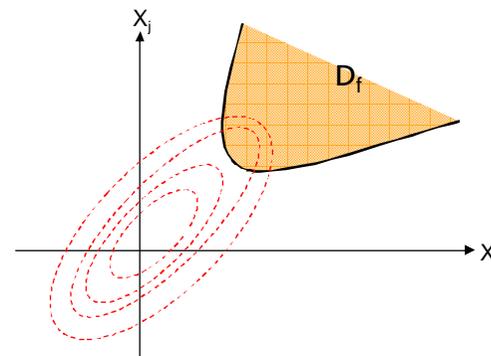


Analyse de fiabilité

Quelle est la probabilité que la variable Y dépasse un seuil donné ?

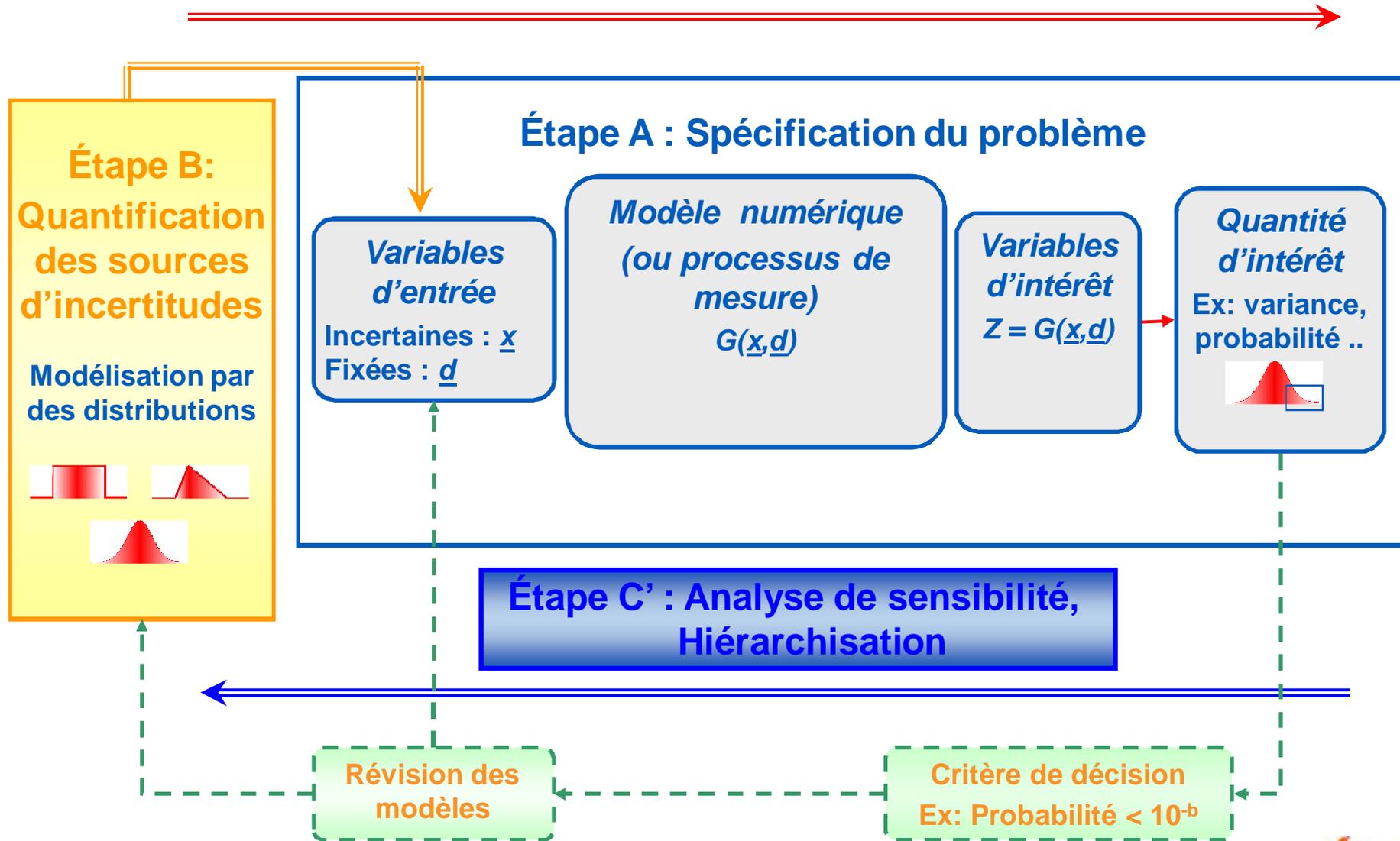
$$p_f = \int \mathbb{1}_{\{G(x) \leq 0\}} p(x) dx = \int_{D_f} p(x) dx$$

Autres problématiques : estimation de quantiles, inversion du domaine de défaillance



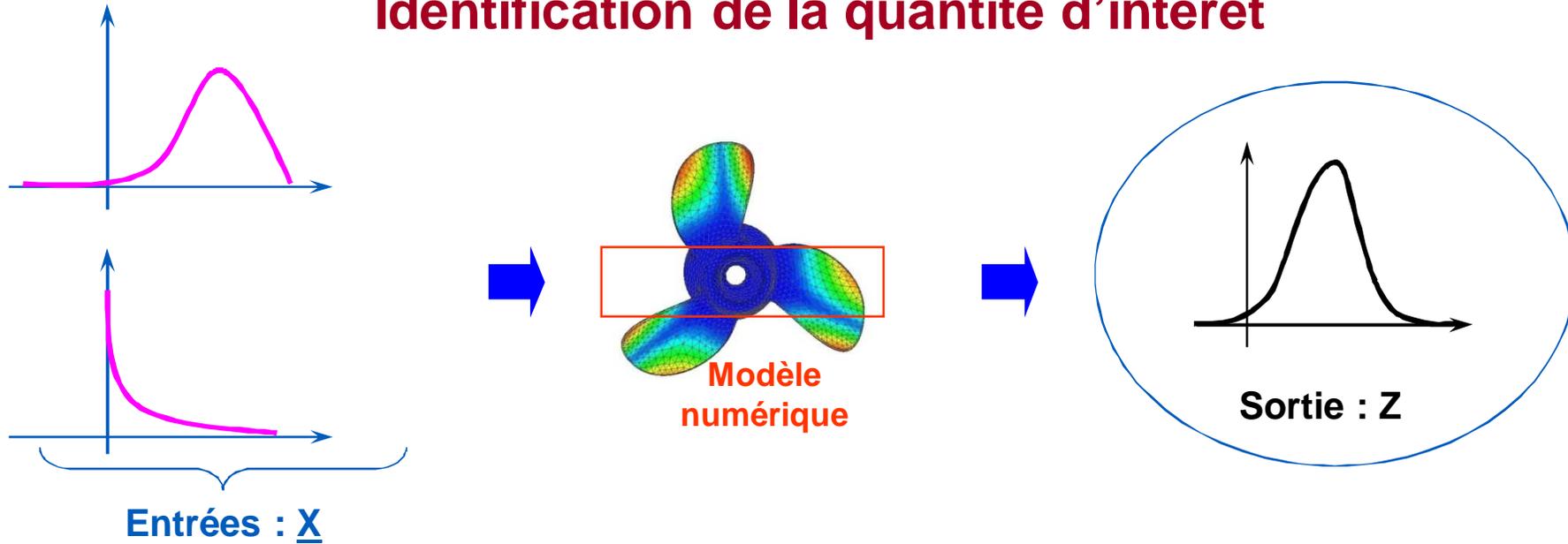
Enjeu typique : justifier un critère de sureté

Étape C : Propagation des sources d'incertitude

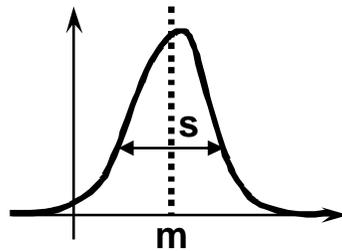


A : Spécification du problème

Identification de la quantité d'intérêt

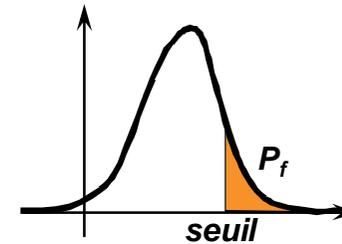


Qu'est ce qui est (vraiment) intéressant pour notre étude ?



Moyenne, médiane, variance,
(moments) de Z

*Contexte d'une étude de conception /
compréhension d'un système*



Quantiles (extrêmes), probabilité
de dépassement d'un seuil fixé,
distribution complète

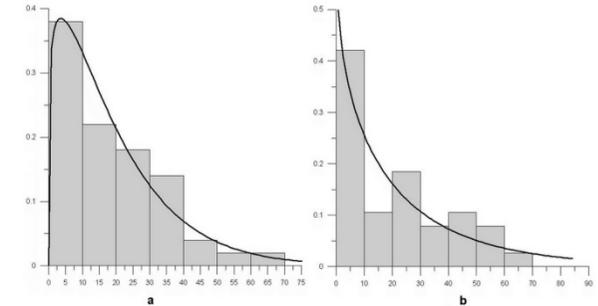
Contexte d'une étude de sûreté 

B : Modélisation statistique des sources d'incertitudes

Quantification de la loi jointe nD ...

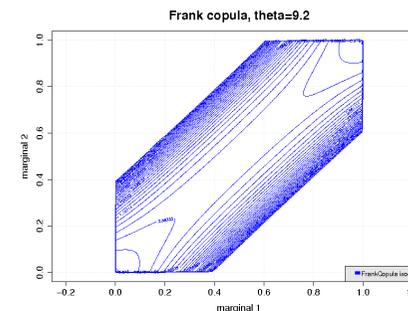
1. Détermination des lois marginales 1D

- Beaucoup de données (typiquement > 30) :
 - ✓ Ajustement de distributions paramétriques ou non
 - ✓ Tests d'adéquation
- Peu de données disponibles => hypothèses, bibliographie, principe du Maximum d'Entropie, Jugement d'expert, modélisation bayésienne

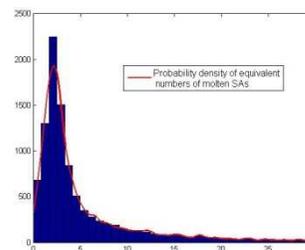


2. Modélisation de la dépendance

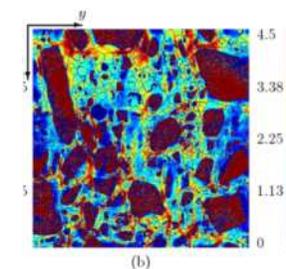
- Utilisation d'une copule
- Validation



3. Modélisation des extrêmes



4. Modélisation de l'hétérogénéité temporelle et/ou spatiale



C : Propagation des incertitudes : Méthodes déterministes vs. stochastiques

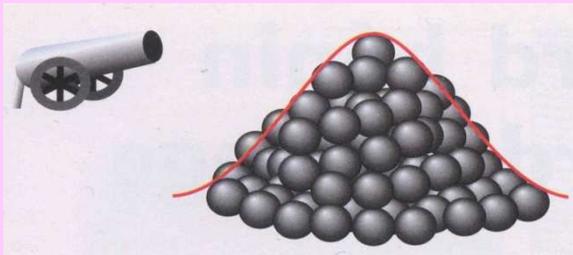
$$Z = G(\mathbf{X}), \quad \mathbf{X} \in \mathbb{R}^p, \quad Z \in \mathbb{R}$$

- Approche déterministe (dérivées, adjoint, sensibilités locales)

$$Z(\mathbf{X}) = Z(\mathbf{X}^0) + \sum_{i=1}^p \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \right)_{\mathbf{X}^0} (X_i - X_i^0) \quad (\text{hypothèse de linéarité})$$

- Approche stochastique (échantillonnage Monte-Carlo)

Propagation



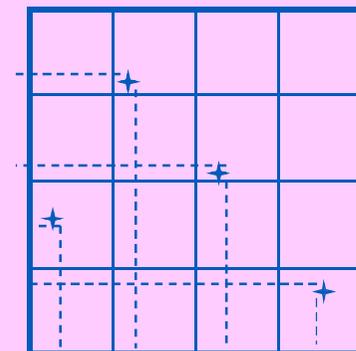
Méthode relativement simple
et souple (considère le
code en boîte noire)

⇒ coût élevé pour probabilités faibles

⇒ Méthodes probabilistes et plans d'expérience
spécifiques pour réduire ce coût

Exemple :

