

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



Exemple d'utilisation d'OpenTURNS au CEA/DAM

Analyses mécano-fiabilistes d'une enceinte de
confinement

Gilles DEFAUX
CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon

21 Juin 2016

SOMMAIRE

1. Le CEA / DAM

- Présentation
- Le traitement des incertitudes

2. Exemple : Approche mécano-fiabiliste pour la conception d'une cuve sous pression dynamique

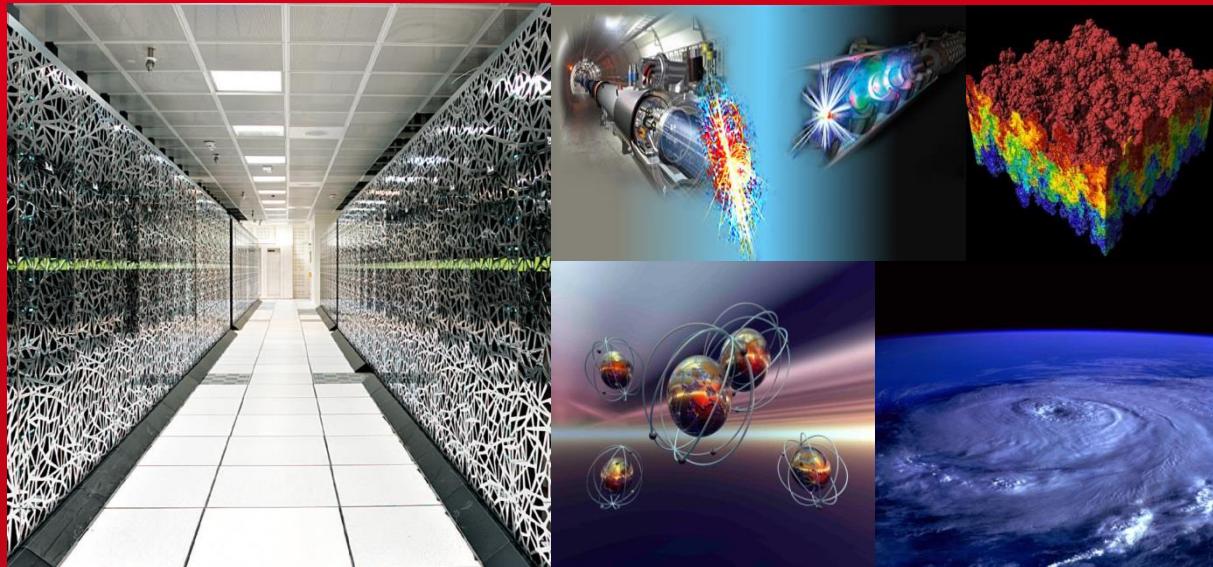
- Contexte
- Approche déterministe
- Sources d'incertitudes
- Propagation d'incertitudes
- Analyses de sensibilité
- Quantification d'événements rares

1- CEA / DAM

2 – Exemple utilisation OT

3 - Conclusion

Le CEA / DAM



DAM : POLE DEFENSE DU CEA



DAM



5 Pôles - 16 000 salariés

- Direction des sciences du vivant
- Direction des sciences de la matière
- Direction de la recherche technologique
- Direction de l'énergie nucléaire
- Direction des applications militaires

5 Directions de programmes - 4 500 salariés

- Armes nucléaires
- Propulsion nucléaire
- Matières, environnement
- Sécurité, non prolifération
- Défense conventionnelle

Programme Simulation

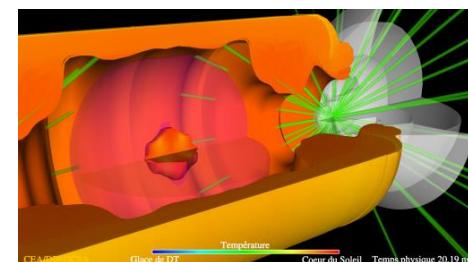
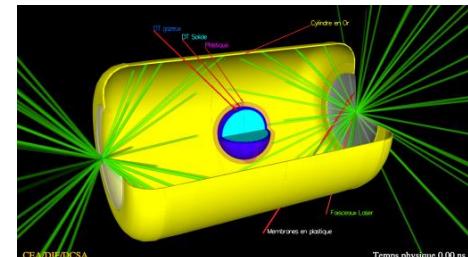
- Ultime campagne d'essais nucléaires (1996) --> Traité d'interdiction complète des essais : TICE (1998).

- La garantie de la fiabilité et de la sûreté des charges nucléaires sans nouveaux essais nucléaires s'appuie sur :

- ▶ Le standard de garantie constitué d'une chaîne de logiciels mettant en œuvre des modèles physiques prédictifs
- ▶ De puissants moyens de calcul
- ▶ Des moyens expérimentaux qui permettent de valider les modèles par partie



Dernier essai thermonucléaire





LES ÉTUDES D'INCERTITUDES À LA DAM

Missions

DAM Île-de-France

- Physique des armes
- Simulation numérique
- Surveillance des traités

Valduc

- Matériaux nucléaires

Le Ripault

- Matériaux non nucléaires

Le Cesta

- Architecture des armes
- Tenue à l'environnement
- Lasers de puissance

Gramat

- Vulnérabilité des systèmes
- Efficacité des armements

- Incertitudes de modèles physiques (turbulence...), de données de base (sections efficaces, équations d'état...), expérimentales
- Calibration de codes, incertitudes de simulation (V&V)
- Analyse de risques (sismiques, radiologiques...), détection d'évènement (par infrasons...)

- Procédé de fabrication
- Quantification de masse de déchets

- Procédé de fabrication
- Incertitudes de données de base (équations d'état...)

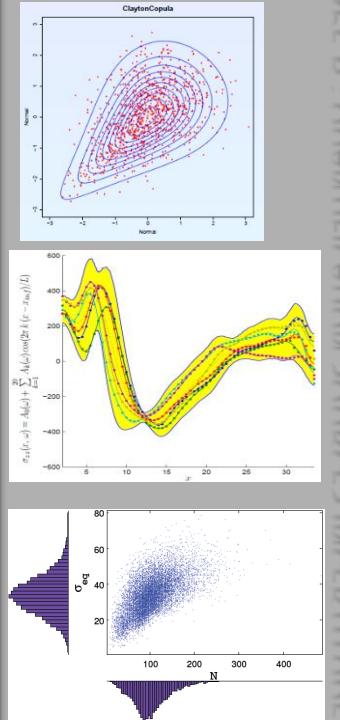
- Fiabilité et garantie de performance
- Problèmes inverses (surface équivalente radar)
- Incertitudes expérimentales
- Calibration de codes, V&V

- Fiabilité, tenue aux agressions
- Incertitudes de modèles physiques, de simulation, expérimentales