L'hypercube latin

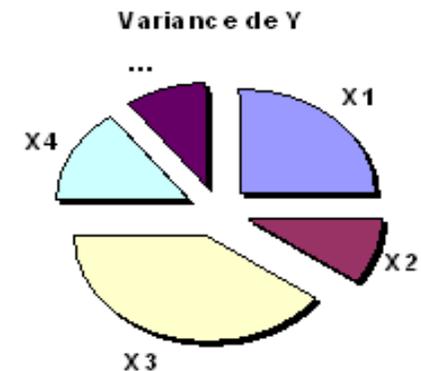
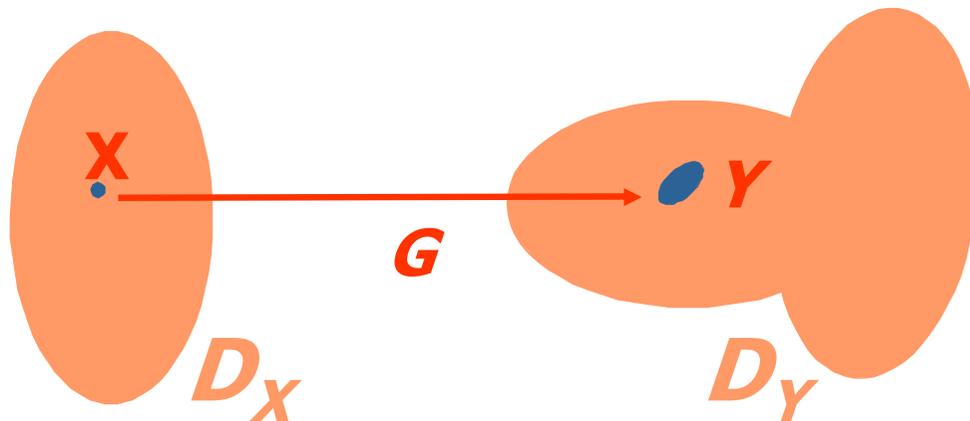


$p = 2$
 $N = 4$

C' : Analyse de sensibilité

Objectifs :

► Hiérarchiser les sources d'incertitudes afin de réduire la variabilité de la sortie



► Simplification du modèle

- **Déterminer les variables aléatoires non-influentes**, qui peuvent être considérées déterministes sans influence la variabilité de la sortie (méthode de Morris, calculs des dérivées)
- Construire un modèle simplifié, un métamodèle

Sommaire

- ▶ Cadre générique du traitement des incertitudes
- ▶ OpenTURNS, logiciel dédié aux incertitudes
- ▶ Quelques applications industrielles

OpenTURNS

Open TURNS a pour mission de **propager** les incertitudes à travers un modèle jusqu'à une variable d'intérêt, en proposant des fonctionnalités pour **quantifier** les incertitudes, en vue de **hiérarchiser** leur influence sur la variable d'intérêt. Open TURNS permet aussi de remplacer le modèle par une **surface de réponse**.

Open TURNS est le support logiciel à la Méthodologie de Traitement des Incertitudes mise au point par EDF R&D et enrichie très largement par d'autres industriels :

- ✓ **Etape A : Spécification du modèle** : variables incertaines, modèle, variable(s) d'intérêt, critère d'analyse (Min/Max, Tendence centrale, Dépassement de seuil)
- ✓ **Etape B : Quantification des incertitudes** : détermination de la loi jointe du vecteur aléatoire d'entrée
- ✓ **Etape C : Propagation des incertitudes** : quantification du critère d'analyse
- ✓ **Etape C' : Hiérarchisation des incertitudes**

➤ **Partenaires 2005 – 2015 : EDF R&D / Airbus / PHIMECA / IMACS (depuis 2014):**

- ✓ **transparence** : acceptation de la méthode et des outils par les autorités de contrôle et de certification
- ✓ **genericité** : enrichissement de la méthode et des outils par des domaines divers (mécanique, thermique, hydraulique, électro-magnétisme, ...)
- ✓ **performance calculatoire** : traitement de cas industriels complexes (parallélisation, distribution des calculs, ...)

➔ **Open TURNS : an open source platform dedicated to uncertainty treatment by probabilistic methods**

- ✓ **Open source Treatment of Uncertainty, Risk 'N Statistics**
- ✓ **Sous licence LGPL**

www.openturns.org

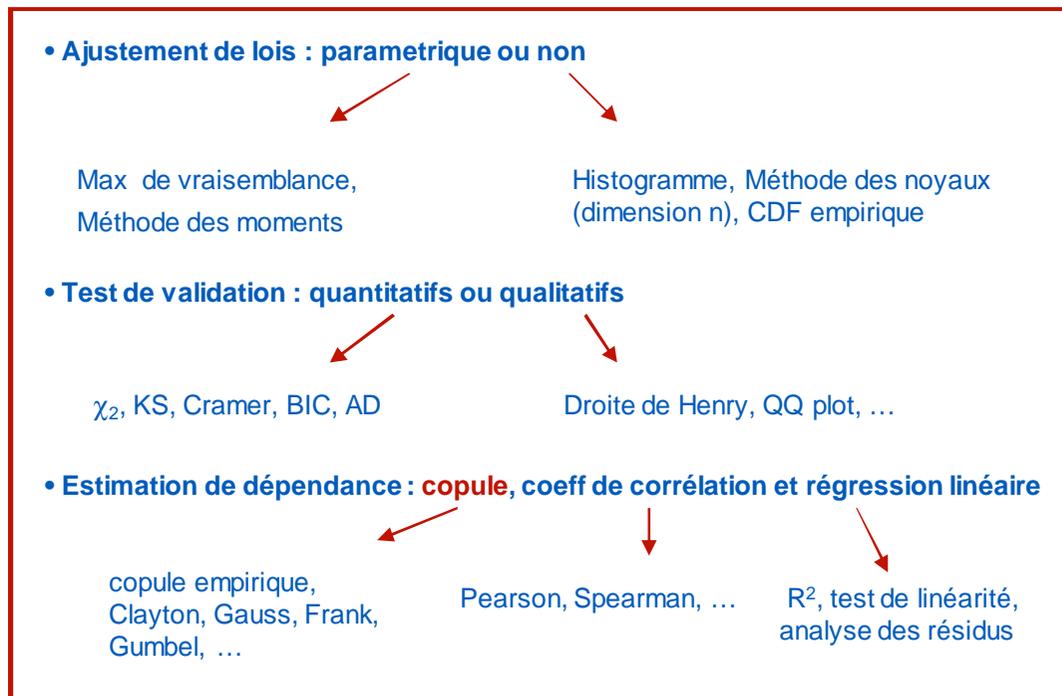
Open TURNS : contenu scientifique

➤ Etape A : Spécification du modèle

- ✓ **Critère déterministe** ou **probabiliste** : min / max + dispersion centrale, probabilité de dépassement de seuil, distribution
- ✓ **Modèle** : sous Unix ou Windows, Mécanisme de wrapping simplifié, gradients évalués par le code ou par différences finies,

➤ Etape B : Quantification des sources d'incertitudes

Estimation à partir de données :



Construction de lois jointes nD :

- Lois usuelles 1D ou nD
- Composition Marginales + copule :
$$F(x_1, \dots, x_n) = C(F_1(x_1), \dots, F_n(x_n))$$
- Combinaison linéaire de pdf

Open TURNS : contenu scientifique

➤ Etape C : Propagation des incertitudes

- ✓ **min / max criterion** : plans d'expériences (factoriel, composite, étoilé) + échantillonnage
- ✓ **dispersion centrale** : décomposition de la variance par Taylor, échantillonnage
- ✓ **probabilité de dépassement de seuil** : méthodes de simulation + FORM/SORM généralisées aux copules elliptiques

➤ Etape C' : Hiérarchisation des incertitudes

- ✓ **dispersion centrale** : facteurs d'importance de Taylor, coefficients de corrélation (Pearson, Spearman, SRC, SRRC, PCC, PRCC)
- ✓ **probabilité de dépassement de seuil** : facteurs d'importance et de sensibilité

+ Méthodes de surface de réponse

- ✓ **déterministes** : polynômes locaux (Taylor) ou globaux (techniques de régression)
- ✓ **modèles probabilistes** : polynômes de chaos classiques et creux, krigeage (en cours d'amélioration)

❖ Open TURNS = réceptacle de développements récents ou innovants

- ✓ **algorithmes de génération de lois non uniformes les plus récents et les plus performants**
 - loi normale : méthode Ziggurat (2005) pour la loi normale,
 - algorithme de rejet séquentiel (1993) pour la loi binomiale,
 - méthode de Tsang et Marsaglia (2000) pour la loi gamma,
- ✓ **algorithmes de calcul de fonctions de répartition les plus récents**
 - algorithme de Marsaglia pour la statistique exacte de Kolmogorov (2003),
 - algorithme de Benton et Krishnamoorthy pour les lois de Student non centrée et de Chi2 non centrée (2003).
- ✓ **résultats de travaux de thèses :**
 - Polynômes de chaos creux : G. Blatman (EDF/R&D/MMC) en cours
 - Algorithme de simulation accéléré pour l'évaluation de probabilités faibles: M. Munoz (EDF/R&D/MRI) : prochainement

Open TURNS : logiciel, doc et Utilisateurs

Open TURNS, c'est

- ✓ Une **bibliothèque C++** fournissant des services de calculs d'incertitudes
- ✓ Une **application autonome** avec une IHM graphique
- ✓ Un **module python** proposant des opérateurs de haut niveau

Mais aussi une **documentation** :

- ✓ **scientifique** : Reference Guide,
- ✓ **Utilisateur** : Use Cases Guide, User Manual, Examples Guide
- ✓ **technique** : Architecture Guide, Wrapper Guide, Contribution Guide, Windows port doc.

... et une **communauté sympathique** :

- ✓ **Openturns.org** : site officiel de l'outil,
- ✓ **share.openturns.org** : site d'échanges autour de l'outil

Journée Utilisateurs Open TURNS #8 : le 12 juin 2015 à Chatou



... vous y êtes les bienvenus!

Sommaire

- ▶ Cadre générique du traitement des incertitudes

- ▶ OpenTURNS, logiciel dédié aux incertitudes

- ▶ Quelques applications industrielles
 - Simulation physico-chimique des circuits de refroidissement avec aérorefrigérant
 - Visualisation de transitoires thermo-hydrauliques : detection d'outliers
 - Analyse de sensibilité en simulation numérique du soudage

Sommaire

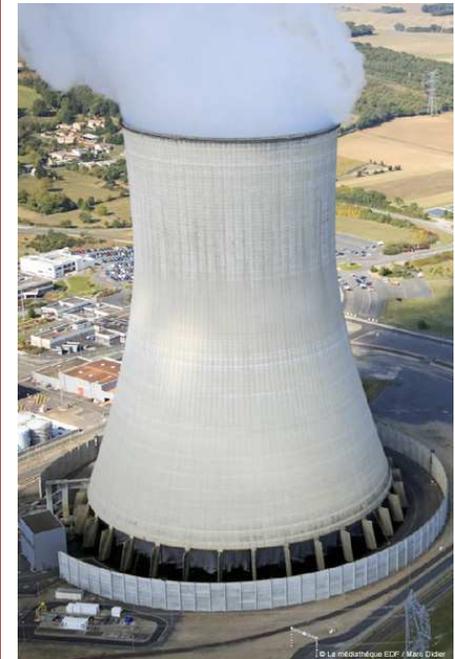
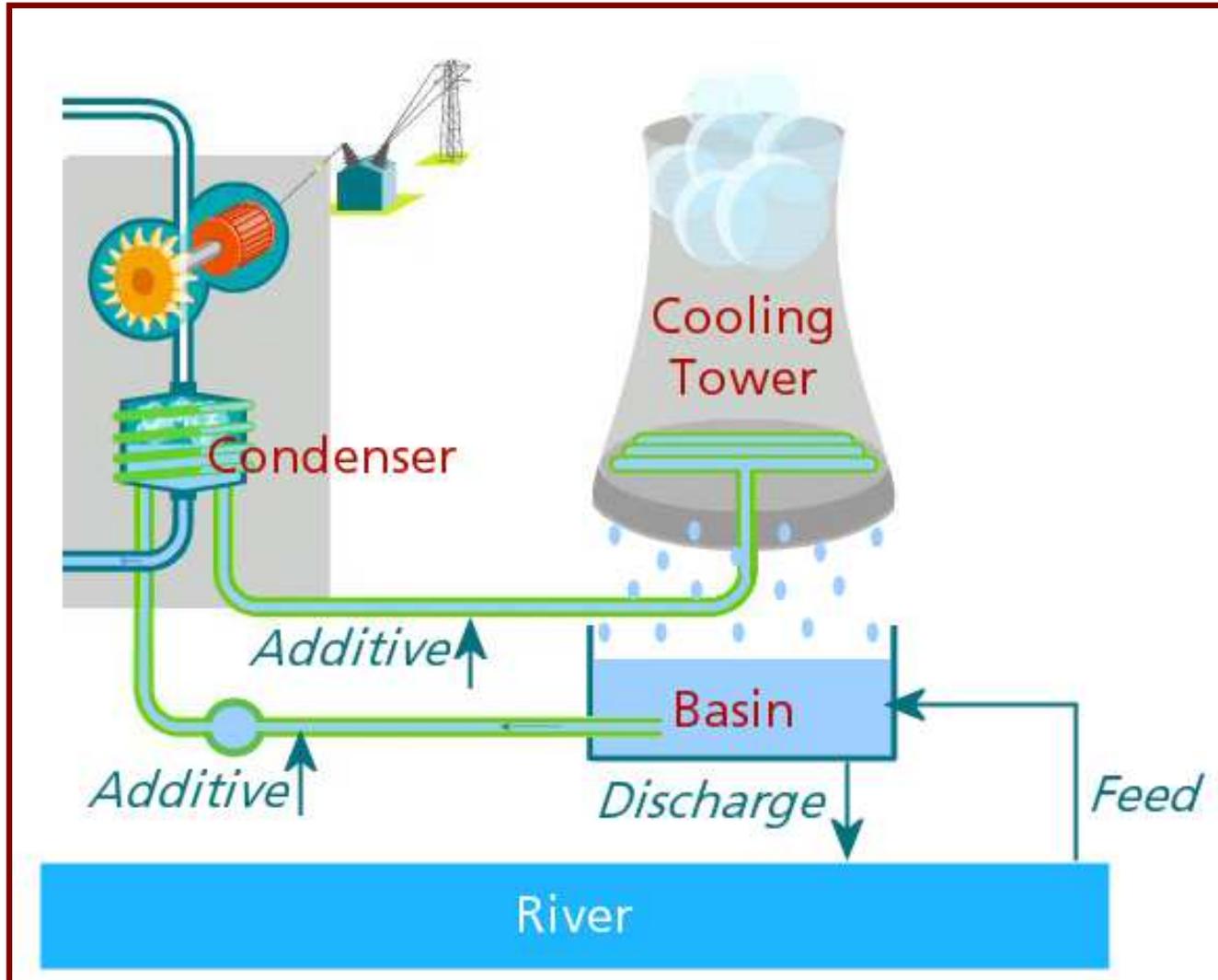
- ▶ Cadre générique du traitement des incertitudes

- ▶ OpenTURNS, logiciel dédié aux incertitudes

- ▶ Quelques applications industrielles
 - Simulation physico-chimique des circuits de refroidissement avec aérorefrigérant [Baudin, Pasanisi]
 - Visualisation de transitoires thermo-hydrauliques : detection d'outliers
 - Analyse de sensibilité en simulation numérique du soudage

Circuit de refroidissement

- Qu'est-ce qu'un circuit de refroidissement ?



Aéroréfrigérant du
CNPE de Civaux
(Vienne)

-
- **Le circuit de refroidissement d'un CNPE est directement ouvert à l'environnement : il est soumis aux variations de qualité de l'eau et à de plus en plus de contraintes de régulation.**
 - **Le circuit de refroidissement peut souffrir d'entartrage et d'encrassement, ce qui peut réduire son efficacité et peut finalement conduire à l'arrêt de la tranche si il est non contrôlé.**
 - **Pour optimiser les coûts, améliorer la sûreté, respecter l'environnement et accroître les performances, EDF a développé un outil d'ingénierie pour simuler les circuits de refroidissement. L'approche est fondée sur un modèle théorique.**



Le simulateur

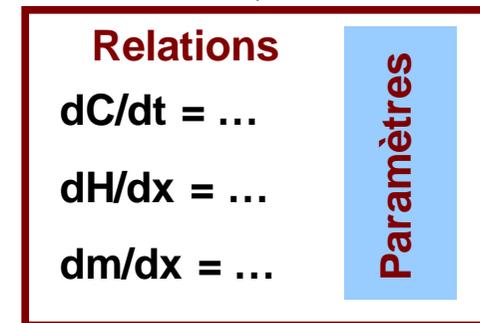
Modélisation du circuit

- Le système est entièrement représenté par :
 - Entrées : qualité de l'eau, température de l'air, additifs...
 - Paramètres : géométrie, facteurs de calage...
 - Relations : conservation de la masse et de l'énergie, cinétique, stripping des espèces volatiles, couplage avec des codes externes...
Equations aux dérivées partielles 1D.
 - Sorties : composition de l'eau, taux d'encrassement, chimie du circuit...

Objectifs

- Incertitudes sur les mesures, qui sont des entrées du modèle
- Quel impact sur les sorties ? Tendances centrale + analyse de sensibilité

Entrées



Sorties

Modèle retenu

■ Entrées aléatoires : 6

Variable	Modélisation Probabiliste	Moyenne	Ecart-Type
Débit prélevé d'appoint, circuit fermé avec aéro (m ³ /s)	$N(\mu, 0.05\mu)$	13.5e-6	0.67e-6
Débit évaporé, circuit fermé (m ³ /s)	$N(\mu, 0.025\mu)$	5.20e-6	0.13e-6
TAC eau appoint (°F)	$N(\mu, 0.025\mu)$	16.8	0.42
THCa eau appoint (°F)	$N(\mu, 0.025\mu)$	17.3	0.43
Température eau appoint (°C)	$N(\mu, 0.1)$	23.3	0.1
pH eau appoint	$N(\mu, 0.05)$	8.23	0.05

Modèle retenu

■ Sorties aléatoires : condenseur

Variable
TAC
TA
THCa
pH
Lambda

Traitement des incertitudes :

- Tendance centrale : moyenne +/- écart-type
- Analyse de sensibilité (hiérarchisation des entrées)

Cas-test :

- Spectre (maquette)
- Cas stationnaire

Résultats – Vue d'ensemble

- 1 000 simulations Monte-Carlo
- 22 heures de calcul (79s/calcul)
- 946 simulations réussies, 54 simulations échouées

- Un appel au code coûte environ 45 secondes

- Intervalle de confiance à 99.7% pour la moyenne : $\left[\bar{x} - 3 \frac{s}{\sqrt{n}}, \bar{x} + 3 \frac{s}{\sqrt{n}} \right]$

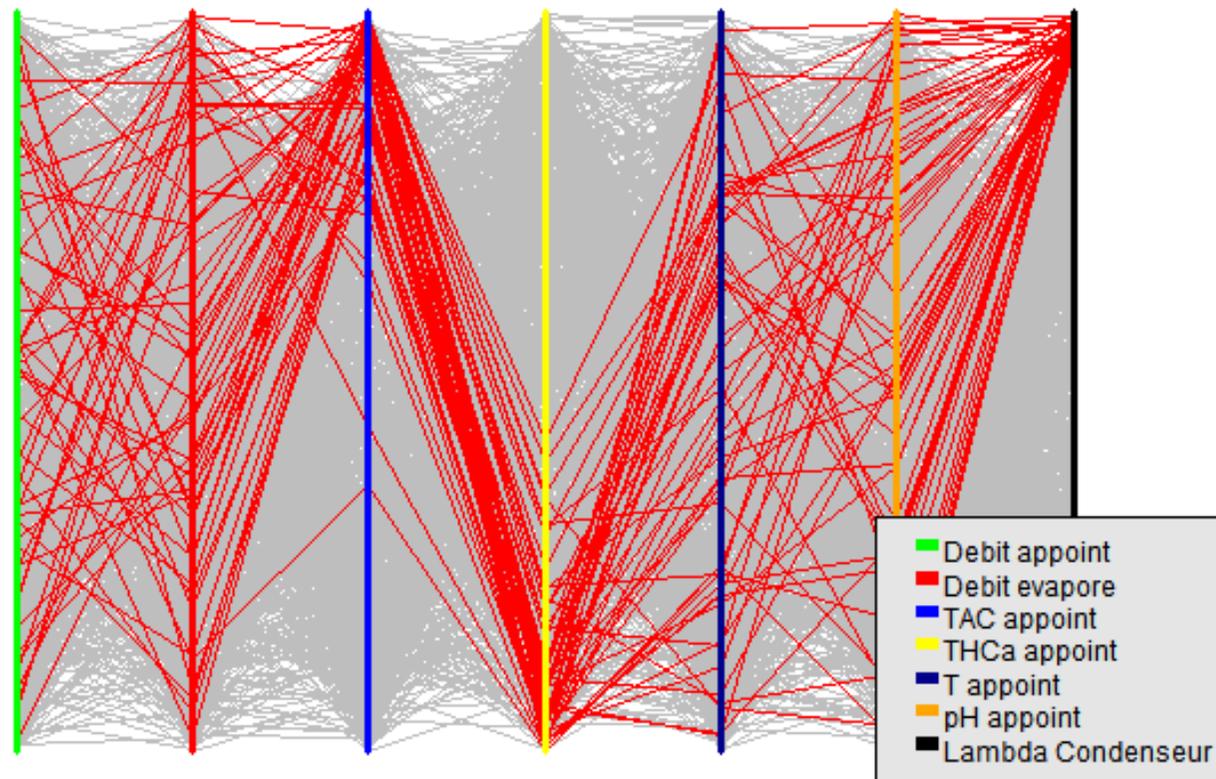
- Le coefficient de variation est: $cv = \frac{s}{\bar{x}} \frac{1}{\sqrt{n}}$

n	1/sqrt(n)	Temps
10	0.31	7 (min)
100	0.1	1.2 (h)
1 000	0.031	12.5 (h)
10 000	0.01	5 (j)
100 000	0.0031	52 (j)

Résultats – Calculs « plantés »

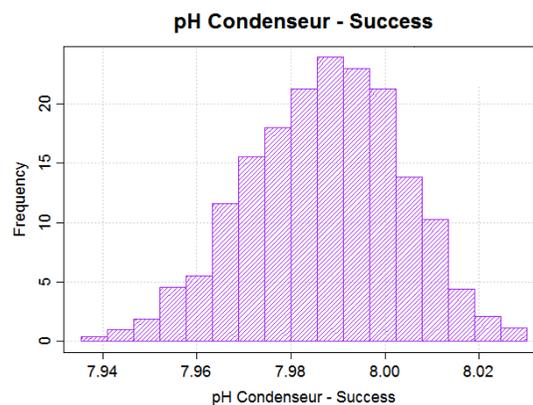
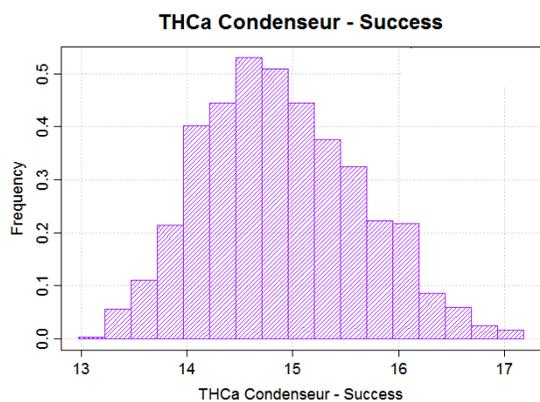
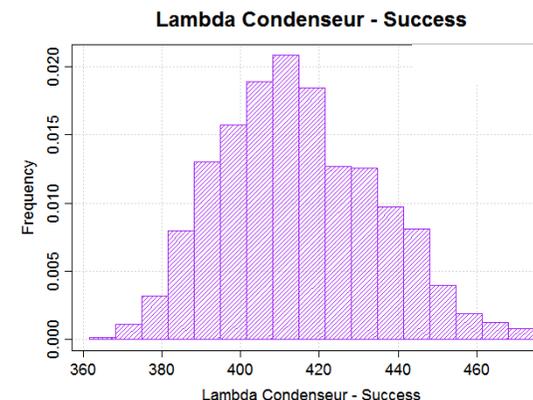
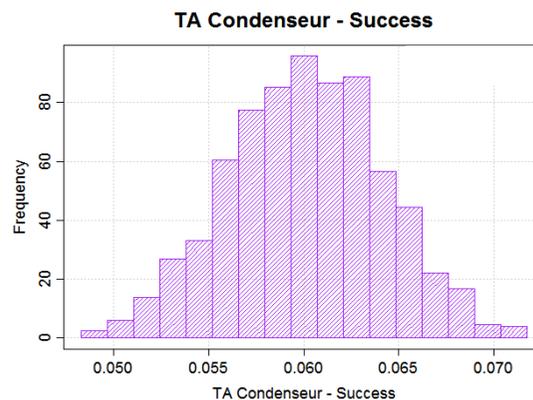
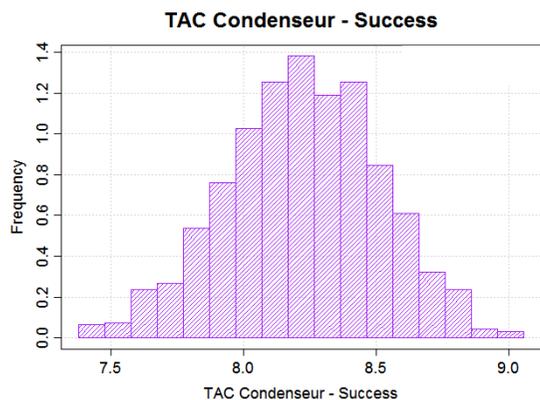
Cobweb plot associé à l'ensemble des 1000 simulations. Les traits rouges correspondent à des Lambda condenseurs plus grands que 1 000.