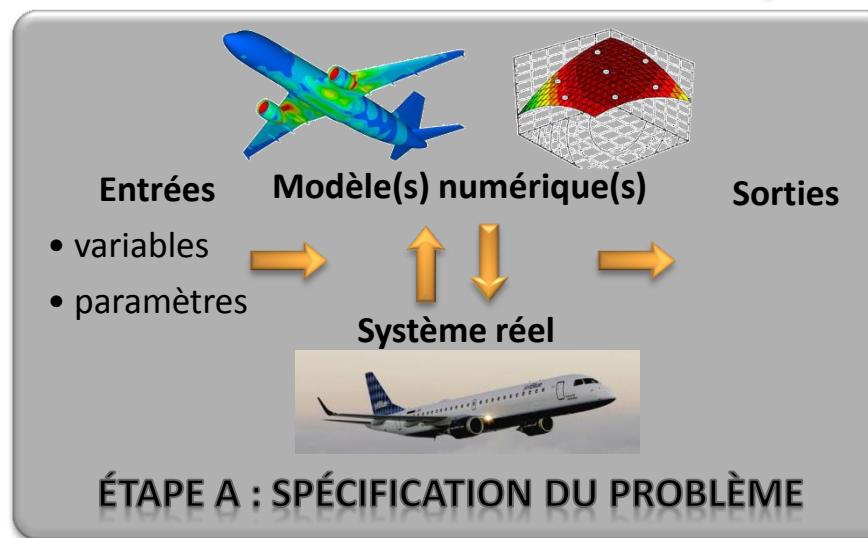
TRAITEMENT DES INCERTITUDES

Méthodologie : approche codifiée

ÉTAPE B : QUANTIFICATION SOURCES INCERTITUDES

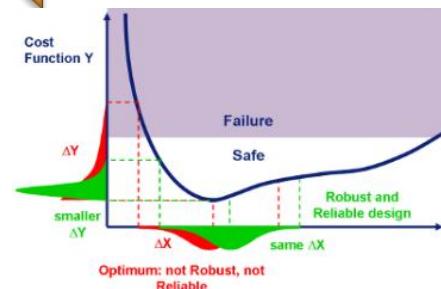


Étape C : Propagation des incertitudes

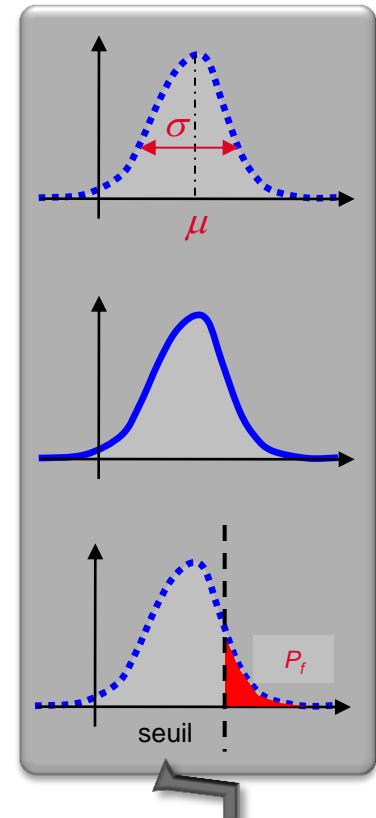


ÉTAPE A : SPÉCIFICATION DU PROBLÈME

Étape C' : Rebouclage



Même formalisme qu'OT



TRAITEMENT DES INCERTITUDES

Analyse de données :

- Statistique inférentielle
- Statistique bayésienne

Étape C : Propagation des incertitudes

Choix de la représentation du système et des quantités d'intérêt associées :

- Planification d'expériences ;
- Construction d'un méta-modèle

ÉTAPE A : SPÉCIFICATION DU PROBLÈME

- Problème inverse (Optimisation robuste)
 - ▶ optimisation sous contrainte de fiabilité
- Calibration bayésienne
 - ▶ Méthodes analytiques
 - ▶ Simulation Monte-Carlo

Étape C' : Rebouclage

- Analyse de sensibilité
 - ▶ Approche variationnelle locale
 - ▶ Approche variationnelle globale
 - ▶ Traitement statistique

- Analyse de distribution
 - ▶ Simulation stochastique
 - ▶ Méthodes spectrales (chaos polynomial)
 - ▶ Traitement statistique

• Analyse de tendances

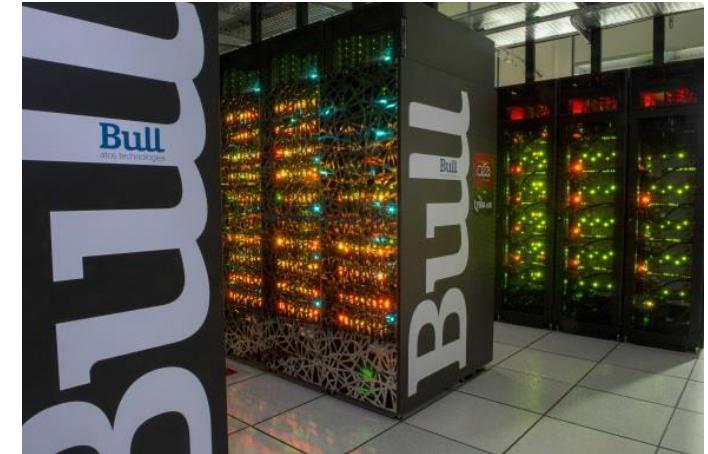
- quantification risque (i.e. Probabilité événements rares)
 - ▶ Planification expériences et méta-modélisation
 - ▶ Fiabilité
 - ▶ Simulation stochastique
 - ▶ Traitement statistique des données de sortie

TRAITEMENT DES INCERTITUDES

Les outils

■ Machines : TERA

- ▶ TERA 100 :
 - puissance 1,3 Pflops
 - 17480 processeurs
 - 300 teraoctets de mémoire centrale
 - Stockage : 8 petaoctets (~ 9600 disques)
- ▶ TERA 1000 : puissance 25 Pflops



■ Outils numériques : différents en fonction des utilisateurs

- ▶ MATLAB
- ▶ R : Dicekriging, sensitivity, mistral, ...
- ▶ Python : OpenTURNS 1.6, scikit-learn, pandas ...



1- CEA / DAM

2 – Exemple utilisation OT

3 - Conclusion

Analyse mécano-fiabiliste d'une enceinte de confinement

1- CONTEXTE

Structure : Enceinte de confinement



- ▶ *Rôle* : Confiner l'ensemble des produits issus du fonctionnement d'un explosif en son sein
- ▶ *Conception* : Réservoir sphérique comportant 5 ouvertures boulonnées
 - Haut : mise en place édifice ;
 - Latérales : permettre la mesure.
- ▶ *Chargement* : transitoire de pression sur la paroi interne = souffle lié au fonctionnement de la charge

Usage unique ! ⇒ possibilité d'utiliser la plasticité de la structure

1- CONTEXTE

Objectifs

- Apporter les éléments d'aide à la décision suivant :
 1. Détermination de la variabilité de l'*Environnement* ⇒ analyse de dispersion
 2. Hiérarchisation des contributeurs ⇒ analyse de sensibilité
 3. Quantification de risque ⇒ quantification d'événements rares

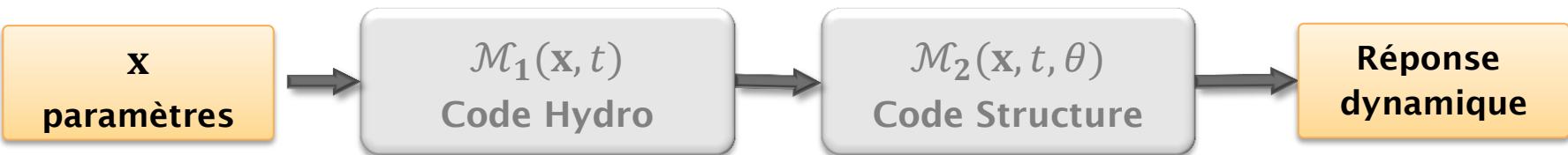
Contraintes

- Grande dimension : $d = 14$
- Budget de calculs faible (pour d) : $n = 100$

*Nécessite l'utilisation d'une méthodologie adéquate :
Approche mécano-fiabiliste*