Lambda Cond. vs X



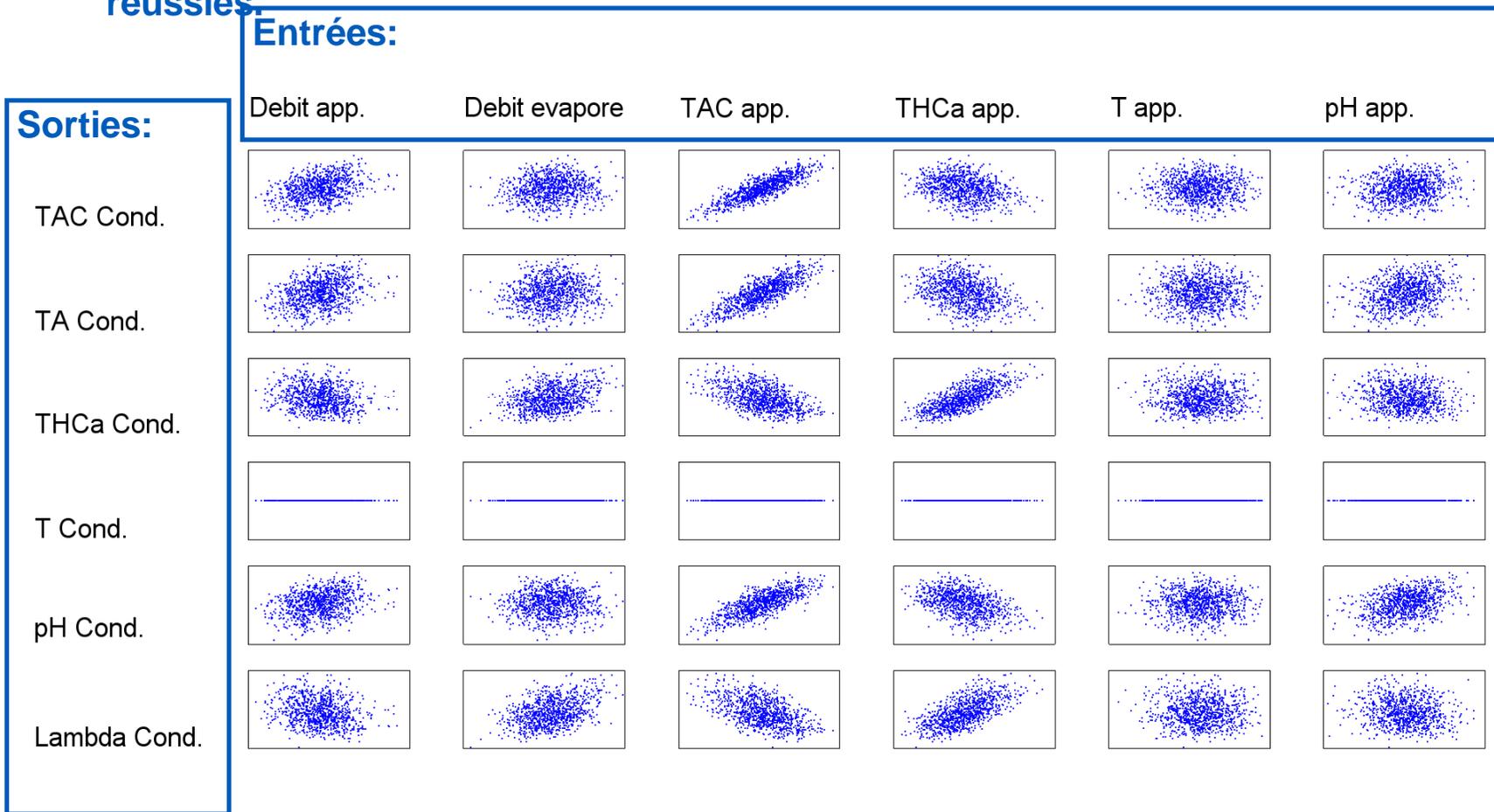
Résultats – Histogrammes des sorties

Histogrammes des sorties pour les 946 simulations réussies



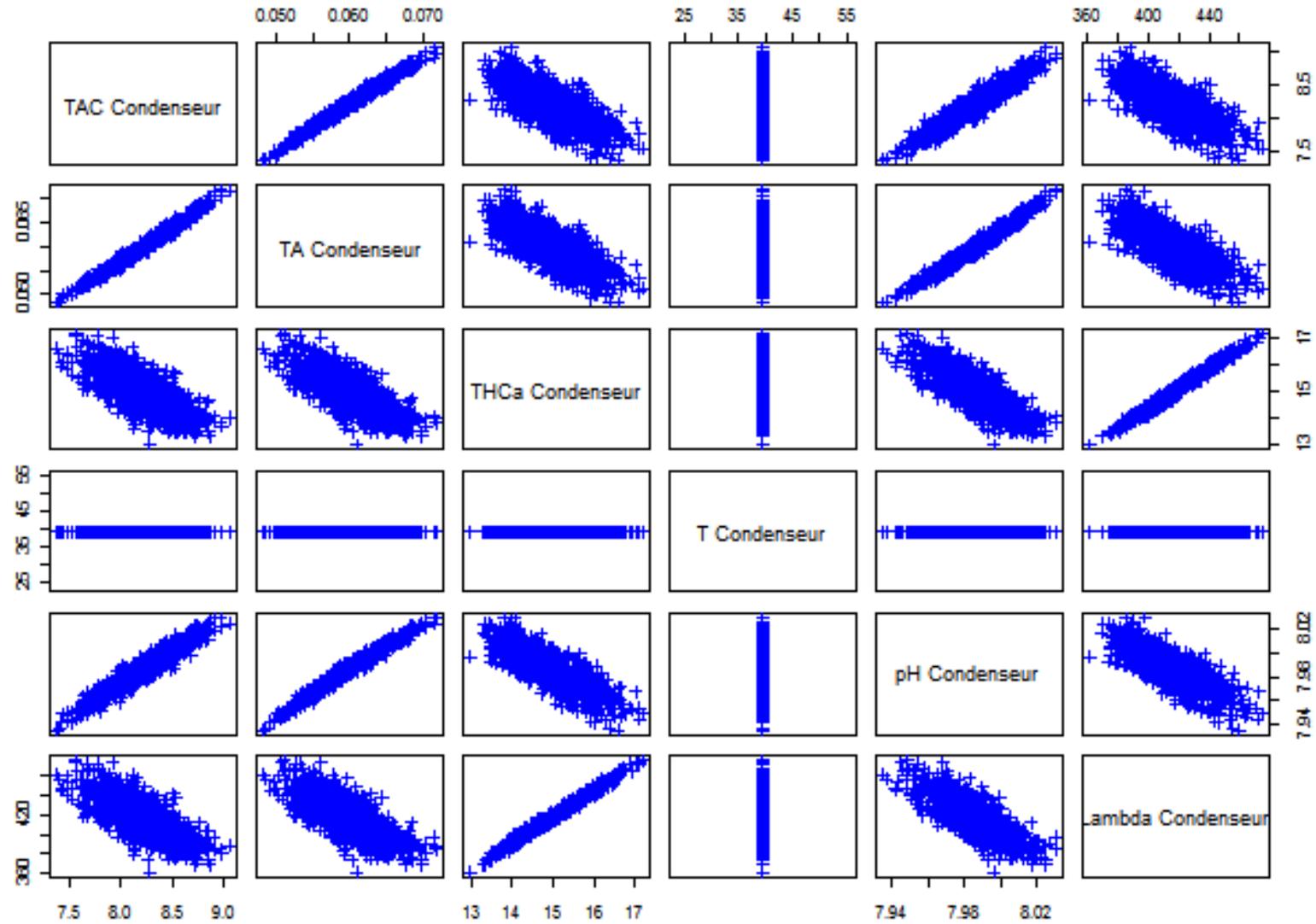
Résultats – Dépendance entre les sorties et les entrées

Nuages de points « sorties vs entrées » du modèle pour les 946 simulations réussies.



Résultats – Dépendances entre les sorties

Matrice de nuages de points des sorties pour les 946 simulations réussies.



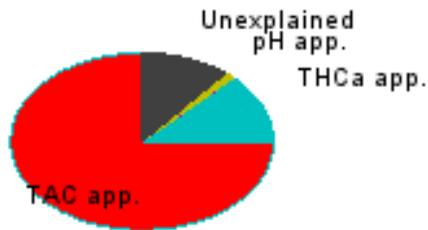
Résultats – Hiérarchisation des paramètres

- Part expliquée par le modèle linéaire: entre 82% et 95%.
- Variables d'entrée les plus influentes sur la variabilité de la sortie:
 1. TAC appoint
 2. THCa appoint
 3. pH appoint

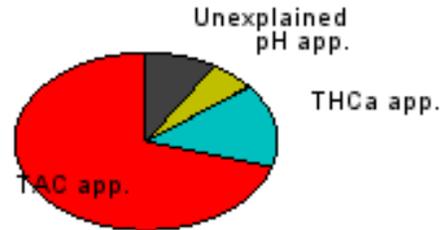
Résultats – Hiérarchisation des entrées

Graphiques camembert des indices SRC (sur 946 simulations réussies).

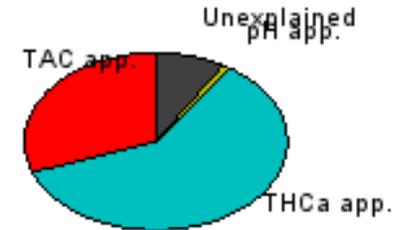
SRC indices for TAC Cond.



SRC indices for TA Cond.



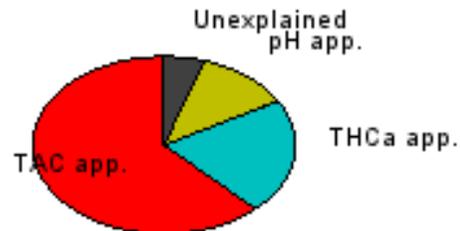
SRC indices for THCa Cond.



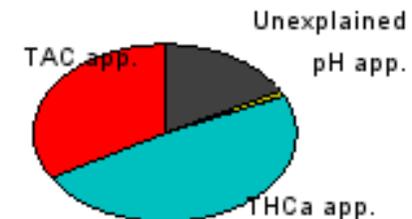
SRC indices for T Cond.



SRC indices for pH Cond.

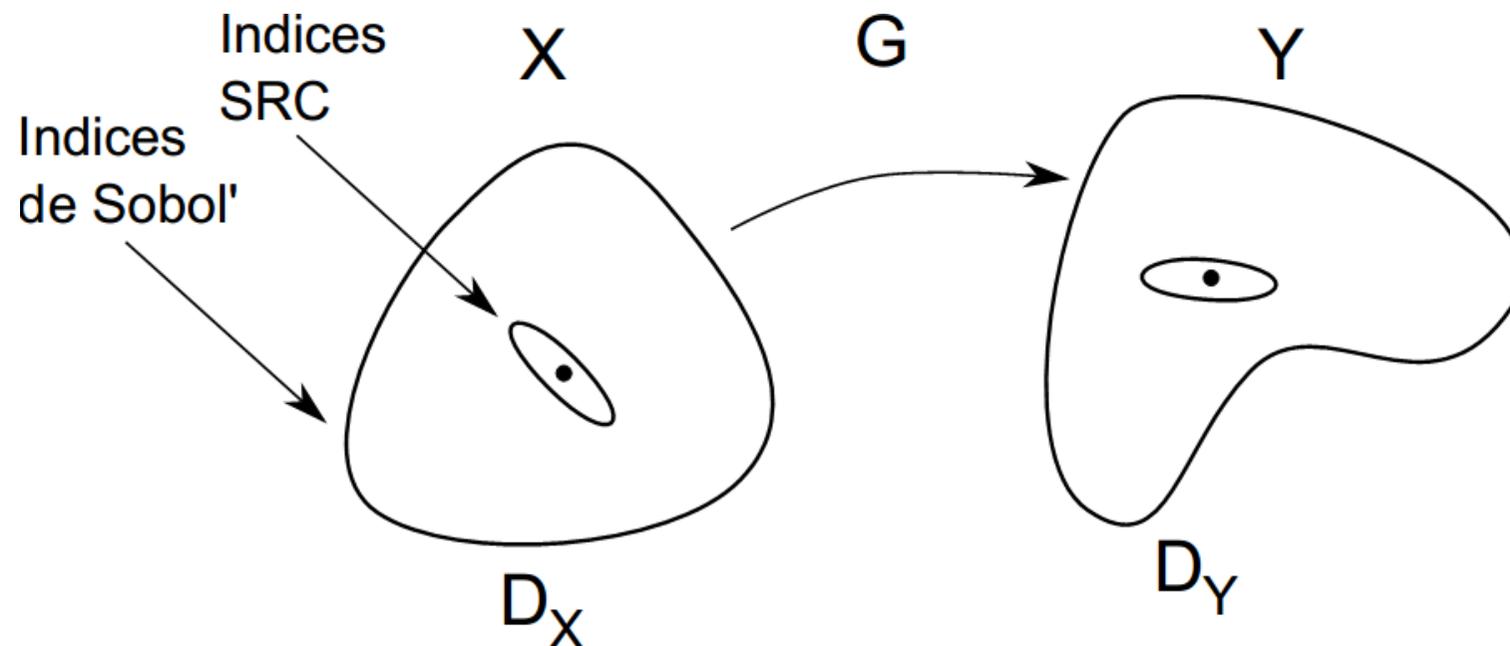


SRC indices for Lambda Cond.



Résultats – Rappel sur les indices SRC

- Indices SRC appropriés quand modèle de régression est justifié : plus approprié quand l'espace des paramètres est local (développement de Taylor d'ordre 1 plus précis)
- Sinon, on devrait utiliser les indices de Sobol'.