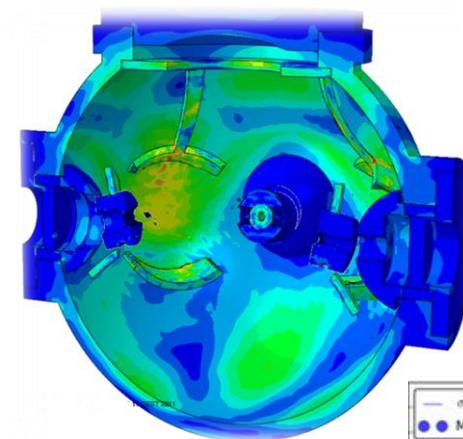
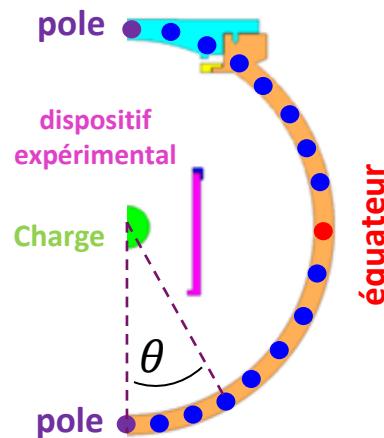
2- ETAPÉ A : APPROCHE DETERMINISTE

Chaîne de calculs



$$\mathbf{x} = \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_c \\ \mathbf{x}_m \\ \mathbf{x}_g \end{Bmatrix} \in \mathbb{X} \subseteq \mathbb{R}^d$$

Chargement
Matériaux
Géométrie

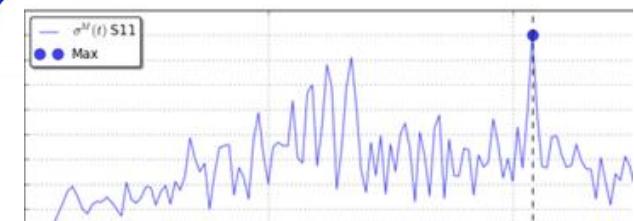


Contraintes σ_{VM} engendrées par la vibration de la cuve excitée par le souffle

$$\sigma_{VM}(\mathbf{x}, \theta) = \max_t(M_2 \circ M_1(\mathbf{x}, t, \theta))$$



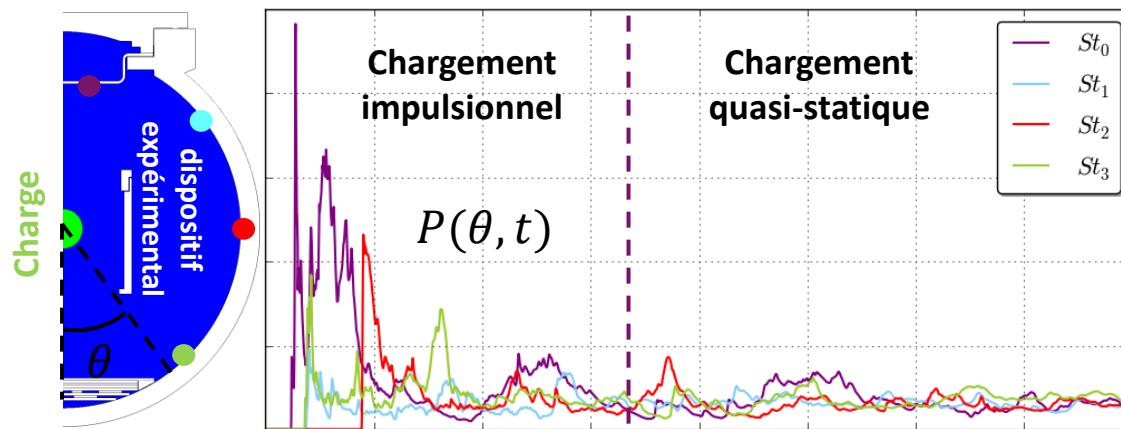
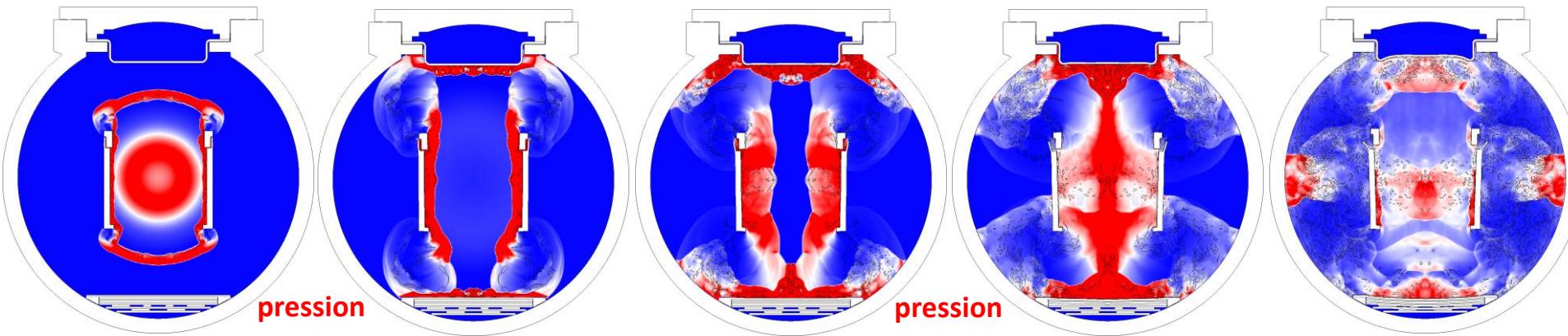
Chainage python