Sommaire

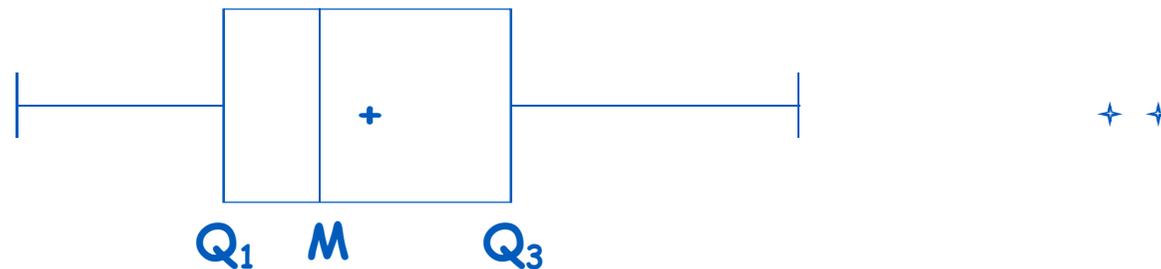
- ▶ Cadre générique du traitement des incertitudes

- ▶ OpenTURNS, logiciel dédié aux incertitudes

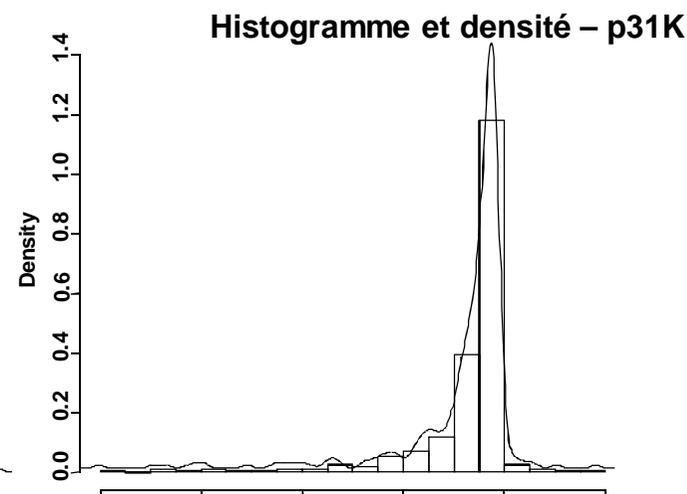
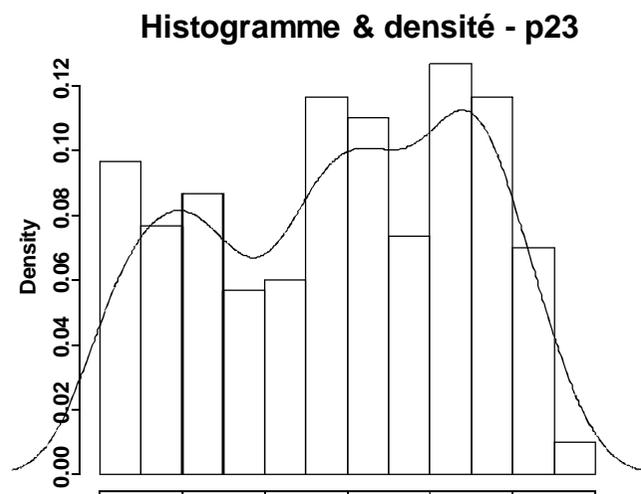
- ▶ Quelques applications industrielles
 - Simulation physico-chimique des circuits de refroidissement avec aérorefrigérant [Baudin, Pasanisi]
 - Visualisation de transitoires thermo-hydrauliques : detection d'outliers [Popelin, looss]
 - Analyse de sensibilité en simulation numérique du soudage

Représentation classique de la dispersion d'une variable

- ▶ **Variance - Écart-type**
- ▶ **Étendue** (intervalle de variation) |max - min|
- ▶ Quantiles à x%
- ▶ Diagramme en boîte - **Boîte-à-moustaches** (« box plot » de Tukey)

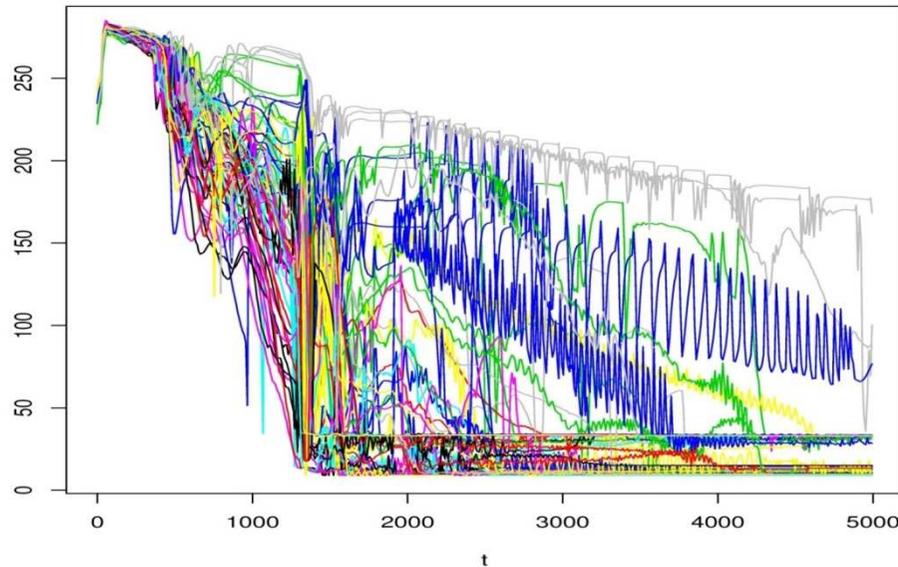


- ▶ Histogramme - Densité lissée

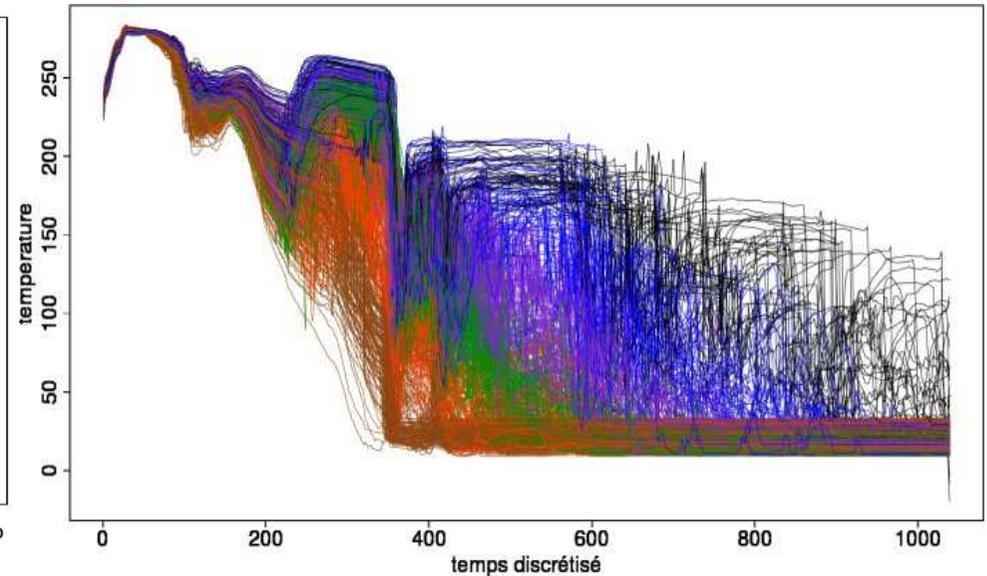


Quand les données sont à support temporel

Exemples : Simulations thermohydrauliques avec CATHARE



64 courbes



600 courbes

Visualisation de toutes les courbes

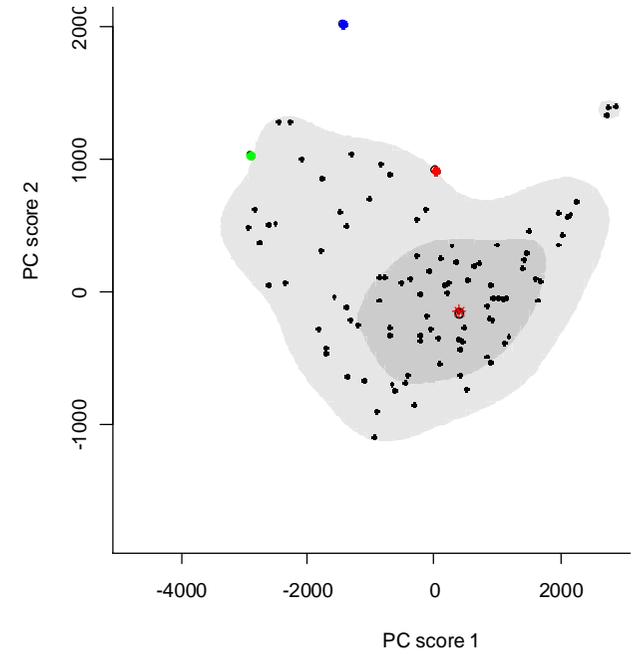
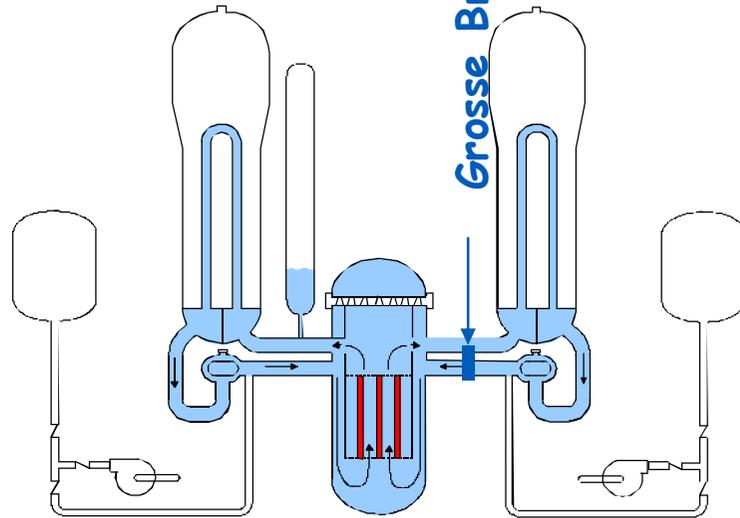
Constat : en dessous de 100 courbes => OK ; au dessus => ça coince

Représentation de l'incertitude associée à une fonction ?

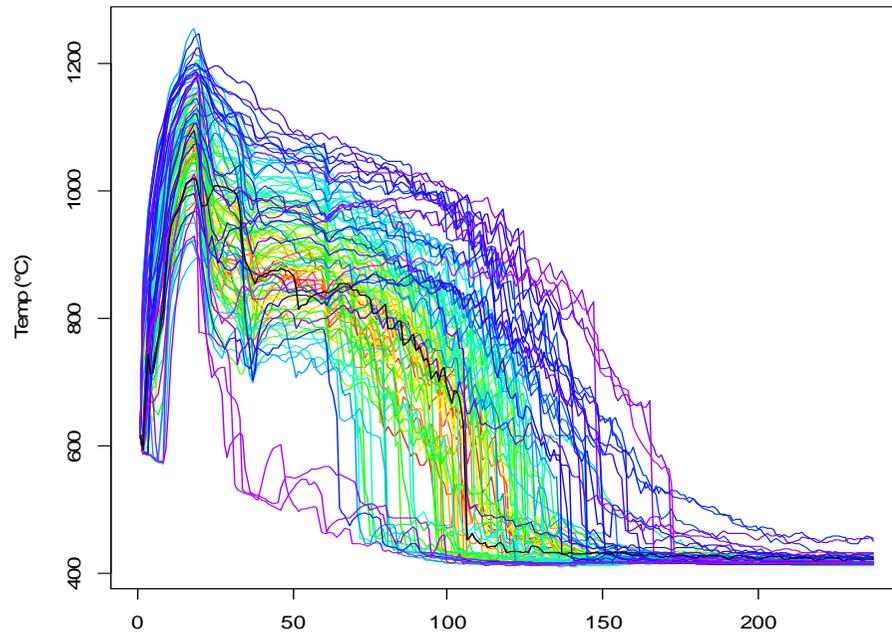
Tracer un écart-type ou une densité à chaque point de discrétisation => non physique