Effort numérique important pour évaluer l'observable

2- ETAPÉ A : APPROCHE DETERMINISTE

Chaîne de calculs : Modélisation hydro 2D

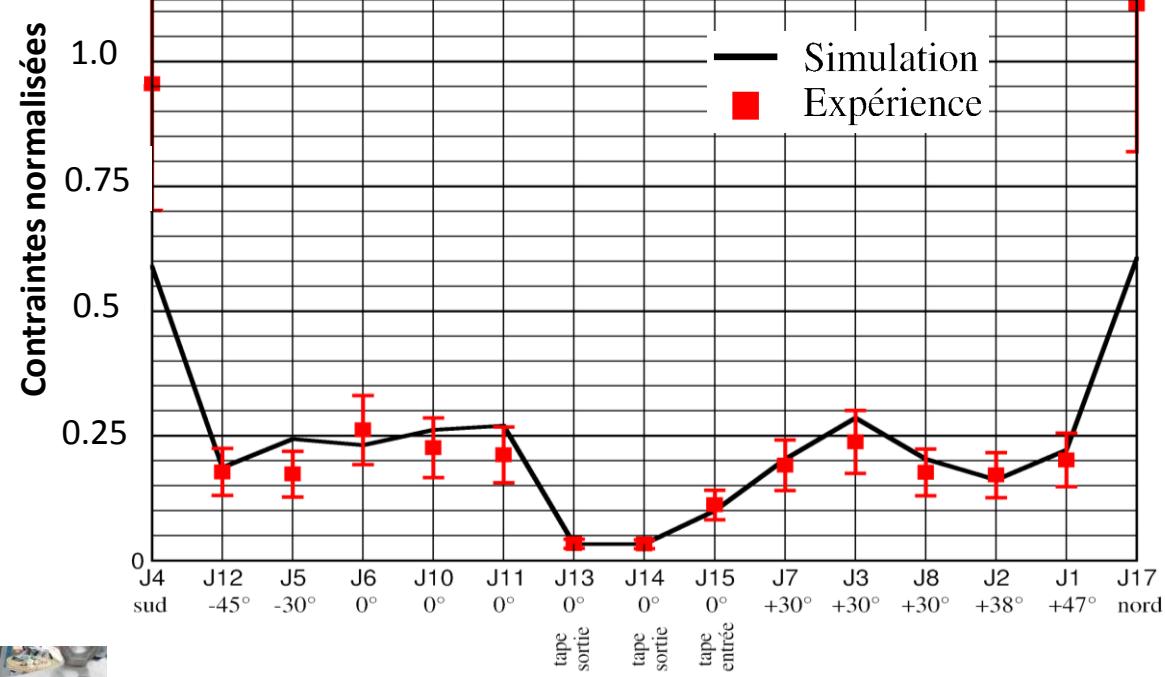
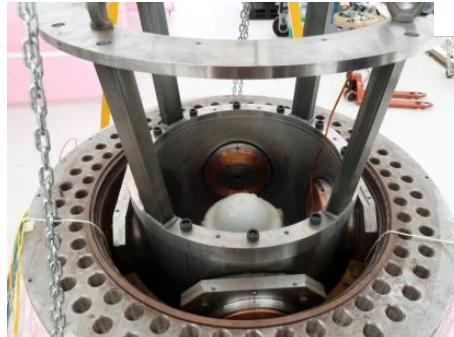
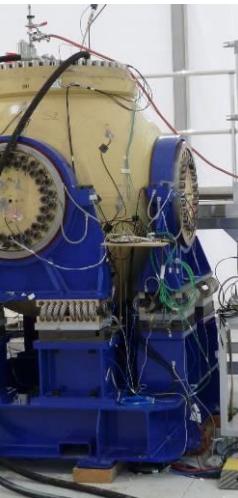
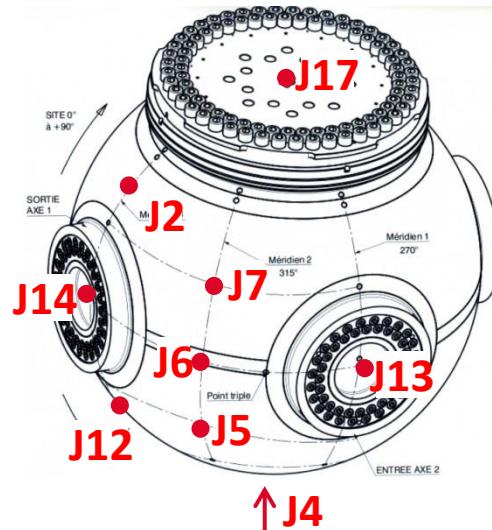


- Choc dynamique : transitoires de pression en paroi interne
- obstacle --> **effet cheminée**

1 calcul = 24h avec 128 processeurs

2- ETAPE A : APPROCHE DETERMINISTE

Validation de la modélisation : Approche V&V



- *la simulation restitue les mesures*
- *difficulté à reproduire numériquement l'effet cheminée*

2- ETAPE A : APPROCHE DETERMINISTE

Recalage de la modélisation : calibration bayésienne

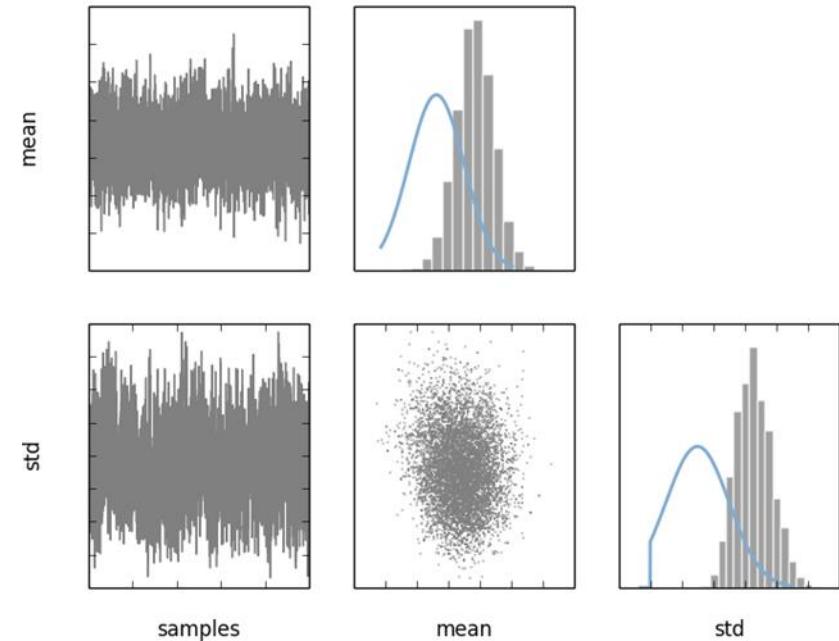
- Formulation :

$$y_{reel}^p = y_{mes}^p + \underbrace{\epsilon_{mes}^p}_{\sim \mathcal{N}(0, \sigma_{mes}^2)} = \underbrace{y_{code}^p(x, \theta)}_{\sim L\mathcal{N}} + \underbrace{\epsilon_{code}^p}_{\sim \mathcal{N}(\mu_{mod}, \sigma_{mod}^2)}$$

- Données : comparaison expérience / calcul

- Identification : **calibration bayésienne**

*Outils : utilisation pyMC
--> fonctionnalités OT pas encore équivalente*



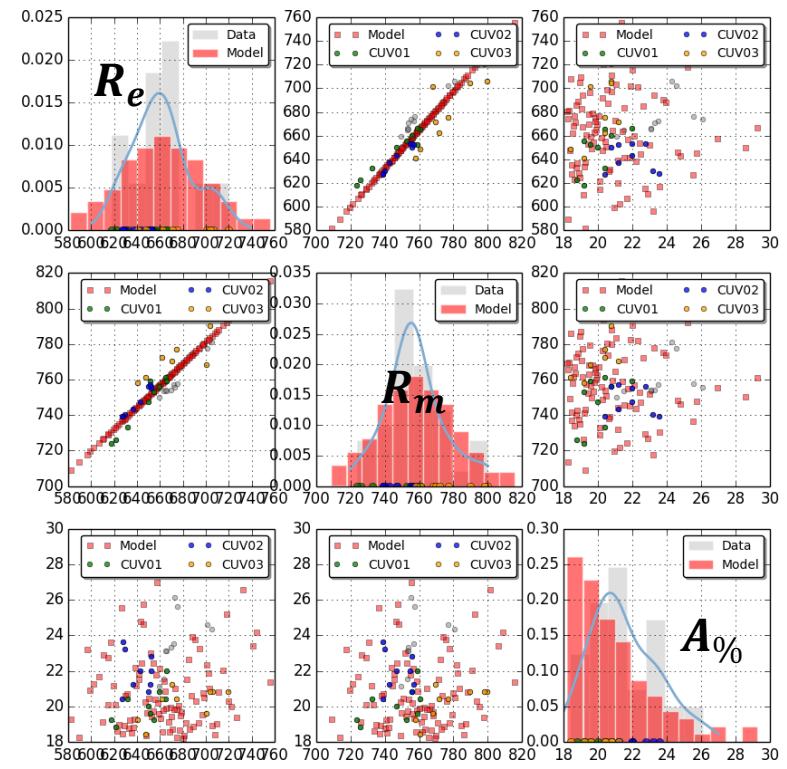
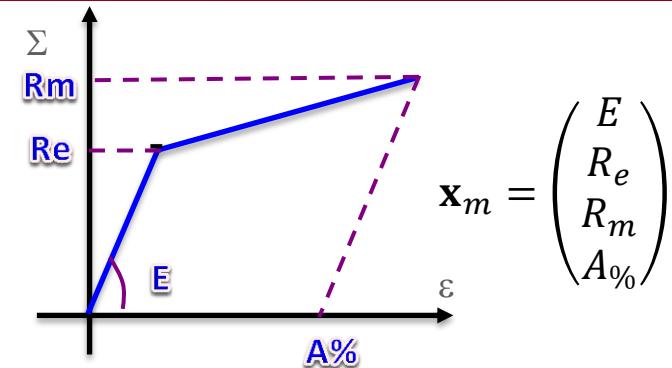
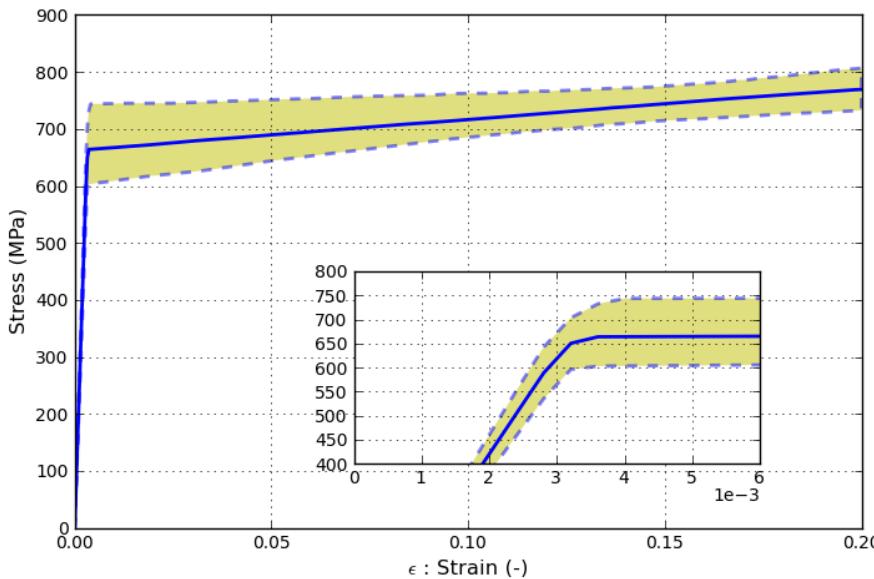
3- ETAPE B : VARIABILITE

Matériaux

Outils : OT + R

- Traitement statistique de données + analyse des dépendances (MLE, bootstrap, marginales, copules ...)

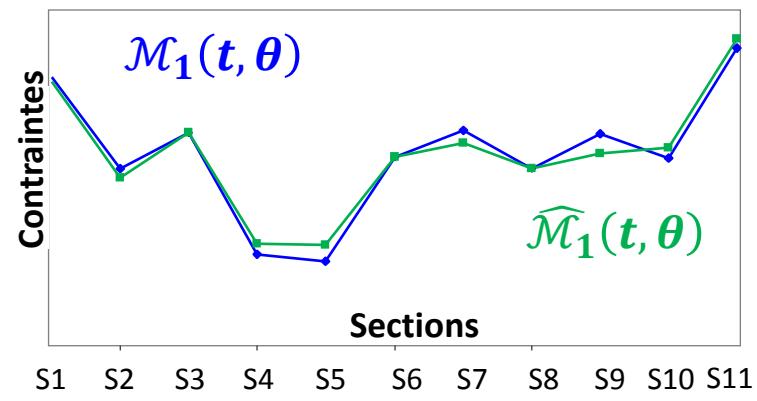
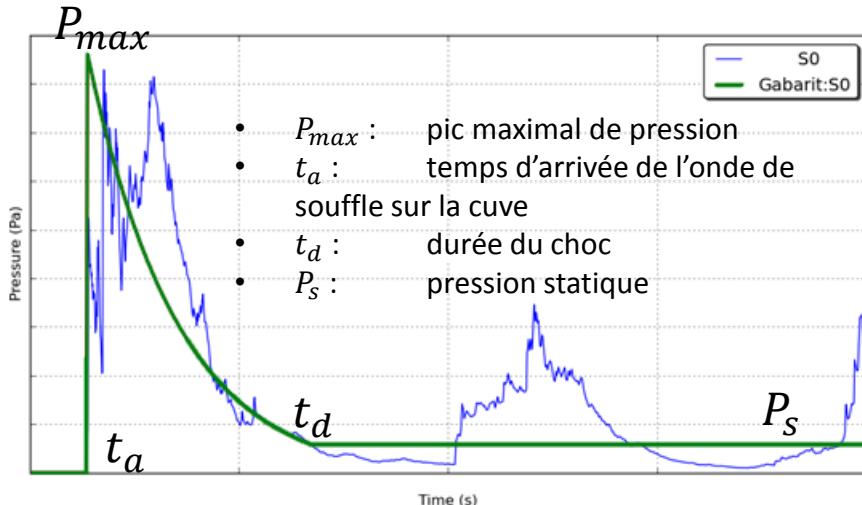
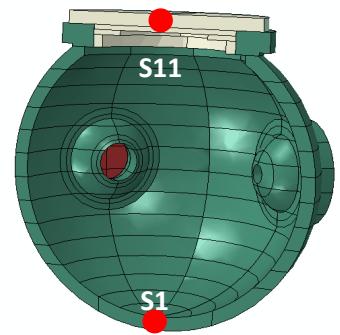
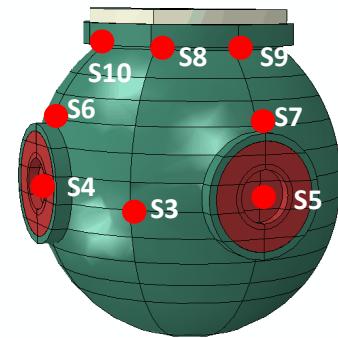
Loi de comportement incertaine identifiée à partir des données



3- ETAPE B : VARIABILITE

Chargement

- Méthodologie : Calculs hydro couteux \Rightarrow Approche *découplée* \Rightarrow modélisation variabilité du chargement **avec seulement 30 calculs !**
- Contributeurs x_c : Rayon + décentrement charge et explosif
- Sortie fonctionnelle \Rightarrow Réduction dimension : base statistique (ACP, ...) ou physique - **modèle de KINNEY à 4 paramètres**