Visualisation par boxplot fonctionnel

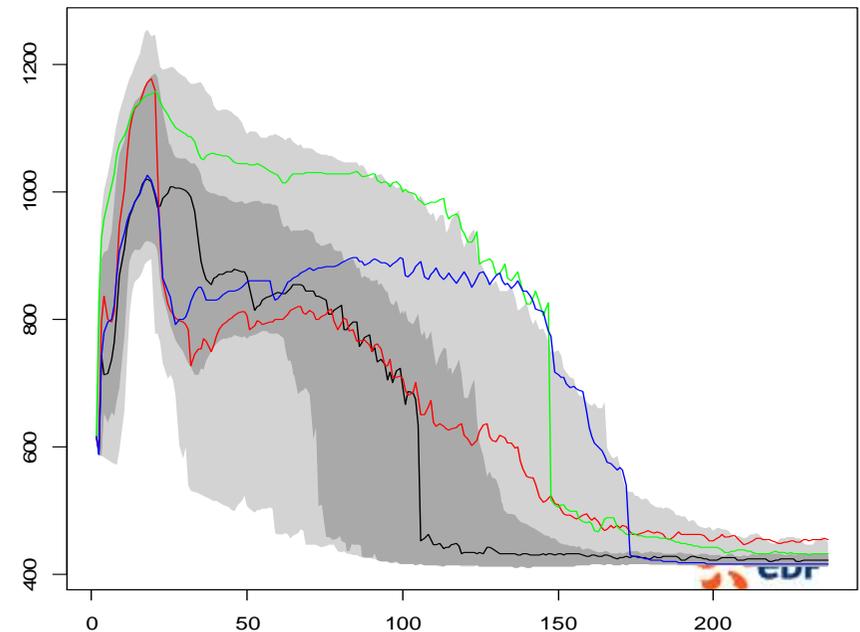
Simulation d'UN APRP



100 calculs Monte Carlo (53 entrées)



Détection de transitoires « outliers »



Sommaire

▶ Cadre générique du traitement des incertitudes

▶ OpenTURNS, logiciel dédié aux incertitudes

▶ Quelques applications industrielles

- Simulation physico-chimique des circuits de refroidissement avec aérorefrigérant

[Baudin, Pasanisi]

- Visualisation de transitoires thermo-hydrauliques : detection d'outliers

[Popelin, looss]

- Analyse de sensibilité en simulation numérique du soudage

[Le Gratiot, Popelin]

Contexte et objectifs

- ▶ La durée de vie des composants soudés est un enjeu majeur pour beaucoup de structures industrielles
- ▶ L'évaluation des contraintes résiduelles à l'issue d'une opération de soudage est une problématique centrale dans l'estimation de la durée de vie des composants soudés
- ▶ La simulation numérique du soudage est une modélisation complexe, qui requiert notamment la caractérisation des propriétés matériaux à différentes températures (ambiante à fusion).

Objectifs

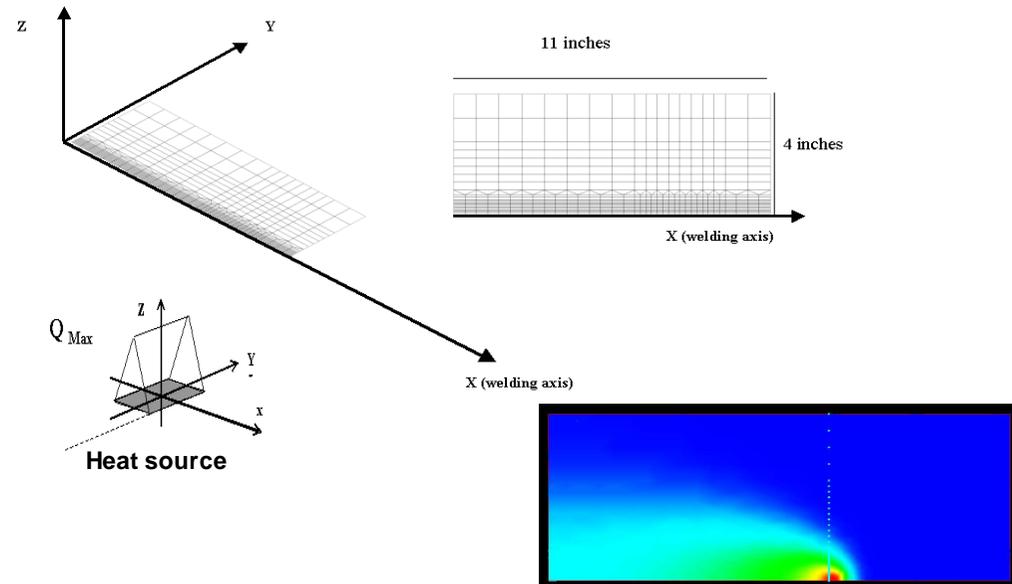
- ▶ Traitement d'incertitudes en simulation numérique en simulation numérique du soudage : comment les incertitudes sur les variables d'entrée affectent l'estimation des contraintes résiduelles?
- ▶ Modélisation des sources d'incertitudes : comment prendre en compte la dépendance des propriétés matériau vis-à-vis de la température?
- ▶ Analyse de sensibilité : quelle(s) source(s) d'incertitudes est la plus influente sur la variabilité des contraintes résiduelles?
- ▶ Visualisation : quel outil synthétise pertinemment l'information finale pour une discussion efficace entre physiciens et statisticiens ?

Simulation Numérique d'une plaque d'acier 316L

▶ Plaque d'acier inoxydable 316L chanfreinée + 2 passes de soudure TIG

▶ Modèle EF (Code_Aster)

- 2D
- Contraintes planes
- Axisymétrie : $\frac{1}{2}$ plaque
- Source thermique équivalente : prismatique (flux imposé)



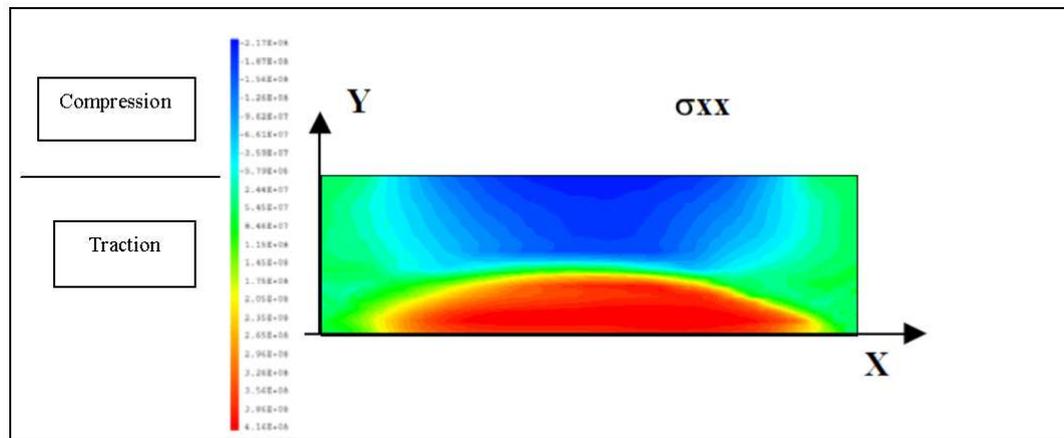
▶ Variables d'entrée

- Source thermique équivalente (flux imposé Q_{Max})
- Propriétés matériaux (conductivité thermique, module d'Young, coefficient de dilatation thermique, limite élastique, loi d'écroutissage)

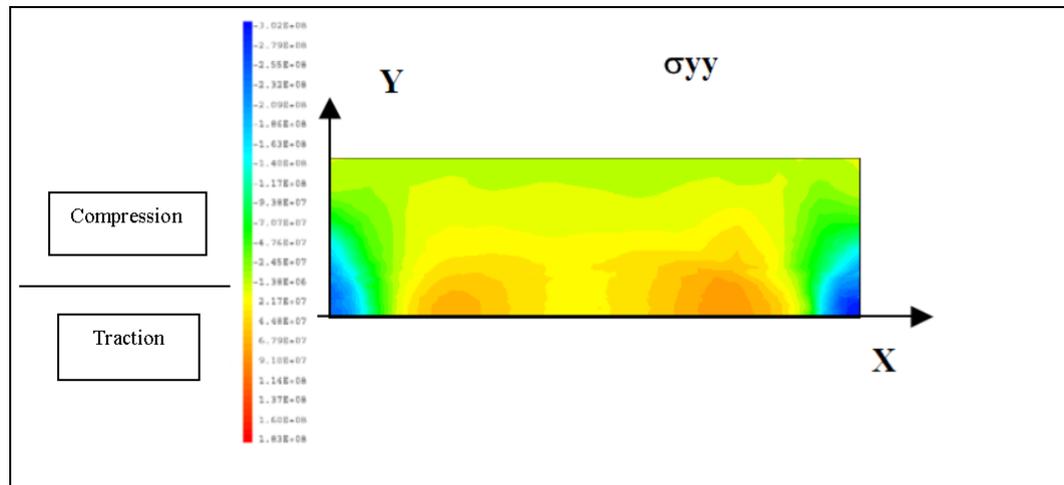
▶ Variable d'intérêt:

- Contraintes résiduelles : longitudinales (σ_{xx}) et transverses (σ_{yy})

Simulation Numérique d'une plaque d'acier 316L



Phénomènes locaux :
traction / compression



Quantification d'incertitudes

- ◆ 8 variables aléatoires indépendantes

- ◆ Source de chaleur (flux)
 - Q_{Max} : Loi uniforme +/- 3 % de la valeur nominale

- ◆ Propriétés matériau (dépendent de la température)
 - Propriétés thermiques : conductivité thermique, coefficient de dilatation thermique
Loi uniforme +/- 10 %

 - Propriétés mécaniques : Module d'Young, limite élastique, paramètres de la loi d'écroutissage
Loi uniforme +/- 10 %

Quantification d'incertitudes

- ◆ 8 variables aléatoires indépendantes
- ◆ Source de chaleur (flux)
 - Q_{Max} : Loi uniforme +/- 3 % de la valeur nominale
- ◆ Propriétés matériau (dépendent de la température)
 - Propriétés thermiques : conductivité thermique, coefficient de dilatation thermique
Loi uniforme +/- 10 % à 20°C
 - Propriétés mécaniques : Module d'Young, limite élastique, paramètres de la loi d'écroutissage
Loi uniforme +/- 10 % à 20°C

Monte-Carlo : ~900 runs

Environ 5j. de calcul



Open
TURNS

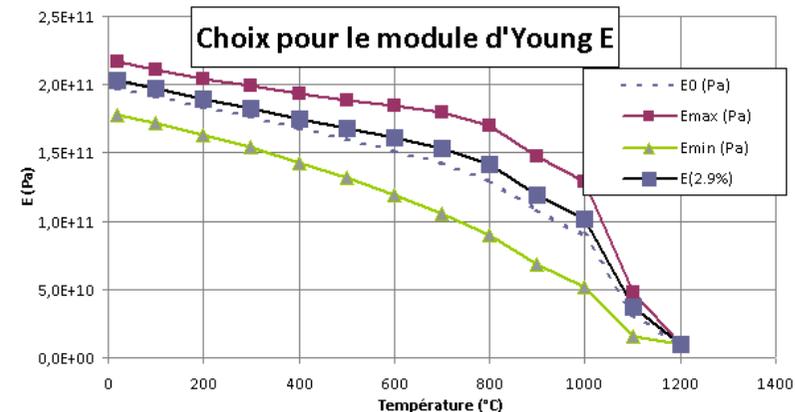
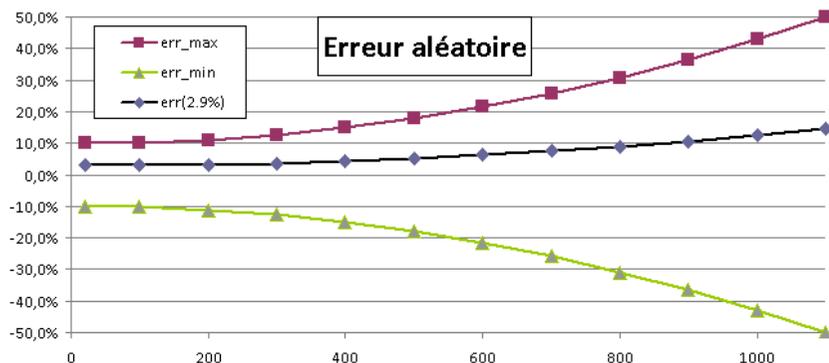
Modélisation des données d'entrée

Modéliser l'incertitude sur les variables d'entrée (propriété matériau):

- l'incertitude à température ambiante est plus faible que celle qui affecte les données à température proche de T° fusion
- les propriétés matériau sont chacune monotone en fonction de la température : les tirages de valeurs ne peuvent être indépendants

Plusieurs choix méthodologiques possibles :

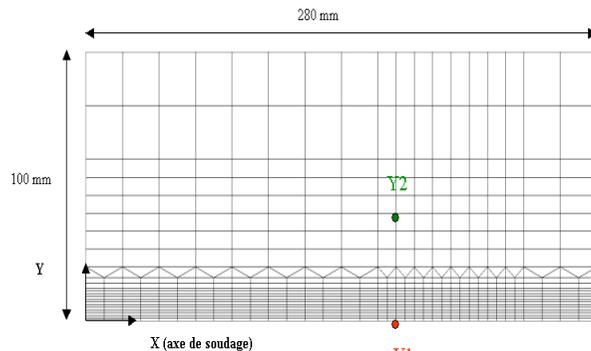
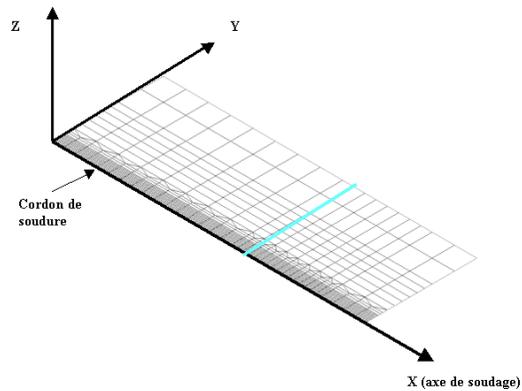
- Utiliser une modélisation probabiliste de la dépendance, basée sur la *théorie des copules*, en tenant compte de ces contraintes d'inégalité
 - thèse en cours à EDF : cf. R. Fischer (A. Dutfoy)
- Hypercube Latin contraint (Petelet *et al.*, 2010)
- Introduire un lien fonctionnel (solution retenue pour les travaux présentés))