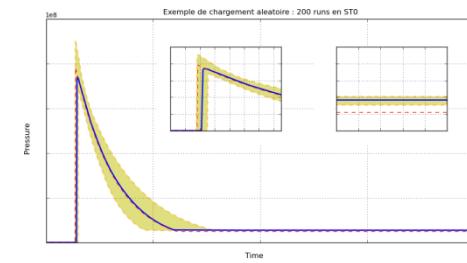
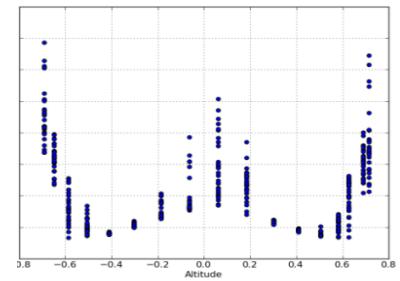
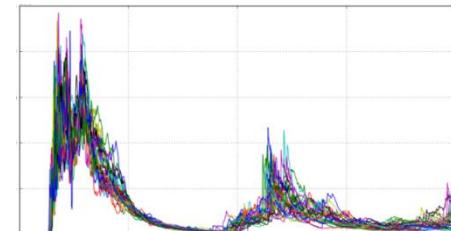


3- ETAPE B : VARIABILITE

Chargement

1. Échantillonnage des contributeurs : LHS optimisé
2. Transformation iso-probabiliste
3. Pour chaque réalisation : identification $\widehat{\mathcal{M}}_1(\mathbf{t}, \boldsymbol{\theta})$ aux 17 sites $\boldsymbol{\theta}$: restitution amplitude du choc + impulsion --> pb optimisation
4. Construction de métamodèles : **cokrigage** avec dépendance en position $\boldsymbol{\theta}$ --> garantit cohérence : un souffle d'amplitude importante au pôle sud l'est également au pôle nord.
5. Vérification de la capacité de prédiction des métamodèles + Prédiction des lois de pression excitant la cuve

Outils :
 1+2 : OT + R
 4+5 : scikit-learn



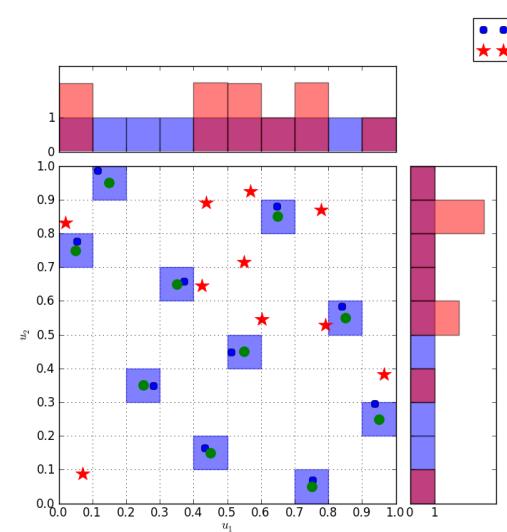
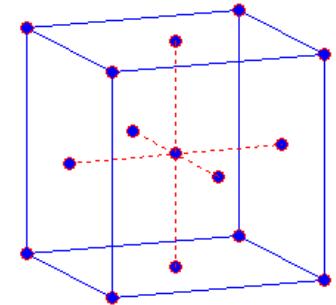
4- PROPAGATION INCERTITUDES : DOE « OPTIMAL »

Problèmes

- Comment réaliser les calculs pour identifier au mieux la variabilité de l'environnement ? \Rightarrow explorer au mieux le domaine des possibles des entrées
 - ▶ La précision (et donc le coût) de l'exploration dépend de la dimension d
 - ▶ Un échantillon purement aléatoire (Monte Carlo) ne permet pas une bonne couverture de l'espace des entrées

Utilisation de plans d'expériences spécifiques \Rightarrow Plan SFD « Space Filling Design » comme le LHS

$$\mathcal{X} \subseteq \mathbb{X} \subseteq \mathbb{R}^d$$



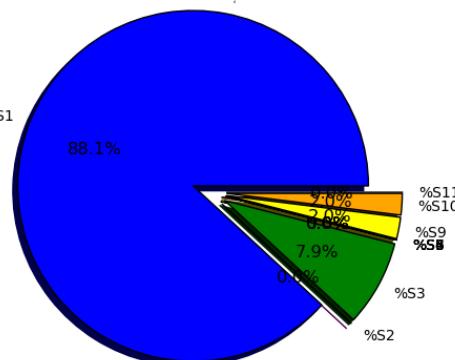
Outils : OT + R

4- PROPAGATION INCERTITUDES : DOE « OPTIMAL »

Analyse de l'ensemble des calculs

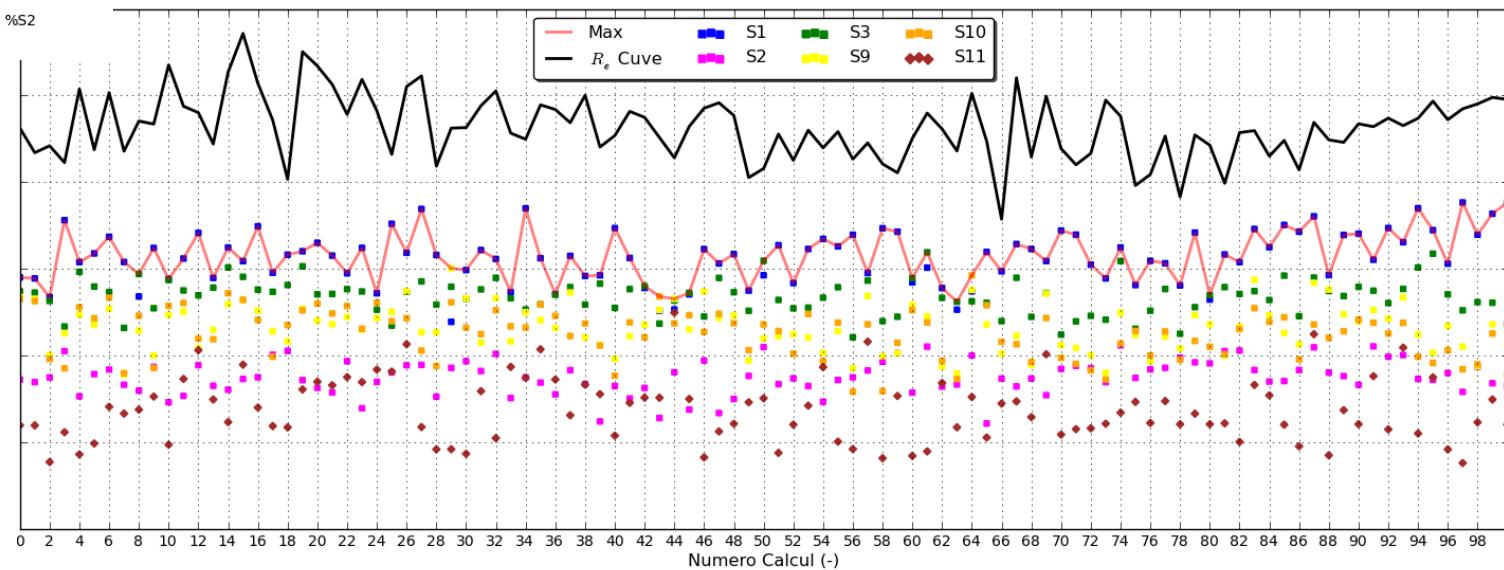
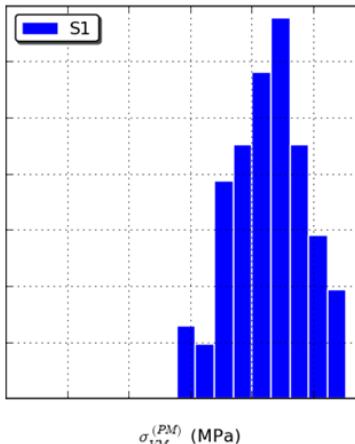
Outils : OT