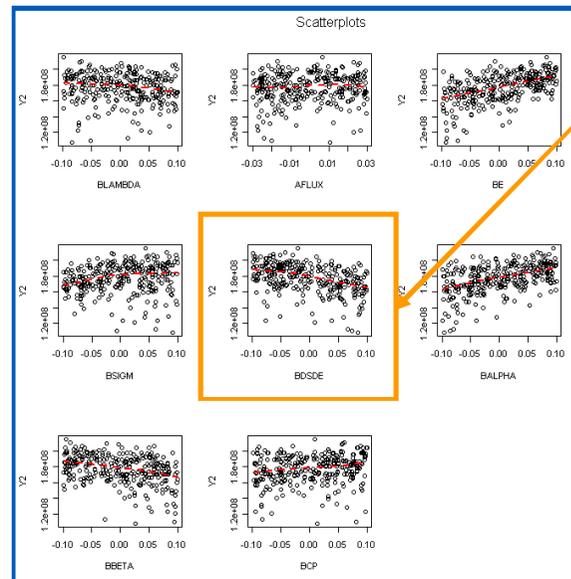
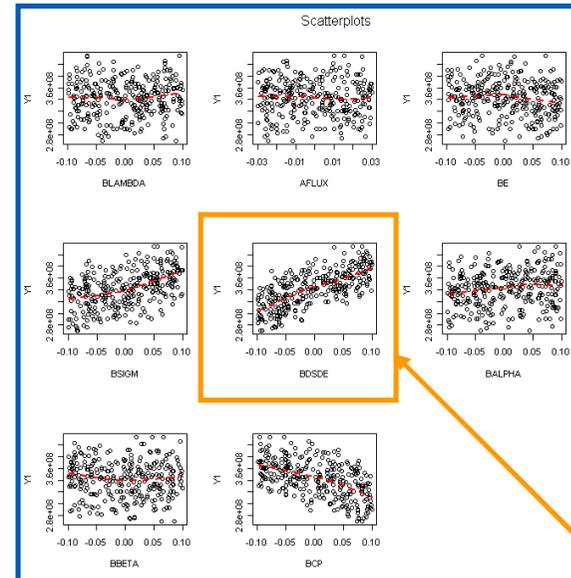
Résultats préliminaires en deux points d'observation

Points étudiés :

- o Y1: sur le cordon de soudure
- o Y2 : à 36 mm du cordon



EDF – Ecole PECNUM - Anne-Laure Popelin - 20/05/2015

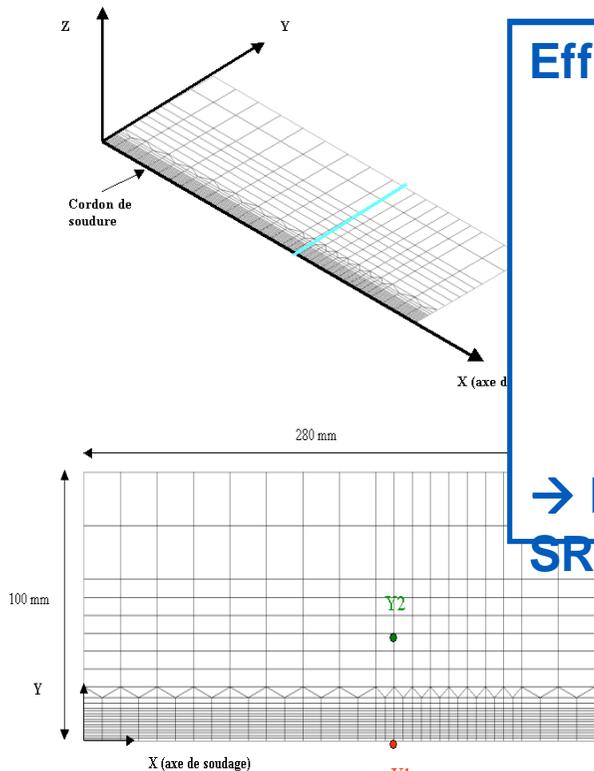


Influence de la pente d'écroutissage

Résultats préliminaires en deux points d'observation

Points étudiés :

- o Y1: sur le cordon de soudure
- o Y2 : à 36 mm du cordon



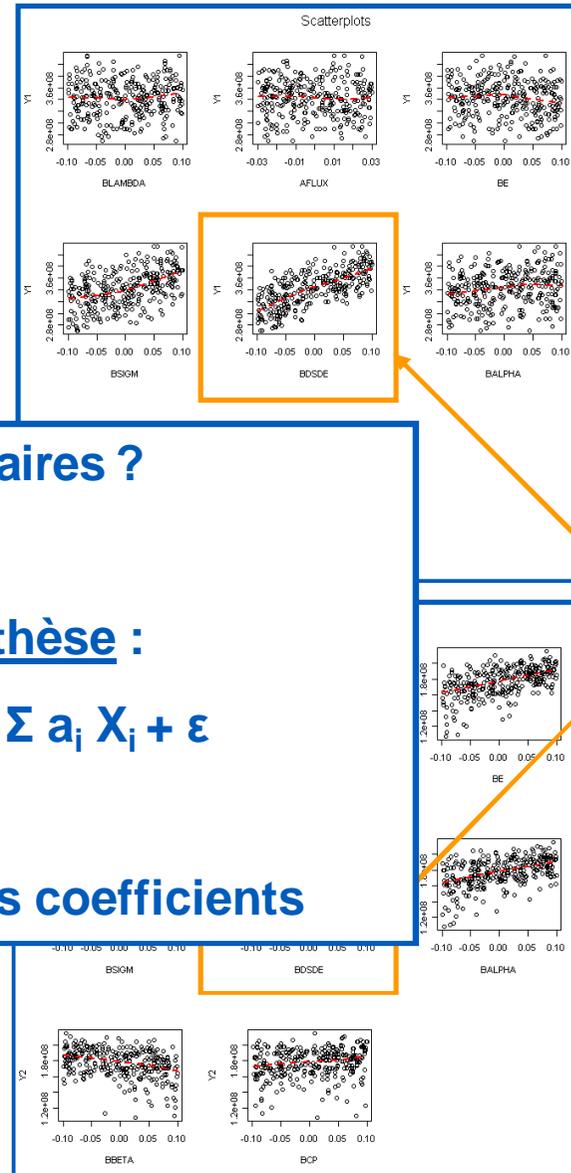
Effets quasi-linéaires ?

Hypothèse :