Contribution Sections : $\max_{S_i}(\sigma_{VM}^{(PM)})$ Membrane



Apparition du max de contraintes :

- dans 4 sections différentes : S_1 , S_3 , S_9 et S_{10}
- avec le plus de chances en S_1 (88%) \Rightarrow dans la cuve structure travaille dans le domaine élastique --> marge de plastification excessive conséquente



$$\sigma_{VM}(\mathbf{x}, \theta) = \max_t (\mathcal{M}_2 \circ \widehat{\mathcal{M}_1}(\mathbf{x}, t, \theta))$$

5- ANALYSE DE SENSIBILITÉ

Décomposition de variance

- Objectifs : évaluation des **indices de SOBOL**

$$0 \leq Sb_i = \frac{\text{Var}[\mathbb{E}[\sigma_{VM}|X_i]]}{\text{Var}[\sigma_{VM}]} = \frac{V_i}{\text{Var}[\sigma_{VM}]}$$

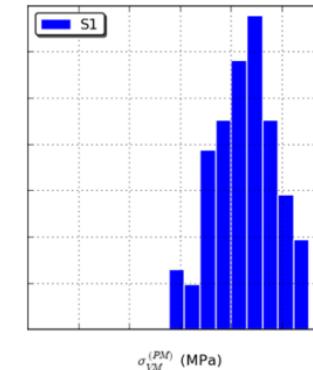
$$Sb_{jk} = \frac{V_{jk}}{\text{Var}[\sigma_{VM}]} \dots \quad Sb_{jkl} = \frac{V_{jkl}}{\text{Var}[\sigma_{VM}]}$$

$$Sb_{T_i} = \sum_{i \subseteq q} Sb_q$$

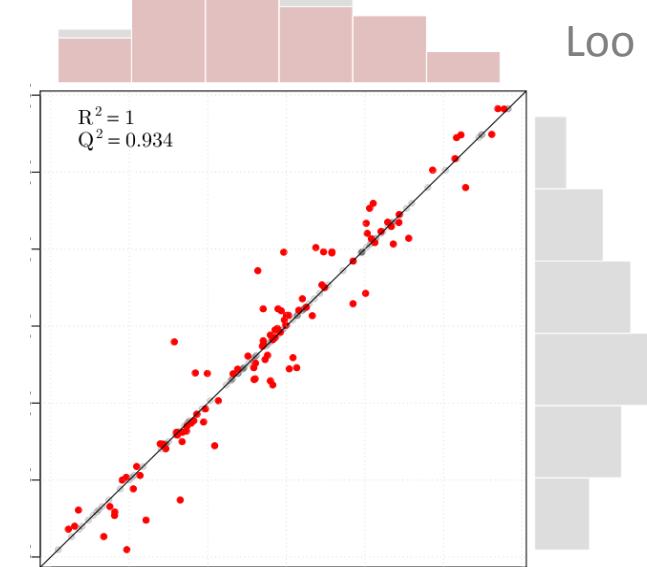
- Pb : appel à la chaîne de calculs --> **krigeage**
 - ▶ 100 calculs en dimension 17 !

$$\sigma_{VM}(\mathbf{x}, \theta) \approx \max_t \left(\widehat{\mathcal{M}_2} \circ \widehat{\mathcal{M}_1} (\mathbf{x}, t, \theta) \right)$$

Outils : R + scikit-learn
 --> Variance krigeage pas disponible dans OT



$\text{Var}_{S_1}[\sigma_{VM}]$

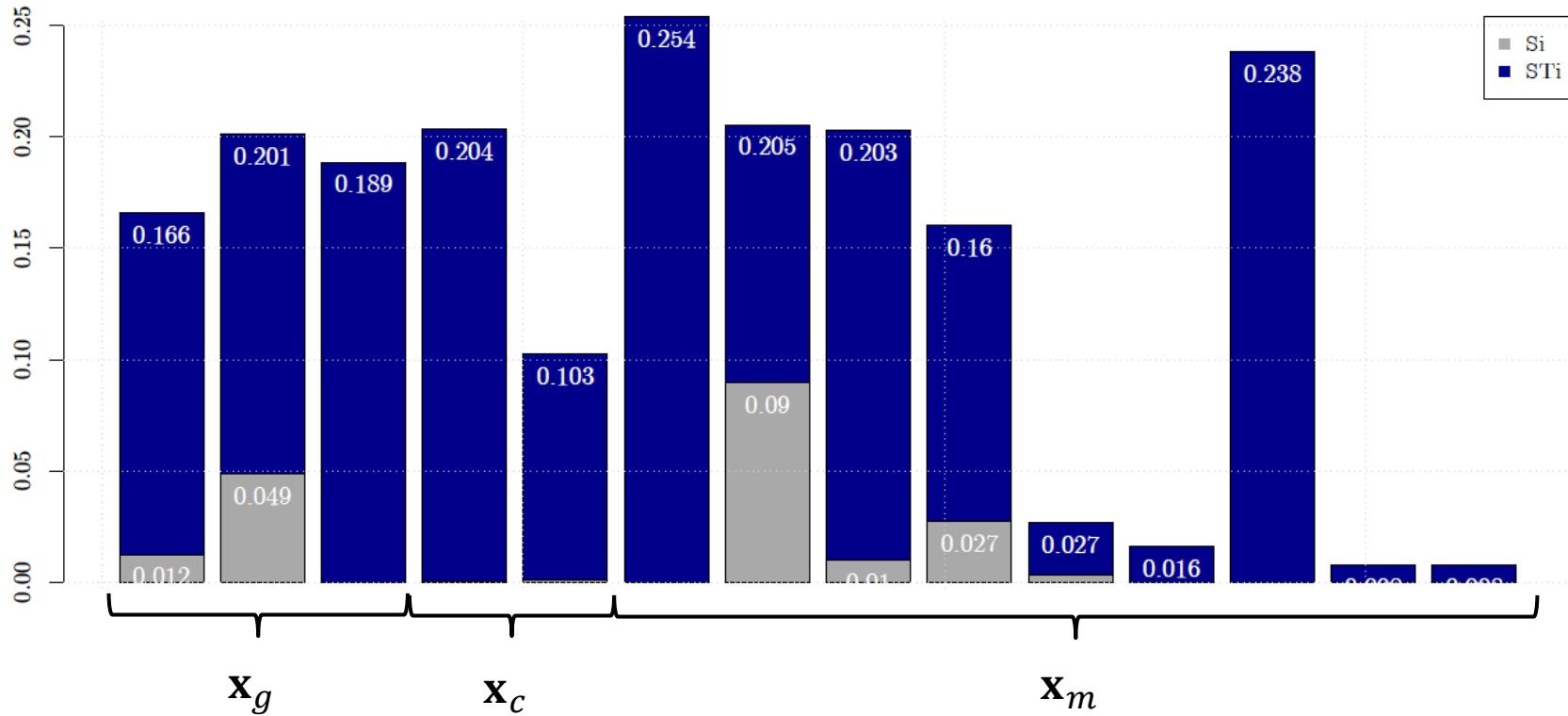


5- ANALYSE DE SENSIBILITÉ

Indices de SOBOL

Outils : OT + R

Indices de SOBOL : Si (ORDRE 1) et STi (TOTALS)