$$Y = a_0 + \sum a_i X_i + \varepsilon$$

→ Estimation des coefficients

SRC

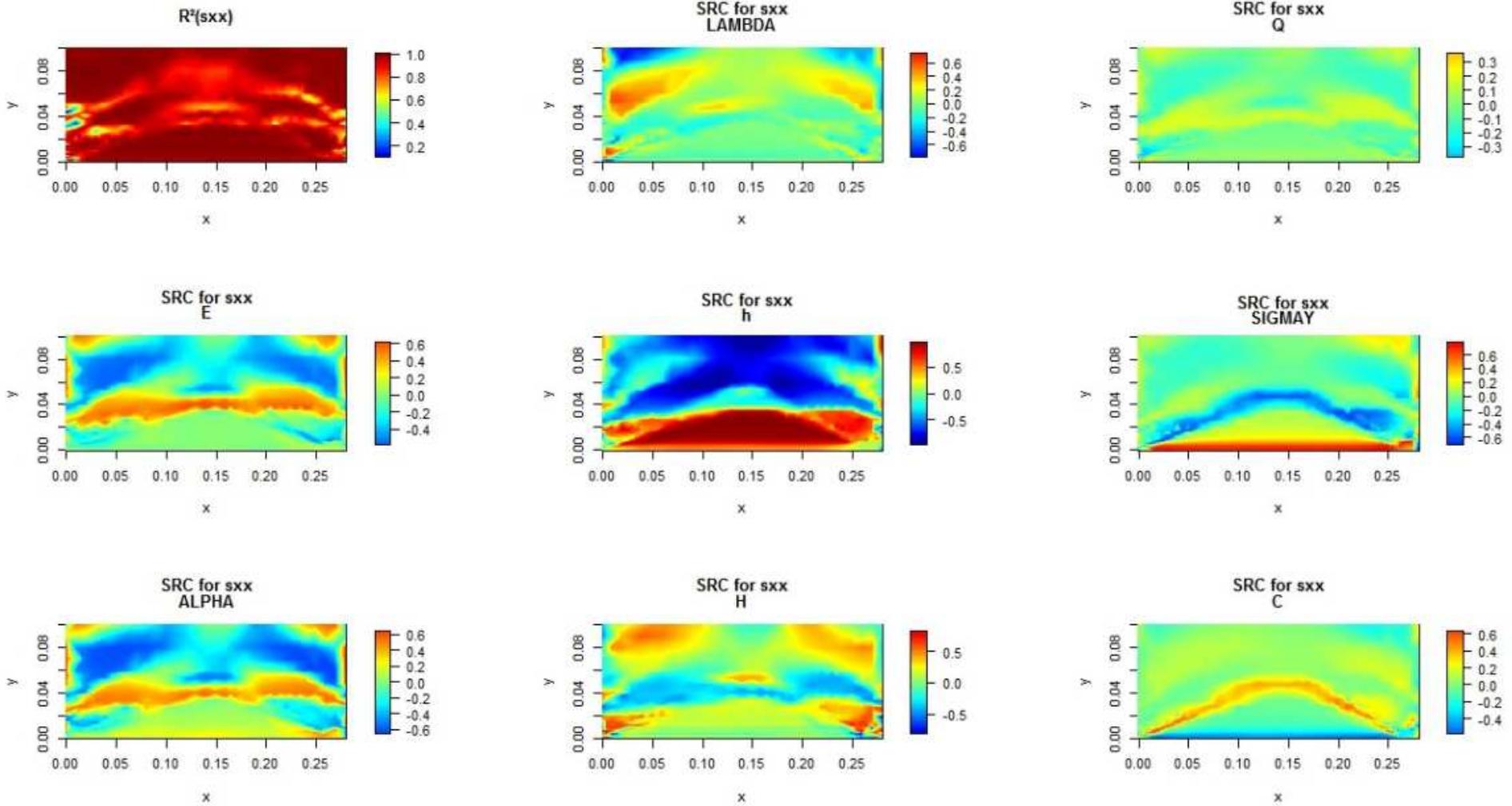


Influence de la pente d'écroutissage

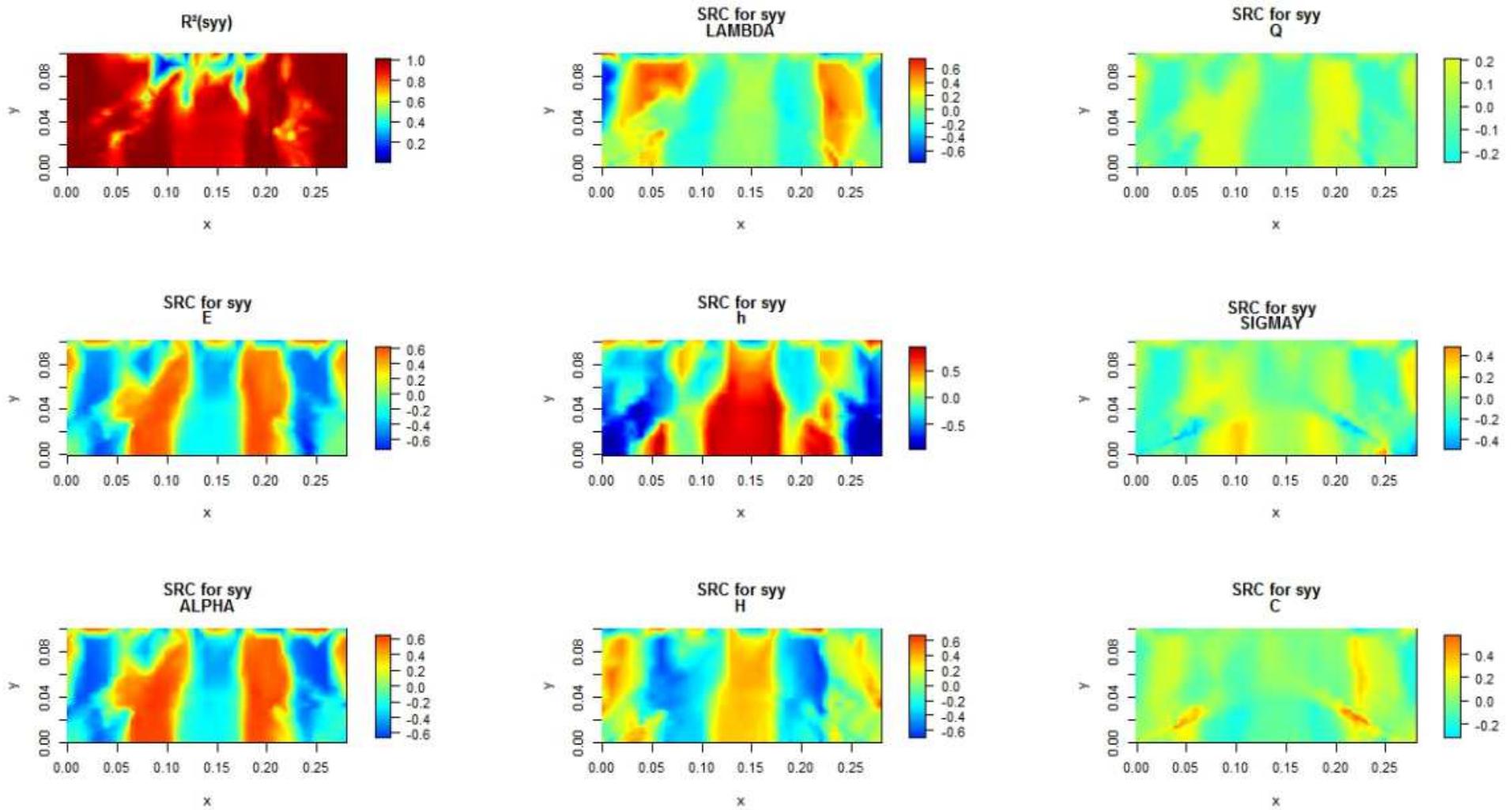
Résultats sur le cas complet

- ▶ A partir des 900 tirages ($X_1, X_2, \dots, X_8, \sigma_{xx}$), estimation des SRC en chaque point du maillage
- ▶ Calcul du R^2 pour valider l'hypothèse de quasi-linéarité
- ▶ Afin d'obtenir une carte continue d'indices, interpolation linéaire entre les points
- ▶ R : Packages Sensitivity, Akima et Fields

Cas complet : résultats pour σ_{xx}



Cas complet : résultats pour σ_{yy}



Cas complet : résultats

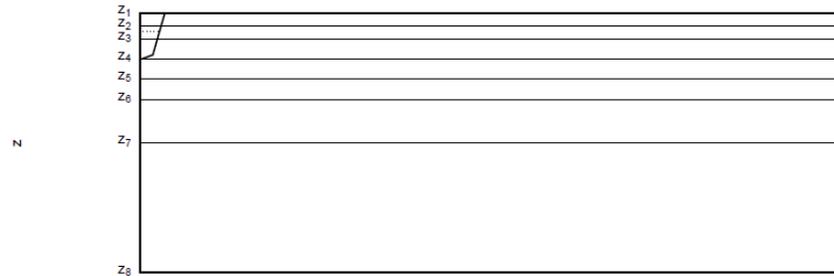
- ▶ L'ordre dépend des zones d'observation (phénomènes locaux de compression / traction)
- ▶ Le signe des indices diffère selon le type de contraintes présentes
- ▶ Seul un nombre restreint de variables est influent :
 - Pente d'écrouissage
 - Module d'Young
 - Coefficient de dilatation thermique
- ▶ Le calcul du R^2 valide l'hypothèse de quasi-linéarité

Cas 3D : nouveaux challenges

[Le Gratiet, 2014]

Coupes selon z

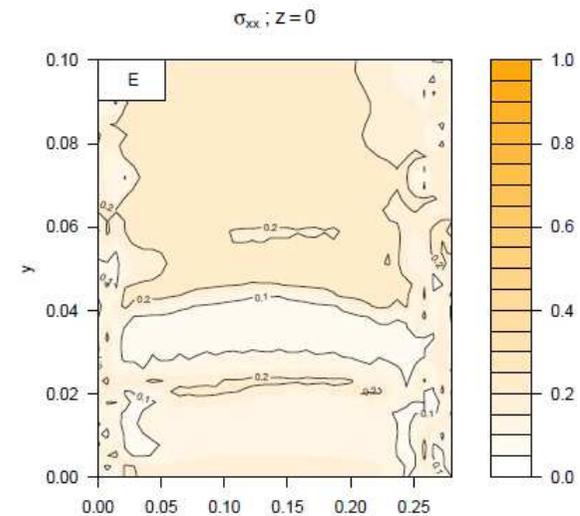
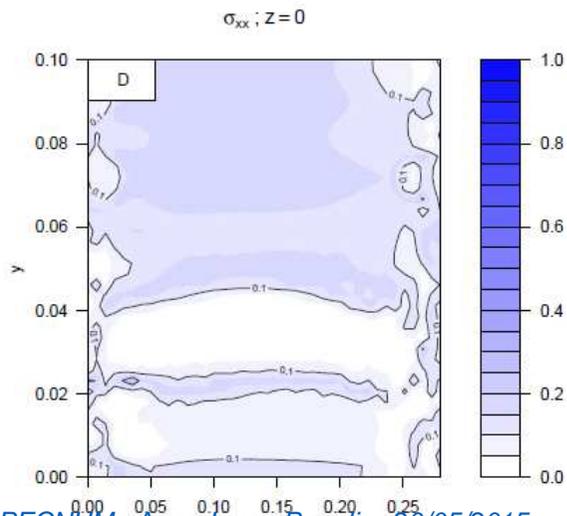
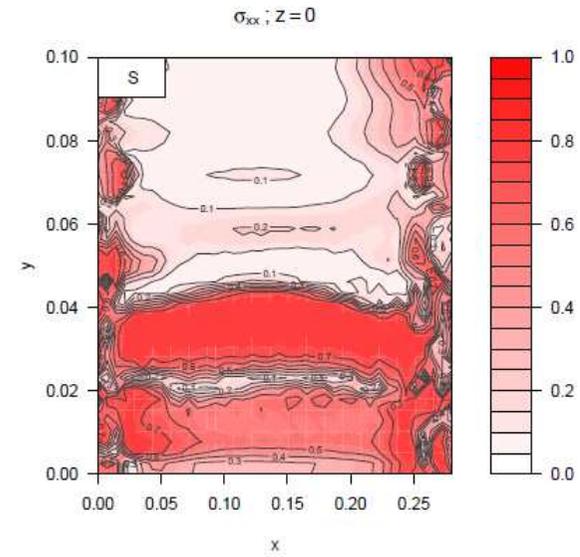
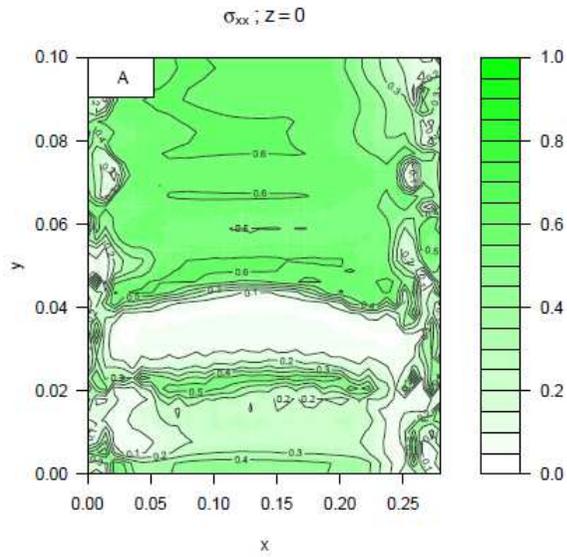
$$\begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \\ z_6 \\ z_7 \\ z_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & (m) \\ -1.5 \times 10^{-3} & (m) \\ -3.0 \times 10^{-3} & (m) \\ -5.3 \times 10^{-3} & (m) \\ -7.6 \times 10^{-3} & (m) \\ -1.0 \times 10^{-2} & (m) \\ -1.5 \times 10^{-2} & (m) \\ -3.0 \times 10^{-2} & (m) \end{pmatrix}$$



Métamodélisation par krigeage (coût de calcul trop élevé)

	z = 0	z = -1.5e-3	z = -3e-3	z = -5.3e-3	z = -7.6e-3	z = -1e-2	z = -1.5e-2	z = -3e-3
σ_{yz}	98.44 %	98.43 %	98.3 %	98.24 %	98.57 %	98.33 %	98.27 %	95.69 %
σ_{xz}	98.45 %	98.45 %	98.13 %	98.97 %	98.15 %	98.97 %	98.07 %	93.81 %
σ_{xy}	98.83 %	98.89 %	98.5 %	98.95 %	98.8 %	98.8 %	98.67 %	98 %
σ_{zz}	98.32 %	98.2 %	98.12 %	97.78 %	97.94 %	97.44 %	98.63 %	95.78 %
σ_{yy}	98.59 %	98.62 %	98.52 %	98.7 %	98.79 %	97.86 %	98.01 %	98.85 %
σ_{xx}	98.45 %	98.6 %	98.41 %	98.76 %	98.64 %	98.44 %	98.84 %	98.68 %

Analyse de sensibilité



Analyse de sensibilité

A

σ_{xz}	0.32	0.09	0.11	0.16	0.12	0.14	0.11	0.18
σ_{zy}	0.25	0.19	0.13	0.14	0.11	0.09	0.1	0.07
σ_{yy}	0.06	0.04	0.07	0.18	0.4	0.43	0.3	0.16
σ_{zz}	0.49	0.51	0.29	0.36	0.14	0.13	0.14	0.1
σ_{yy}	0.13	0.22	0.11	0.09	0.07	0.09	0.11	0.09
σ_{xx}	0.16	0.1	0.17	0.09	0.05	0.05	0.23	0.08
	$z = 0$	$z = -1.5e-3$	$z = -3e-3$	$z = -5.3e-3$	$z = -7.6e-3$	$z = -1e-2$	$z = -1.5e-2$	$z = -3e-3$

σ

σ_{yz}	0.45	0.6	0.66	0.73	0.7	0.64	0.79	0.18
σ_{zy}	0.47	0.53	0.54	0.64	0.66	0.72	0.73	0.62
σ_{yy}	0.77	0.79	0.74	0.61	0.27	0.21	0.33	0.6
σ_{zz}	0.37	0.38	0.52	0.4	0.7	0.67	0.63	0.7
σ_{yy}	0.49	0.61	0.64	0.74	0.62	0.82	0.66	0.77
σ_{xx}	0.65	0.7	0.48	0.73	0.61	0.8	0.47	0.84
	$z = 0$	$z = -1.5e-3$	$z = -3e-3$	$z = -5.3e-3$	$z = -7.6e-3$	$z = -1e-2$	$z = -1.5e-2$	$z = -3e-3$

D

σ_{xz}	0.1	0.15	0.03	0.02	0	0.01	0	0.18
σ_{zy}	0.1	0.14	0.16	0.04	0.02	0.01	-0.01	-0.01
σ_{yy}	0.08	0.04	0.03	0.03	0	0.02	0	-0.01
σ_{zz}	0.03	0.06	0.08	0.1	0.01	0.01	0.02	-0.01
σ_{yy}	0.3	0.07	0.08	0.1	0.03	0.01	0.04	0.03
σ_{xx}	0.05	0.12	0.31	0.14	0.02	0	0.01	0.02
	$z = 0$	$z = -1.5e-3$	$z = -3e-3$	$z = -5.3e-3$	$z = -7.6e-3$	$z = -1e-2$	$z = -1.5e-2$	$z = -3e-3$

E

σ_{xz}	0.07	0.11	0.14	0.16	0.13	0.18	0.13	0.18
σ_{zy}	0.11	0.14	0.15	0.16	0.16	0.14	0.13	0.1
σ_{yy}	0.1	0.07	0.09	0.13	0.22	0.32	0.34	0.17
σ_{zz}	0.05	0.08	0.09	0.1	0.12	0.17	0.19	0.11
σ_{yy}	0.07	0.14	0.14	0.13	0.11	0.08	0.19	0.13
σ_{xx}	0.12	0.08	0.02	0.05	0.05	0.08	0.29	0.1
	$z = 0$	$z = -1.5e-3$	$z = -3e-3$	$z = -5.3e-3$	$z = -7.6e-3$	$z = -1e-2$	$z = -1.5e-2$	$z = -3e-3$

Conclusions et perspectives

Verrous actuels et perspectives

► Perspectives méthodologiques

- Modélisation de la dépendance
- Métamodèles (goal-oriented, sequential experiment designs, ...)
- Courbes de risque (probability of detection, courbes de fragilité)
- Codes chaotiques (e.g. CFD) : Validation et calibration
- Visualisation « in-situ »
- Acceptabilité des approches stochastiques

► Aspects logiciels

- Lien avec des outils de visualisation de haut niveau (ParaView) (facilité dans l'environnement Salome)
- Challenges du HPC
- Interfaces graphiques pour une meilleure diffusion de nos outils et méthodes auprès des utilisateurs finaux (non spécialistes)

Merci de votre attention