Presque toutes les variables jouent et en interaction,
i.e. pas seule \Rightarrow combinaison ! \Rightarrow bonne conception de
la structure

6- ANALYSE DE FIABILITE

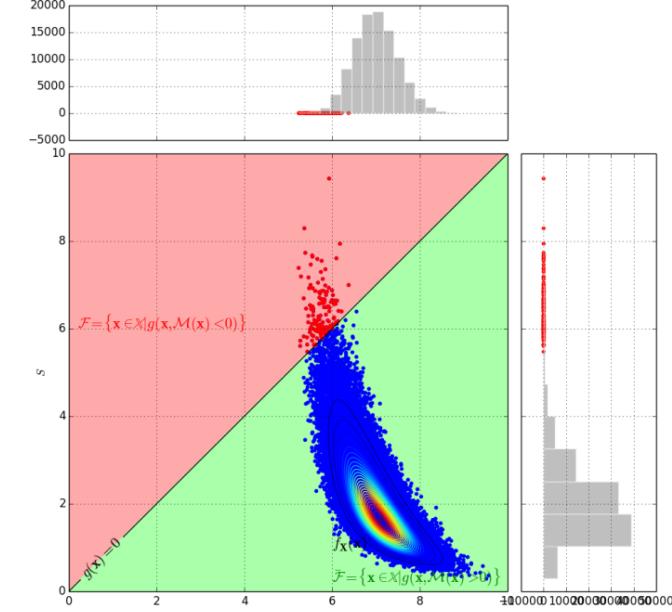
Méthode

- Evaluation d'une probabilité de défaillance P_f , pour une fonction de performance g et un modèle stochastique donné X .

Intégrale multidimensionnelle difficile à évaluer

$$g(\mathbf{x}) = r - \max_{S_i} [\mathcal{M}_2 \circ \mathcal{M}_1(\mathbf{x})]$$

$$p_f = \mathbb{P}[g(\mathbf{x}) \leq 0] = \int_{\mathbb{X}} \mathbb{I}_{\mathcal{F}}(\mathbf{x}) f_X(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \mathbb{E}_X[\mathbb{I}_{\mathcal{F}}(\mathbf{x})]$$



- Méthode de référence :

- Extrapolation -> impossible !!
- Monte-Carlo « brute force »

$$p_f \approx \widehat{p}_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbb{I}_{\mathcal{F}}(\mathbf{x}^{(i)})$$

Besoin de 10^{n+2} calculs pour estimer une probabilité de $10^{-n} \Rightarrow$ incompatible

Méthode spécifique : métamodélisation

Outils :

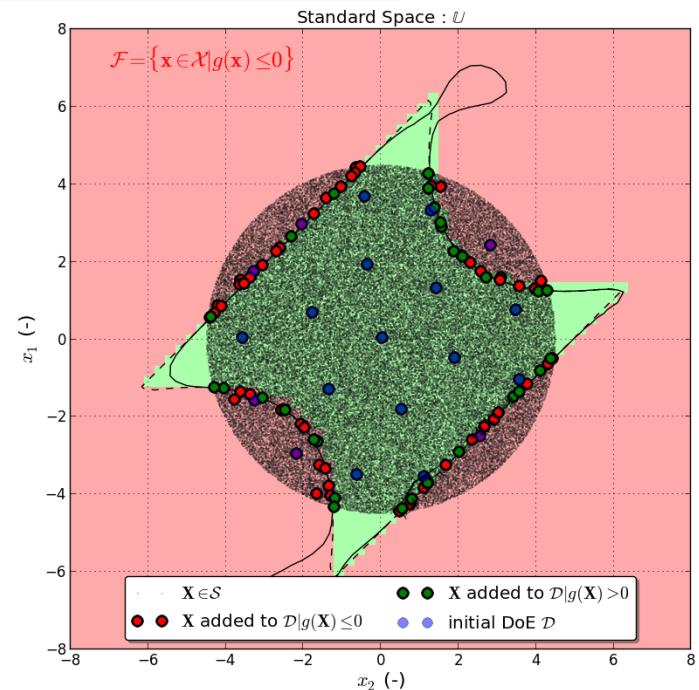
- Principe : utiliser un méta-modèle de la fonction de performance

$$g \approx \hat{g} \rightarrow p_f \approx \widehat{p_f} = \mathbb{P}\left[\widehat{g(\mathbf{x})} \leq 0\right] = \mathbb{E}_X[\mathbb{I}_{\mathcal{F}}(\mathbf{x})] \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbb{I}_{\mathcal{F}}(\mathbf{x}^{(i)})$$

- Pb : budget de calcul faible \Rightarrow approcher g pas partout dans le domaine \mathbb{X} mais aux « endroits les plus utiles » : utilisation du **krigeage** en classification \Rightarrow Méthodes **AK-MCS** ou **Meta-IS** et développement **iAK-IS**

Enceinte de confinement

$Pf << 10^{-3} \Rightarrow 300$ calculs au lieu de 10^5



- 1- CEA / DAM
- 2 – Exemple utilisation OT
- 3 - Conclusion**

CONCLUSION

CONCLUSION

- Etude représentative des activités en traitement des incertitudes :
 - ▶ Construction de modèles pour aider à interpréter des expériences, leur variabilité et leur incertitude ... qui inclut la planification de ces expériences ;
 - ▶ Analyse de sensibilité ;
 - ▶ Quantification de risque ou de garantie de fonctionnement ;
 - ▶ Calibration de codes de simulation ou de diagnostics expérimentaux
- OpenTURNS est un outil utilisé dans ce cadre :
 - ▶ Planification d'expériences, propagation d'incertitudes, chaos polynomial, indices de SOBOL, ...
- Ne traite pas tous les besoins :
 - ▶ Approche bayésienne McMC ;
 - ▶ Krigeage, cokrigeage, multifidélité, ...
 - ▶ Utilisation de cluster en événement rares

REFERENCES

- 
- Defaux G., & P. Evrard (2013).
Probabilistic analysis of a containment vessel subjected to dynamic pressure loading using surrogate models
In Proc. ICOSSAR, New York
- 
- Rodriguez, E. & C. Romero (2006).
Hydrodynamic modeling of detonations for structural design of containment vessels.
In Proc. 2nd Meeting IAHR, pp. 39–64
- 
- Sudret, B. (2012).
Meta-models for structural reliability and uncertainty quantification.
In Fifth Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications
- 
- Zheng, J. a. (2008).
Recent progress of explosion containment vessel (part i): Methods for design of explosion containment vessels.
Journal of Pressure Equipment and Systems 6, 185–198.

Simulations
Sensibilité
Incertitudes
Echantillonage
Calibration
Plan d'expériences
Varianc^e
Fiabilité
Méta-modèle
Statistiques
Chaos polynomial
Krigeage



**Merci pour votre
attention
Si vous avez des
questions ?**

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Centre DAM-Ile de France | Bruyères-le-Chatel | F-91297 Arpajon Cedex
T. +33 (0)1 69 26 40 00

Etablissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019